

การศึกษาผลกระทบของสภาพภูมิอากาศต่อการสื่อสารดาวเทียมระบบดิจิทัล
ในย่านความถี่ KU

STUDY OF THE PROPAGATION CHARACTERISTICS DUE TO TROPOSPHERIC
EFFECT OF DIGITAL SATELLITE COMMUNICATION IN KU-BAND

ทิมม์พร บุญชุก
THIKUMPORN BOONCHUK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2545
ISBN 974-648-925-9

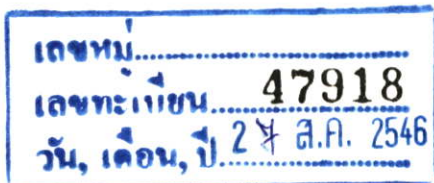
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลกระทบของสภาพภูมิอากาศต่อการสื่อสารดาวเทียมระบบดิจิทัล
ในย่านความถี่ KU

STUDY OF THE PROPAGATION CHARACTERISTICS DUE TO
TROPOSPHERIC EFFECT OF DIGITAL SATELLITE COMMUNICATION
IN KU-BAND

ทิมัมพร บุญชุก

THIKUMPORN BOONCHUK



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-925-9

**STUDY OF THE PROPAGATION CHARACTERISTICS DUE TO
TROPOSPHERIC EFFECT OF DIGITAL SATELLITE COMMUNICATION
IN KU-BAND**

THIKUMPORN BOONCHUK

**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**

2002

ISBN 974-648-925-9

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของสภาพภูมิอากาศต่อการสื่อสารดาวเทียมระบบดิจิทัลในย่านความถี่ Ku
นักศึกษา	นายฉิมพร บุญซึก
รหัสประจำตัว	41061054
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ณรงค์ เหมกรณ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษา และวิเคราะห์ ผลกระทบที่เกิดกับการสื่อสารดาวเทียมระบบดิจิทัลย่านความถี่ Ku ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯลาดกระบัง ซึ่งอยู่ในบริเวณแถบเส้นศูนย์สูตร สภาพภูมิอากาศในแถบนี้มีผลกระทบอย่างมากต่อการสื่อสารย่าน Ku การวิเคราะห์ทำโดยวัดสัญญาณรบกวนของดาวเทียม JCSAT-1B ตลอด 24 ชั่วโมง ตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์ 2543 ถึงเดือน กันยายน 2544 ทำการทดลองหาอัตราส่วนระดับสัญญาณคลื่นพาห์ต่อระดับสัญญาณรบกวน (C/N) อัตราการผิดพลาดของข้อมูลในระดับ C/N ค่าต่างๆ โดยการเปลี่ยนค่ากำลังส่งของเครื่องส่งเปรียบเทียบกับสภาพภูมิอากาศ ปริมาณและ อัตราการตกของฝน การลดทอนเนื่องจากฝนเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้การเชื่อมต่อของโครงข่ายเสียหาย จากการทดลองค่าการลดทอนที่ 0.01% ของเวลาสะสมทั้งปี หรือประมาณ หนึ่งชั่วโมง มีค่าสูงกว่า 25 dB และโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงพลบค่ำ และบ่อยครั้งที่เกิดอัตราการตกของฝนสูงในบริเวณแถบๆ นอกจากนี้อัตราการตกของฝนราย 10 วินาที สามารถวัดได้สูงถึง 330 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบการลดทอนเนื่องจากฝนที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากแบบจำลองของ ITU-R และ Crane นั้นแสดงให้เห็นว่า ผลที่ได้จากการทดลองนั้นใกล้เคียงกับผลของแบบจำลองของ Crane ในเขต H และค่าที่ได้จากแบบจำลองของ ITU-R ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองมาก ระบบสถานีภาคพื้นดินที่ใช้ในการทดลองนี้มีอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนของช่องสัญญาณสื่อสารประมาณ 16 dB ซึ่งจะมีเวลาที่ไม่สามารถทำการติดต่อสื่อสารได้เลยเป็นเวลา 0.1% ของเวลาทั้งปี หรือประมาณ 9 ชั่วโมง และเป็นเวลา 0.45% ของเวลาทั้งปี หรือ ประมาณ 39 ชั่วโมง ที่การติดต่อสื่อสารเกิดการผิดพลาดของข้อมูลเกิดขึ้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการทำนายความน่าเชื่อถือของระบบสื่อสารดาวเทียมย่านความถี่ Ku สำหรับประเทศไทยและประเทศที่มีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นอย่างเช่นประเทศในแถบภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้เป็นอย่างดี

Thesis Title	Study of the Propagation Characteristics due to Tropospheric Effect of Digital Satellite Communication in Ku-band
Student	Mr.Thikumporn Boonchuk
Student ID.	41061054
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Narong Hemmakorn

ABSTRACT

This thesis presents the study and analysis of the impairment of the digital satellite communication system at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, which is located in the equatorial zone. The climate in this zone takes a severe effect in the satellite communication system above 10 GHz as Ku-band. The analysis has done by measuring beacon signal level from JCSAT-1B 24 hour a day, the carrier to noise ratio (C/N), Bit Error Rate at each value of C/N by changing the transmission power and also the meteorological data, especially, rain and rainfall rate around the earth station. Rain is major factor that impairing the system. From the experimental, the rain attenuation at 0.01% of an average year is over 25 dB and it almost occurs in dusk. We can, frequently, observe the heavy rain rate with small rain cell. Moreover, the rain rate with the integration time of 10 second can observe the high rain rate as 330 mm/hr. The comparisons between the measured rain attenuation with others one that obtained from ITU-R and Crane model. The Crane model (H zone) gives a fairly well coincident with the measured one but the ITU-R model gives largely difference with the measured one. The earth station that using in the experiments has carrier-to-noise ratio in communication channels about 16 dB with the outage time about 0.1% of an average year or about 9 hours and 0.45% of an average year or about 39 hours that the link has error occurred. These data can be utilized and predicted the system reliability of Ku-band satellite communication in Thailand and vicinity tropical area such South East Asia zone.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาต่างๆ เป็นอย่างดีจาก รศ.ณรงค์ เหมกรณ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จาก ท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ Prof.Dr. Yoshiako MORIYA, Prof.Dr.Matsuichi YAMADA ผู้เชี่ยวชาญ ในโครงการ ReCCIT, JICA และรศ.นิภา ลีตารุจิ ที่ให้คำแนะนำชี้แนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย Dr.Kiyoshi IGARASHI, Dr.Hisamitsu MINAKOSHI, Mr.Masabumi KAWAMURA ผู้เชี่ยวชาญของโครงการ POST-PARTNERS Mr.Takao MINODE, Mr.Makoto SASAKI, ARIB ที่ทำให้การทดลองผ่านความเหี้ยมสามารถทำได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ครูบาอาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่างๆ ให้กับผู้วิจัย อ.ณัฐ จันท์ครบ คุณอดิสร์ เศษรัตน์ คุณประสิทธิ์ นครราช เพื่อนๆ พี่ๆ ทั้งในห้องวิจัยดาวเทียม และต่างห้องวิจัย ที่ให้ความช่วยเหลือให้คำปรึกษาต่างๆ ด้วยดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยอย่างสม่ำเสมอด้วยดีตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จิम्मพร บุญซึก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย.....	2
1.3 แนวความคิดในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
บทที่ 2 โครงสร้างของชั้นบรรยากาศและผลกระทบต่อการแพร่คลื่น.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.1.1 ผลกระทบจากฝน.....	4
2.1.1.1 การลดทอนเนื่องจากฝน.....	4
2.1.1.2 การเปลี่ยนโพลาไรซ์เนื่องจากฝน.....	4
2.1.2 ผลกระทบจากสภาพอากาศปกติ.....	5
2.1.3 ผลกระทบจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	6
2.1.4 กลไกของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	6
2.1.5 ปัจจัยหลักของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในการสื่อสาร.....	8
2.1.5.1 ปัจจัยของการแพร่คลื่นที่มีความถี่สูงกว่า 3 GHz.....	8
2.1.5.2 ปัจจัยของการแพร่คลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่า 3 GHz.....	10
2.2 ย่านความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารดาวเทียม.....	10
2.2.1 ความถี่ที่ใช้ในระบบสื่อสารดาวเทียม.....	10
2.2.2 การรบกวนซึ่งกันและกัน.....	16
2.3 ชั้นบรรยากาศ.....	16
2.3.1 การแบ่งชั้นบรรยากาศ.....	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.2 รูปแบบของสภาพอากาศ.....	18
2.4 ผลกระทบต่อการสื่อสารดาวเทียม.....	21
2.4.1 ผลกระทบทางเฟส.....	21
2.4.2 ผลกระทบทางแอมพลิจูด.....	21
2.4.3 ผลที่เกิดกับระบบ.....	24
บทที่ 3 ผลกระทบของสัญญาณดาวเทียมจากชั้นบรรยากาศโทร โปสเฟียร์.....	25
3.1 อุปกรณ์และวิธีที่ใช้ในการทดลอง.....	25
3.1.1 งานสายอากาศและอุปกรณ์ขยายสัญญาณรบกวนต่ำ.....	28
3.1.2 เครื่องรับสัญญาณนำร่อง.....	28
3.1.3 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ.....	29
3.1.4 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน.....	30
3.2 ผลการทดลอง.....	33
3.2.1 ผลทางสถิติของซินทิลเลชัน.....	34
3.2.2 ผลทางสถิติของอัตราการตกของฝน.....	39
3.2.3 ผลทางสถิติของการลดทอนของสัญญาณดาวเทียม.....	49
3.2.4 ลักษณะการตกของฝนที่ได้จากการวัด 2 จุด.....	59
3.2.5 การวัดอัตราการตกของฝนด้วยเครื่องวัดที่มีความละเอียดสูง.....	65
3.3 แบบจำลองการลดทอนเนื่องจากฝนของ ITU-R และ Crane.....	68
3.3.1 แบบจำลองการลดทอนเนื่องจากฝนของ Crane.....	68
3.3.2 แบบจำลองการลดทอนเนื่องจากฝนของ ITU-R.....	71
3.3.2.1 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลอง ITU-R P.618-4.....	71
3.3.2.2 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลอง ITU-R P.618-7.....	72
3.3.3 เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของ ITU-R และ Crane.....	74
3.4 สรุปผล.....	75
บทที่ 4 อัตราส่วนคลื่นพากับสัญญาณรบกวน.....	76
4.1 อัตราส่วนคลื่นพากับสัญญาณรบกวนขาลง.....	76

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 เทคนิคในการแก้ไขปัญหาการเกิดการลดทอนอย่างรุนแรง.....	77
4.2.1 SITE DIVERSITY.....	77
4.2.2 การควบคุมกำลังส่ง (Power Control).....	79
4.2.2.1 การควบคุมกำลังส่งด้านขาขึ้น.....	79
4.2.2.2 การควบคุมกำลังส่งด้านขาลง.....	82
4.2.3 ORBITAL DIVERSITY.....	82
4.2.4 ลำคลื่นแบบจุด (Spot Beams).....	83
4.2.5 เทคนิคการแก้ไขโดยกระบวนการประมวลผลสัญญาณ.....	84
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/N และขนาดของจานสายอากาศรับและแบนด์วิธ ของเครื่องรับ.....	85
4.4 ผลการทดลอง.....	87
4.5 สรุปผล.....	88
บทที่ 5 อัตราการผิดพลาดของข้อมูล.....	89
5.1 บทนำ.....	89
5.1.1 วิธีการวัดทดสอบ.....	89
5.1.2 การทดสอบแบบหยุดให้บริการ.....	91
5.1.3 การทดสอบในขณะที่ให้บริการ.....	92
5.2 อุปกรณ์และวิธีที่ใช้ในการทดสอบ.....	93
5.3 การวิเคราะห์อัตราการผิดพลาดของข้อมูล.....	95
5.4 ผลการทดสอบอัตราการผิดพลาดของข้อมูล.....	97
บทที่ 6 สรุปผล.....	102
เอกสารอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก. การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน.....	108
ประวัติผู้เขียน.....	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของอากาศที่ความสูงใกล้กับระดับน้ำทะเล.....	18
3.1 ค่าระดับสัญญาณที่สถานีภาคพื้นดิน.....	26
3.2 รายละเอียดของเครื่องรับสัญญาณนาร่อง.....	29
3.3 เปรียบเทียบเหตุการณ์ฝนที่ได้จาก 2 จุดสังเกต.....	62
5.1 รูปแบบขบวนสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ.....	92
5.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับเทียบค่า C/N ให้เป็น Eb/No.....	96

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ค่าการลดทอนเนื่องจากก๊าซในชั้นบรรยากาศ	5
2.2 กลไกในการแพร่กระจายคลื่นต่างๆและผลกระทบต่อพารามิเตอร์ของสัญญาณ ที่สามารถวัดได้.....	7
2.3 กลไกที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่น.....	9
2.4 Sky Temperature เนื่องจาก Galactic background noise และการดูดกลืนจากชั้นบรรยากาศ...11	
2.5 ความถี่ที่ใช้สำหรับความถี่แบบอยู่กับที่.....	12
2.6 ความถี่ที่ใช้สำหรับความถี่เพื่อกิจการเดินเรือทะเล.....	13
2.7 ความถี่ที่ใช้สำหรับความถี่เพื่อกิจการเดินอากาศ.....	14
2.8 ความถี่ที่ใช้สำหรับความถี่เพื่อการถ่ายทอดวิทยุโทรทัศน์.....	15
2.9 การรบกวนซึ่งกันและกันระหว่างระบบสื่อสารความถี่และระบบไมโครเวฟภาคพื้นดิน.....	16
2.10 การแบ่งชั้นบรรยากาศของโลก.....	17
2.11 การกระจายตัวของความกดอากาศและอุณหภูมิของชั้นบรรยากาศโลก.....	19
2.12 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศภายใต้สภาวะที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ.....	20
2.13 ภาคตัดแนวตั้งของแนวปะทะระหว่างมวลอากาศอุ่นและมวลอากาศเย็น.....	20
2.14 ความแตกต่างของ available time และ unavailable time ในการคำนวณทางสถิติของ การจางหายของ Recommendation G.821.....	23
3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบการวัด.....	25
3.2 พื้นที่ครอบคลุมของ JCSAT-1B.....	26
3.3 ตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด.....	27
3.4 งานสายอากาศและอุปกรณ์ขยายสัญญาณรบกวนต่ำที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.5 เครื่องรับสัญญาณนำร่องที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.6 การเปรียบเทียบและทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของเครื่องรับสัญญาณนำร่อง.....	30
3.7 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Tipping Bucket ที่ติดตั้งที่งานสายอากาศและที่ระยะประมาณ 2 กิโลเมตรในแนวแพร่คลื่นและโครงสร้างภายในของอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน.....	31
3.8 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Rain Drop type ที่มีการลดขนาดของช่องรับฝนให้มีพื้นที่ ลดลงครึ่งหนึ่งจากขนาดเดิม.....	32
3.9 ตัวอย่างสัญญาณนำร่องที่ได้จากการทดลอง.....	33
3.10 เปอร์เซนต์เวลาสะสมของซินทิลเลชันที่สูงกว่าค่าแกนนอน ในช่วง ก.พ. 44 ถึง ม.ค. 45.....	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 ขนาดซินทิลเลชันเฉลี่ยแต่ละเดือนจาก ก.พ. 44 ถึง ม.ค. 45.....	35
3.12 ดัชนีหักเหในแต่ละเดือนที่ สจล.....	36
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างซินทิลเลชันและดัชนีหักเห Nwet.....	37
3.14 ปริมาณน้ำฝนในแต่ละเดือน.....	38
3.15 ตัวอย่างการคำนวณอัตราการตกของฝน.....	39
3.16 เปอร์เซนต์เวลาสะสมของอัตราการตกของฝนที่สูงกว่าค่าแกนนอนในช่วงเวลาหนึ่งปี และ 20 เดือน.....	40
3.17 เปอร์เซนต์เวลาสะสมของอัตราการตกของฝนที่สูงกว่าค่าแกนนอนในแต่ละเดือน.....	41
3.18 เปอร์เซนต์เวลาสะสมของอัตราการตกของฝนที่สูงกว่าค่าแกนนอนในแต่ละชั่วโมงจาก ก.พ. 43 ถึง ม.ค. 44.....	42
3.19 เปอร์เซนต์เวลาสะสมของอัตราการตกของฝนที่สูงกว่าค่าแกนนอนในแต่ละชั่วโมงจาก ก.พ. 43 ถึง ก.ย. 44	44
3.20 ระยะเวลาและจำนวนครั้งที่เกิดในแต่ละอัตราการตกของฝน.....	46
3.21 แผนภาพอัตราการตกของฝนสูงสุดแต่ละชั่วโมงในแต่ละเดือน.....	47
3.22 ระยะเวลาที่อัตราการตกของฝนสูงกว่าค่าที่สนใจ.....	47
3.23 เปอร์เซนต์เวลาสะสมของการลดทอนของสัญญาณนำร่องในช่วงเวลา 12 และ 20 เดือน....	50
3.24 เปอร์เซนต์เวลาสะสมของการลดทอนของสัญญาณนำร่องจาก ก.พ. 43 ถึง ก.ย. 44.....	51
3.25 เปอร์เซนต์เวลาสะสมของการลดทอนของสัญญาณนำร่องที่สูงกว่าค่าแกนนอนในแต่ละ ชั่วโมงจาก ก.พ. 43 ถึง ม.ค. 44.....	52
3.26 เปอร์เซนต์เวลาสะสมของการลดทอนของสัญญาณนำร่องที่สูงกว่าค่าแกนนอนในแต่ละ ชั่วโมงจาก ก.พ. 43 ถึง ก.ย. 44.....	54
3.27 ระยะเวลาและจำนวนครั้งที่เกิดในแต่ละระดับของการลดทอนของสัญญาณนำร่อง.....	56
3.28 แผนภาพการลดทอนสัญญาณนำร่องสูงสุดแต่ละชั่วโมงในแต่ละเดือน.....	57
3.29 ระยะเวลาที่การลดทอนของสัญญาณนำร่องสูงกว่าค่าที่สนใจ.....	57
3.30 ตัวอย่างอัตราการตกของฝนทั้ง 2 จุดและค่าสัญญาณลดทอน.....	60
3.31 เปรียบเทียบเปอร์เซนต์เวลาสะสมของอัตราการตกของฝนที่ได้จากการวัดจุดเดียว และ 2 จุด.....	61
3.32 ระยะเวลาและจำนวนครั้งที่เกิดของเหตุการณ์ฝน.....	65

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.33 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอัตราการตกของฝนราย 10 วินาที และ 1 นาที.....	66
3.34 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบ RD และ TP.....	67
3.35 เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของ ITU-R และ Crane.....	75
4.1 หลักการของ SITE DIVERSITY.....	78
4.2 การควบคุมกำลังส่งด้านข้างแบบรูปปิด.....	80
4.3 เทคนิคการควบคุมกำลังส่งด้านข้างแบบรูปเปิด.....	80
4.4 ตัวอย่างลำคลื่นแบบจุดและลำคลื่นแบบ โชนของดาวเทียม IP-Star.....	83
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายของงานสายอากาศกับกำลังของสัญญาณรบกวน.....	86
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งและค่า C/N.....	88
5.1 พัลส์ดิจิทัลและผลกระทบที่เกิดขึ้น (a) สัญญาณดิจิทัลในอุดมคติ (b) สัญญาณดิจิทัลที่มีความคลาดเคลื่อนทางเวลา (c) สัญญาณดิจิทัลที่ถูกรบกวนทางแอมพลิจูด.....	89
5.2 วิธีการทดสอบแบบหยุดให้บริการ.....	90
5.3 วิธีการคำนวณค่าอัตราการผิดพลาด.....	90
5.4 วงจรกำเนิดขบวนสัญญาณแบบสุ่ม (PRBS).....	91
5.5 แถบความถี่ของขบวนสัญญาณ ไบนารีแบบสุ่มของสัญญาณแบบ NRZ.....	91
5.6 โครงร่างของอุปกรณ์ภาคพื้นดิน.....	94
5.7 โครงร่างของวิธีการทดสอบ.....	94
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_b/N_0 กับค่า BER ที่อัตราส่งข้อมูลต่างๆ.....	97
5.9 ค่า BER ที่อัตราการส่งข้อมูล 512 kbps.....	100
5.10 เปอร์เซนต์เวลาสะสมของอัตราส่วน E_b/N_0 ที่ได้จากค่าการลดทอน.....	101
ก.1 วิธีการที่ใช้ในการปรับเทียบอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน.....	108
ก.2 ผลการปรับเทียบของอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Rain Drop.....	109
ก.3 ผลการปรับเทียบของอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Tipping Bucket.....	110

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การสื่อสารผ่านดาวเทียมในย่านความถี่ Ku ซึ่งในย่านความถี่นี้เมื่อแพร่คลื่นผ่านชั้นบรรยากาศของโลก จะมีผลกระทบหลักมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ไม่ว่าจะเป็นระบบ แอนะลอก หรือ ระบบ ดิจิตอล และเป็นผลกระทบที่รุนแรงไม่สามารถที่จะละเลยได้ ดังนั้นในการออกแบบโครงข่ายสื่อสารผ่านดาวเทียมในย่านความถี่ Ku จึงต้องการข้อมูลทางสถิติของการลดทอนของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เพื่อใช้กำหนดความน่าเชื่อถือของระบบนั้นๆ ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่ส่วนล่างของชั้นบรรยากาศทั้งหมด ซึ่งเป็นชั้นที่อุณหภูมิลดลงตามความสูง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น ความกดอากาศ หรือ การเกิดเมฆหรือ ฝน จะส่งผลกระทบต่อโครงข่ายสื่อสารด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์นี้ การเกิดอิเล็กตรอนอิสระของก๊าซต่างๆ สามารถที่จะตัดออกไปได้ แต่จะมีผลในชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์ ที่อยู่สูงขึ้นไป ผลกระทบที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ Ku นั้นเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การดูดกลืน การกระเจิง การเลี้ยวเบน การหักเห มัลติพาทช์ ซินทิลเลชัน การจางหาย และการกระจาย แต่ละสาเหตุก่อให้เกิดผลกระทบต่อคลื่นด้านใดด้านหนึ่งหรือหลายๆด้าน เช่น กระทบต่อแอมพลิจูด เฟส โพลาริซชันของคลื่น ความถี่ แบนด์วิธ และมุมของคลื่นที่ปะทะ ผลกระทบที่เกิดกับคลื่นย่านความถี่ Ku ที่สำคัญ คือการลดทอนเนื่องจากฝน ซึ่งบางครั้งอาจทำให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้ ปัญหาของผู้ออกแบบระบบคือ การทำนายผลกระทบเนื่องจากฝนต่อระบบการติดต่อสื่อสารที่บริเวณต่างๆ บนโลก และแบบจำลองหรือข้อมูลที่ใช้ในการทำนายการเกิดการลดทอนเนื่องจากฝนยังไม่ครบสมบูรณ์ [1-4] แบบจำลองที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบจำลองที่ทำนายค่าทางสถิติของการเกิดการลดทอนเนื่องจากฝนที่เกิดในช่วงปี ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละปี ระบบการสื่อสารถูกออกแบบให้มีช่วงเวลาที่สามารถสื่อสารได้ หรือ ความน่าเชื่อถือ ในแต่ละเดือนหรือในแต่ละปี ในกรณีของแต่ละเดือนได้จากการหาค่าเฉลี่ยของเดือนที่เกิดการลดทอนรุนแรงที่สุดในช่วงปีนั้นๆ โดยการสมมุติให้ข้อมูลทางสถิติของฝนนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงในปีต่อๆ ไป แต่จะคำนึงการเปลี่ยนแปลงในแต่ละภูมิภาค ประเทศ นอกจากแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายการลดทอนเนื่องจากฝนแล้ว ยังมีเทคนิคต่างๆ ที่ช่วยในการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้แก่ระบบ เทคนิคเหล่านี้ไม่ว่าจะเป็น Site Diversity การควบคุมกำลังส่ง Orbital Diversity ถ้าคลื่นแบบจุด หรือกระบวนการประมวลผลข้อมูล สามารถที่จะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบได้ ซึ่งแน่นอนว่าค่าใช้จ่ายก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และในระบบที่เป็นแบบดิจิตอลสามารถใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณในการช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ ในกรณี

ที่ระบบต้องการความน่าเชื่อถือสูง หรือในกรณีที่ต้องการจะลดค่าใช้จ่ายในการเช่าดาวเทียม สามารถทำได้ โดยการใช้เทคนิคการบีบอัดข้อมูลซึ่งวิธีการนี้ทำให้สามารถส่งข้อมูลจำนวนมากได้ โดยใช้แบนด์วิธน้อย และปัญหาที่สำคัญของระบบดิจิทัลคือการผิดพลาดของข้อมูล อัตราการผิดพลาดของข้อมูลขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนสัญญาณคลื่นพาห่ต่อสัญญาณรบกวน (C/N) หรือ อัตราส่วนของพลังงานต่อบิตต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0)

1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมได้ใช้ความถี่ที่สูงขึ้นและกำลังเปลี่ยนไปใช้ระบบที่เป็นดิจิทัลแทนระบบที่เป็น แอนะล็อก โดยเฉพาะในย่านความถี่สูง เช่น Ku Ka หรือ ความถี่แสง แต่ในความถี่ย่านนี้จะมีผลกระทบจากตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านเป็นอย่างมาก และแตกต่างกันแล้วแต่ย่านความถี่ ในย่านความถี่ Ku และ Ka จะเกิดการลดทอนเนื่องจากฝน ในขณะที่ ในย่านความถี่แสงจะเกิดการลดทอนจากเมฆหมอก สัญญาณลดทอนที่เกิดขึ้นจะกระทบต่ออัตราการผิดพลาดของข้อมูลของระบบนั้น โดยเฉพาะในบริเวณที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร เช่นประเทศไทย ที่มีอัตราการตกของฝนสูง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของระบบการสื่อสารดาวเทียมระบบดิจิทัลต่อการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยวิเคราะห์จากอัตราการผิดพลาดของข้อมูล เปรียบเทียบกับข้อมูลทางสถิติของการลดทอนเนื่องจากฝน

1.3 แนวความคิดในการวิจัย

มีการวิจัยการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมเนื่องจากฝนกันอย่างกว้างขวางและเป็นเวลานาน และมีแบบจำลองออกมาเพื่อทำนายผลกระทบนี้ การลดทอนของสัญญาณคลื่นพาห่ที่ส่งผลให้เกิดการผิดพลาดของข้อมูลที่ส่งไป การผิดพลาดของข้อมูลที่ส่งไปนี้ในกรณีของการส่งของมัลติเพล็กซ์และเสียง เมื่อเกิดข้อมูลผิดพลาดก็จะทำให้ภาพเกิดการผิดพลาดซึ่งจะเป็นบล็อกที่ผิดพลาดเกิดขึ้นในภาพนั้นๆ และในกรณีของเสียงก็จะเกิดเสียงขาดๆ หายๆ ไป การวิจัยนี้จึงโยงเอาปัญหาทั้งสองมาศึกษาด้วยกัน ซึ่งผลการวิจัยจะสามารถบอกให้รู้ว่าคุณภาพของสัญญาณภาพและเสียงของระบบนั้น สามารถที่จะส่งโดยไม่เกิดข้อมูลผิดพลาดขึ้นเป็นเวลานานเท่าไรในช่วงเวลาหนึ่งปี ซึ่งใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาแก้ไขระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมต่อไป

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในการทดลองวิจัยนี้ เน้นการศึกษาถึงผลกระทบของสัญญาณดาวเทียมในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครฯ และระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่ไม่มีการบีบอัดข้อมูลที่จะส่งไป และใช้การมอดูเลทแบบ QPSK เพื่อหาค่าอัตราการผิดพลาดของข้อมูล และลักษณะทางสถิติของการลดทอนเนื่องจากฝนของสัญญาณดาวเทียม วิธีการและผลที่ได้ในงานวิจัยนี้เป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงผลกระทบของสัญญาณดาวเทียมที่เกิดจากชั้นบรรยากาศ กลไกต่างๆ ที่มีผลต่อสัญญาณดาวเทียม ความถี่ต่างๆ ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร ชั้นบรรยากาศ

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ตำแหน่งต่างๆ และ เสนอผลการทดลองการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมเนื่องจากฝน เช่น ระยะเวลาที่เกิดการลดทอนที่ค่าต่างๆ ความยาวนานและจำนวนครั้งที่เกิด ผลการทดลองเก็บข้อมูลฝนสองจุด คือที่งานสายอากาศและที่ระยะ 2 กิโลเมตรในแนวแพร์คลื่น ลักษณะการเกิดฝนของทั้งสองที่ ผลกระทบของระยะเวลาที่ใช้ในการสุ่มเก็บข้อมูลฝน และ เปรียบเทียบของผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองที่มีการนำเสนอและใช้อ้างอิงกันอย่างแพร่หลาย

บทที่ 4 เสนอแนวทางการวิเคราะห์หาความเชื่อมโยงระหว่างการลดทอนที่เกิดขึ้นกับสัญญาณนำร่องกับช่องสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารจริง ผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนสัญญาณคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนของช่องสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสาร และเสนอแนวทางในการปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบ ทั้งการปรับปรุงทางด้านโครงสร้างและการปรับปรุงที่ทำกับข้อมูลที่ต้องการส่ง

บทที่ 5 เสนอผลการทดลองอัตราการผิดพลาดของข้อมูลของสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารจริง เพื่อใช้ในการหาความสัมพันธ์กับการลดทอนเนื่องจากฝนที่ได้

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลที่ได้ในแต่ละบท และแนวทางที่จะวิเคราะห์ต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

โครงสร้างของชั้นบรรยากาศและผลกระทบต่อ การแพร่คลื่น

2.1 บทนำ

ความเชื่อถือได้ของระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมอาจจะถูกกระทบจากหลายๆ ปรากฏการณ์ของการแพร่คลื่นวิทยุ ปรากฏการณ์เหล่านี้ถูกแบ่งออกกว้างๆ เป็น ผลที่เกิดจากฝน ผลที่เกิดจากสภาพอากาศปกติ และผลที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ผลกระทบที่เกิดจากฝนเป็นปัญหาหลักของการสื่อสารดาวเทียมในช่วงความถี่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับความถี่ที่สูงกว่า 10GHz มากกว่าผลกระทบจากสภาพอากาศปกติ ส่วนผลกระทบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะกระทบต่อความเชื่อถือได้ของการสื่อสารผ่านดาวเทียมในช่วงย่านความถี่ 30MHz ถึง 3 GHz ในขณะที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจผลกระทบที่เกิดขึ้นในย่านความถี่ 12 GHz ซึ่งผลกระทบหลักๆ เหล่านี้อธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 ผลกระทบจากฝน

2.1.1.1 การลดทอนเนื่องจากฝน

การลดทอนเนื่องจากฝนมีสาเหตุมาจากการดูดกลืนและการกระเจิงของคลื่นวิทยุ เนื่องจากอนุภาคของน้ำ ผลจากหลายๆ ทฤษฎีและการวิจัยมีมาเป็นเวลานาน และต้องมีการปรับปรุงผลเหล่านั้น ณ ที่สถานีต่างๆ ในทางปฏิบัติจริง นั่นคือโดยปกติแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เป็นฤดูต่อฤดู และปีต่อปีอีกด้วย

การชดเชยการลดทอนที่เกิดจากฝน วิธีการควบคุมกำลังงานในการส่งสัญญาณสู่ดาวเทียมเป็นวิธีที่ได้ผลดีในการฟื้นค่าส่วนเผื่อการลดทอนที่ต้องการ สำหรับระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่ต้องการความเชื่อถือได้สูง นอกจากนี้ยังต้องพิจารณา เทคนิค site diversity ด้วยเพื่อปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบ ด้วยเหตุที่กลุ่มฝนที่ตกหนักๆที่ทำให้เกิดการลดทอนเนื่องจากฝนสูงๆ ในเส้นทางจากพื้นดินสู่อวกาศนั้นส่วนมากกลุ่มฝนจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางในแนวนอนอยู่ในช่วงหลายๆ กิโลเมตร หรือ หลายๆ สิบกิโลเมตร

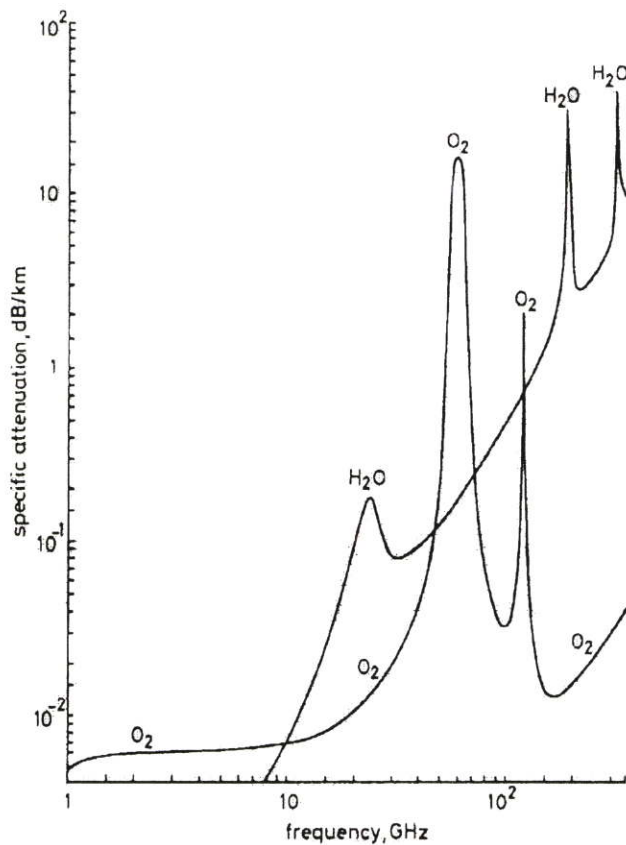
2.1.1.2 การเปลี่ยนโพลาไรซ์เนื่องจากฝน

ในการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณในการสื่อสารผ่านดาวเทียมโดยไม่มี การเพิ่มความกว้างของแถบความถี่ สามารถทำได้โดยการใช้โพลาไรซ์ที่ตั้งฉากกัน ทั้งแบบ ติเนียร์ และแบบวงกลม แต่ละโพลาไรซ์จะส่งความถี่เดียวกัน การใช้ความถี่เดียวกันนี้ถูกกระทบโดยการเกิดการ

รบกวนจากโพลาไรซ์ไขว้ การรบกวนนี้เป็นผลมาจากหยดฝน และ อนุภาคน้ำแข็งในก้อนเมฆ ที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม อย่างเช่นการลดลงของ cross polarization discrimination (XPD) เนื่องจากตัวกลาง ได้มีผลจากหลายๆ ทฤษฎีและงานวิจัย ออกมานานแล้ว และในกรณีที่มีการรบกวนกันของช่องสัญญาณใกล้เคียงกันนั้นไม่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงควรมีอุปกรณ์การชดเชยโพลาไรซ์

2.1.2 ผลกระทบจากสภาพอากาศปกติ

ปรากฏการณ์การแพร่กระจายคลื่นในสภาพอากาศปกติ มีผลกระทบจากหลายๆปัจจัยเช่น การลดทอนจากก๊าซ การแกว่งอย่างกระตั้นหัน การจางหาย การหักเห และอื่นๆ ผลกระทบเหล่านี้จะมีความสำคัญในระบบที่มีมุมเงยต่ำและที่ความถี่สูงกว่า 15GHz ที่ความถี่ประมาณ 22GHz จะมีการลดทอนอย่างมากเนื่องจากการดูดกลืนของไอน้ำ



รูปที่ 2.1 ค่าการลดทอนเนื่องจากก๊าซในชั้นบรรยากาศ (ความกดอากาศ 1013mb, อุณหภูมิ 15°C, ไอน้ำ 7.5g/m³) [1]

2.1.3 ผลกระทบจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างรวดเร็วมีความสัมพันธ์กับการแพร่กระจายคลื่นผ่านช่องว่างที่เกิดจากความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และยังรวมถึงการหมุนของระนาบของโพลาไรซ์ของคลื่นวิทยุ ที่ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่เรียกว่า Faraday rotation ซึ่งมีความสำคัญในกรณีของโพลาไรซ์ที่เป็นแบบ ลินีเยร์ แต่สามารถตัดทิ้งได้ในกรณีของโพลาไรซ์แบบวงกลม ผลกระทบเหล่านี้เปลี่ยนแปลงตามเวลาท้องถิ่น ฤดูกาล พฤติกรรมของดวงอาทิตย์ และลักษณะทางภูมิศาสตร์ ขนาดของการแกว่งจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่สูงขึ้น

2.1.4 กลไกของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

ปรากฏการณ์หรือกลไกที่มีผลกระทบต่อคลื่นวิทยุในการสื่อสารดาวเทียม กลไกเหล่านี้จะอธิบายอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงของคลื่นวิทยุ เปรียบเทียบกับค่าที่ไม่มีปรากฏการณ์เหล่านั้นอยู่ คำนิยามเหล่านี้เป็นคำนิยามมาตรฐานของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุของ Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

การดูดกลืน (Absorption) หมายถึง การลดลงของแอมพลิจูด (field strength) ของคลื่นวิทยุ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปของพลังงาน จากคลื่นวิทยุไปเป็นอย่างอื่นในแนวการแพร่กระจายคลื่น

การกระเจิง (Scattering) หมายถึง กระบวนการที่พลังงานของคลื่นวิทยุกระจัดกระจายในทิศทางต่างๆ เนื่องจากผลกระทบจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของตัวกลางในการแพร่กระจายคลื่น

การหักเห (Refraction) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นวิทยุที่เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหของตัวกลาง

การเลี้ยวเบน (Diffraction) หมายถึงการเปลี่ยนทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นวิทยุที่เป็นผลมาจากมีสิ่งกีดขวาง ผ่านช่องที่จำกัด หรือ มีวัตถุอย่างอื่นในตัวกลาง

มัลติพาทช์ (Multipath) หมายถึง สภาวะของการแพร่กระจายคลื่นที่คลื่นวิทยุมาถึงสายอากาศรับจากสองเส้นทางการแพร่คลื่นหรือมากกว่า มัลติพาทช์ สามารถเกิดได้จากความผิดปกติของดัชนีหักเหของบรรยากาศโทรโพสเฟียร์หรือ ไอโอโนสเฟียร์ หรือจากการแตกกระเจิงจากสิ่งก่อสร้างหรือภูมิประเทศบนผิวโลก

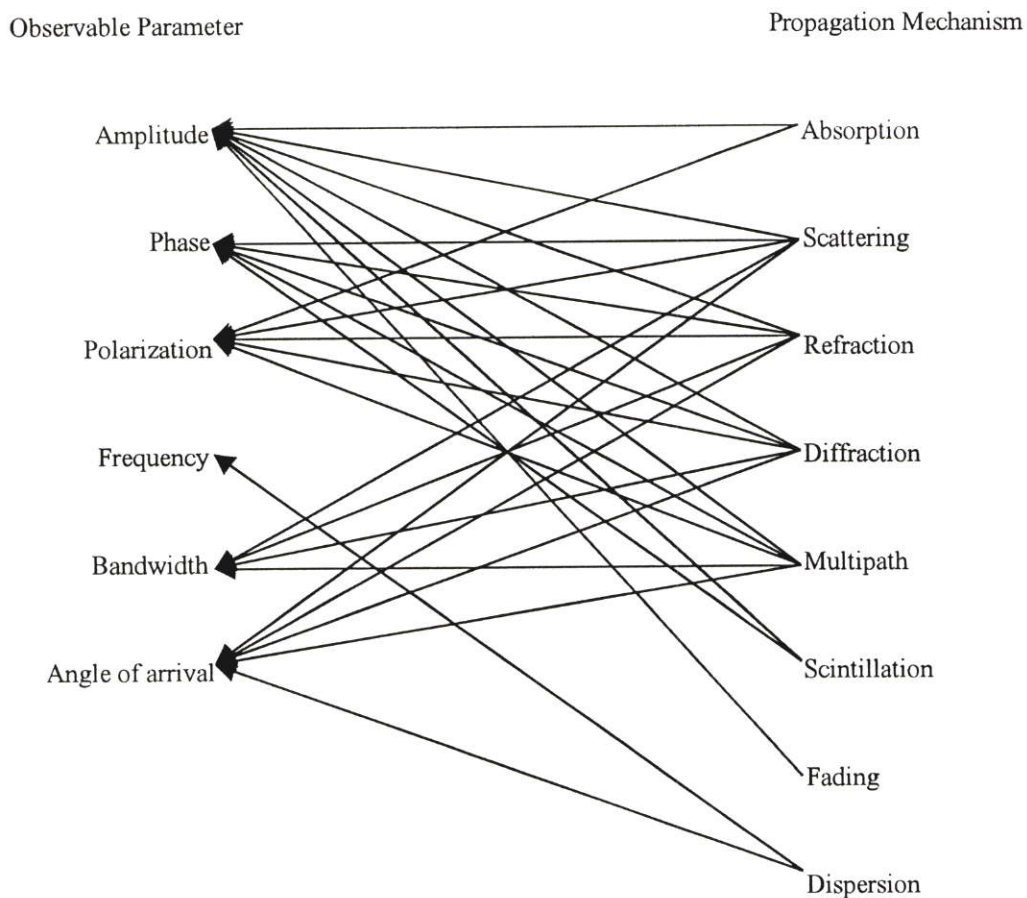
ซินทิลเลชัน (Scintillation) หมายถึง การแกว่งอย่างรวดเร็วของแอมพลิจูดหรือ เฟสของคลื่นวิทยุเนื่องจากความผิดปกติของอนุภาคเล็กๆกับเวลา ในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น

การจางหาย (Fading) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของคลื่นวิทยุ ที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา ในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น บ่อยครั้งที่ใช้สลับกันระหว่างการจางหายกับซินทิลเลชัน อย่างไรก็ตามโดยปกติการจางหายใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเวลาที่ช้ากว่าที่

มีคาบเวลาหลายวินาทีหรือนาที ขณะที่ ซินทิลเลชันใช้กับการเปลี่ยนแปลงที่เร็วกว่าที่มีคาบเวลาเป็นวินาที

การกระจายความถี่ (Frequency Dispersion) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของความถี่และเฟสข้ามแบนด์วิธของคลื่นวิทยุ เนื่องจากการกระจายตัวของตัวกลาง ตัวกลางที่กระจายตัวนี้เกิดจาก Permittivity, Permeability และ Conductivity ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่หรือทิศทางของคลื่น

หลายๆ กลไกที่ได้อธิบายนี้สามารถเกิดขึ้นในเส้นทางการส่งคลื่นได้พร้อมๆ กัน และเป็น การยากมากที่จะแยกว่ากลไกไหนหรือกลุ่มของกลไกใดที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ส่งออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกในการแพร่กระจายคลื่นต่างๆ และผลกระทบต่อพารามิเตอร์ของสัญญาณที่สามารถวัดได้ [1]

จากรูปกลไกในการแพร่กระจายคลื่นต่างๆที่กระทบต่อพารามิเตอร์ของสัญญาณที่สามารถวัดได้ในโครงข่ายการติดต่อสื่อสาร พารามิเตอร์ที่สามารถสังเกตหรือวัดได้ ในโครงข่ายต่างๆ ไปคือ แอมพลิจูด เฟส โพลาริซั ความถี่ แบนด์วิธ และมุมของคลื่นที่เข้ามาที่สายอากาศ กลไกในการแพร่กระจายคลื่นแต่ละตัวถ้าปรากฏขึ้นในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นจะมีผลกระทบต่อพารามิเตอร์ของสัญญาณ หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งพารามิเตอร์ ด้วยเหตุที่พารามิเตอร์ของสัญญาณทุกตัวยกเว้นความถี่สามารถถูกกระทบได้จากหลายกลไก โดยปกติจะเป็นไปไม่ได้ที่จะพิจารณาสภาพการแพร่กระจายคลื่นจากการสังเกต พารามิเตอร์เพียงอย่างเดียว ตัวอย่างเช่น ถ้าแอมพลิจูดของสัญญาณลดลง มีสาเหตุที่เป็นไปได้คือ จากการดูดกลืน การกระเจิง การหักเห การเลี้ยวเบน มัลติพาทซ์ ซิลทิลเลชัน การจางหาย หรือ ทุกอย่างรวมกัน[1-4]

2.1.5 ปัจจัยหลักของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในการสื่อสาร

ในระบบสื่อสารดาวเทียม คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นวิทยุ และชั้นบรรยากาศเป็นตัวสำคัญในการหาค่าผลกระทบของการแพร่กระจายคลื่น ดังนั้นจึงแบ่งความถี่ออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงความถี่สูงและช่วงความถี่ต่ำ ช่วงความถี่สูงผลกระทบหลักเกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และช่วงความถี่ต่ำที่ผลกระทบจะพิจารณาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

จุดแบ่งระหว่างช่วงความถี่ทั้งสองยังระบุไม่แน่นอน แต่โดยทั่วไปจะเกิดที่ประมาณ 3GHz (ความยาวคลื่น 10 เซนติเมตร) แต่ก็ยังมีการคาบเกี่ยวกันสำหรับบางสถานะของการแพร่กระจายคลื่น

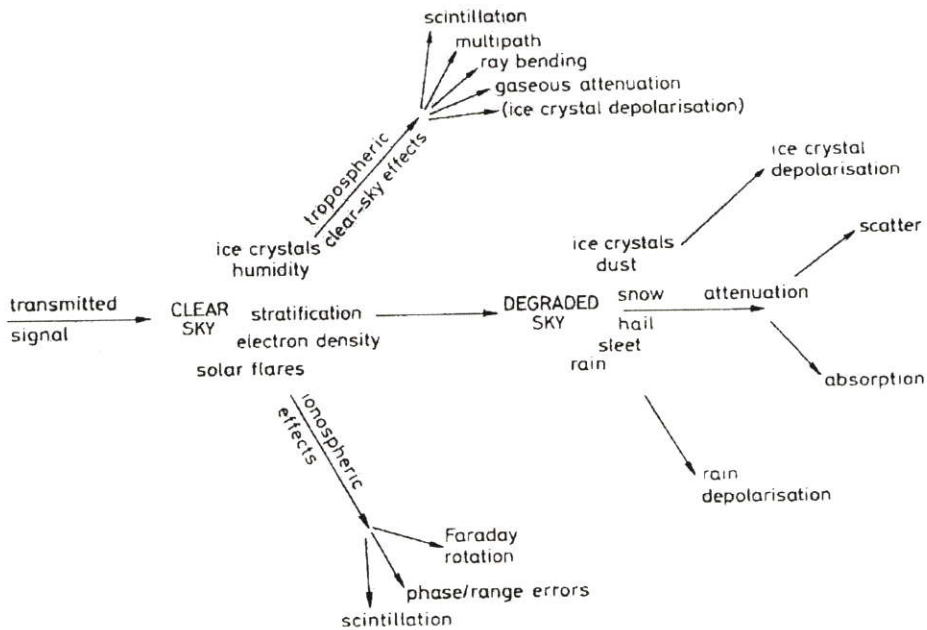
2.1.5.1 ปัจจัยของการแพร่คลื่นที่มีความถี่สูงกว่า 3GHz

ปัจจัยการแพร่กระจายคลื่นหลักๆ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการสื่อสารดาวเทียมในช่วงความถี่สูงกว่า 3GHz มีดังต่อไปนี้

การลดทอนเนื่องจากก๊าซ (Gaseous Attenuation) เป็นการลดทอนทางแอมพลิจูดของสัญญาณ สาเหตุจากส่วนประกอบของก๊าซในชั้นบรรยากาศของโลก การลดทอนเนื่องจากก๊าซเป็นกระบวนการการดูดกลืน และส่วนประกอบหลักที่สำคัญต่อความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารดาวเทียมคือ ออกซิเจน และไอน้ำ การลดทอนเนื่องจากก๊าซนี้จะเพิ่มขึ้นตามความถี่และขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความกดอากาศ และความชื้น

Hydrometeor Attenuation เป็น การลดทอนทางแอมพลิจูดของสัญญาณสาเหตุจาก Hydrometeor (ฝน, เมฆ, หมอก, หิมะ, เกล็ดน้ำแข็ง) ในเส้นทางการแพร่คลื่น Hydrometeor เกิดจากการควบแน่นของไอน้ำในชั้นบรรยากาศ และทำให้เกิดทั้งกระบวนการดูดกลืนและการแตกกระเจิง

Depolarization เป็นการเปลี่ยนโพลาไรซ์ของคลื่นวิทยุ สาเหตุจาก Hydrometeor และ Multipath Propagation คลื่นวิทยุจะมีโพลาไรซ์เปลี่ยนไปนั่นคือกำลังงานถูกเปลี่ยนจากโพลาไรซ์ที่ต้องการไปยังโพลาไรซ์ที่ไม่ต้องการ เป็นผลทำให้เกิดการรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณสองช่องที่มีโพลาไรซ์ต่างกัน



รูปที่ 2.3 กลไกที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่น [3]

สัญญาณรบกวน (Radio Noise) มีสัญญาณที่ไม่ต้องการหรือกำลังงานในช่วงความถี่ที่ใช้ในการสื่อสาร สาเหตุจาก แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติหรือเกิดจากมนุษย์ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนตามธรรมชาติหลักๆ ที่มีความถี่สูงกว่า 1GHz คือ ก๊าซในชั้นบรรยากาศ (ออกซิเจนและ ไอ้ น้ำ), ฝน, เมฆ, และการแพร่กระจายคลื่นจากพื้นผิวโลก แหล่งกำเนิดที่เกิดจากมนุษย์ประกอบด้วยโครงข่ายการสื่อสารดาวเทียมหรือการสื่อสารภาคพื้นดิน อุปกรณ์ไฟฟ้า และระบบเรดาร์

การเปลี่ยนมุมของคลื่นที่รับเข้ามา (Angle of arrival variation) การเปลี่ยนทิศทางการแพร่คลื่นของคลื่นวิทยุสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหในเส้นทางการแพร่คลื่น โดยทั่วไปจะเกิดเฉพาะกับสายอากาศขนาดใหญ่ (10 เมตร หรือมากกว่า) และความถี่สูงกว่า 10GHz เท่านั้น

Bandwidth Coherence จุดจำกัดสูงสุดของแถบความถี่ข้อมูลข่าวสารหรือ ความจุของช่องสัญญาณที่คลื่นวิทยุ สามารถรองรับได้ สาเหตุจากการกระจายตัวของคุณสมบัติของชั้นบรรยากาศ หรือจากการแพร่คลื่นในหลายทิศทาง (Multipath Propagation)

Antenna Gain Degradation การลดลงของเกนของสายอากาศรับ สาเหตุจาก แอมพลิฟายเออร์ และเฟส ไม่มีความสัมพันธ์กัน ฝนตกหนักสามารถทำให้เกิดผลกระทบนี้ได้ แต่เกิดกับ งานสายอากาศขนาดใหญ่ที่มีความถี่สูงกว่า 30GHz และมีเส้นทางการแพร่คลื่นผ่านฝนชุกชุก หรือ งานสายอากาศที่มีมุมเงยต่ำ

2.1.5.2 ปัจจัยของการแพร่คลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่า 3GHz

เฟลคเตอร์หลักของการแพร่กระจายคลื่น ที่มีผลกระทบต่อการสื่อสารดาวเทียมที่ ความถี่ที่สูงกว่าความถี่ที่สามารถผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้จนถึงความถี่ประมาณ 3GHz มีดังนี้

Ionospheric Scintillation คือการแกว่งอย่างรวดเร็วยิ่งของแอมพลิฟายเออร์และเฟสของ คลื่นวิทยุ สาเหตุจากความผิดปกติของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณขั้วโลก และช่วงพระอาทิตย์ขึ้นและพระอาทิตย์ตก

Polarization Rotation คือการหมุนของโพลาไรซ์ของคลื่นวิทยุ สาเหตุจาก ผลกระทบของคลื่นวิทยุกับกลุ่มอิเล็กตรอนในบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ภายใต้สนามแม่เหล็กโลก

Group Delay (or Propagation Delay) คือ การลดลงของความเร็วในการแพร่คลื่น วิทยุ สาเหตุจากมีกลุ่มอิเล็กตรอนอิสระในเส้นทางการแพร่คลื่น ซึ่งทำให้ความเร็วกลุ่มของคลื่น วิทยุลดลง

Multipath Fading and Scintillation คือการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิฟายเออร์และเฟส ของคลื่นวิทยุ สาเหตุจากสภาพภูมิประเทศและพื้นผิวที่ขรุขระ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญกับระบบสื่อสาร ภาคพื้นดินและระบบสื่อสารดาวเทียมที่มีมุมเงยต่ำ

Tropospheric Refraction and Fading มุมของคลื่นที่เข้ามาหรือแอมพลิฟายเออร์ของ คลื่นวิทยุเปลี่ยนไป สาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ การ หักเหและการจางหายจากบรรยากาศโทรโพสเฟียร์สามารถเกิดได้ทั้งความถี่ต่ำกว่าและสูงกว่า 3GHz แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดกับระบบที่มีมุมเงยต่ำ

Radio Noise จะเกิดเหมือนกับที่เกิดขึ้นที่ความถี่สูงกว่า 3GHz

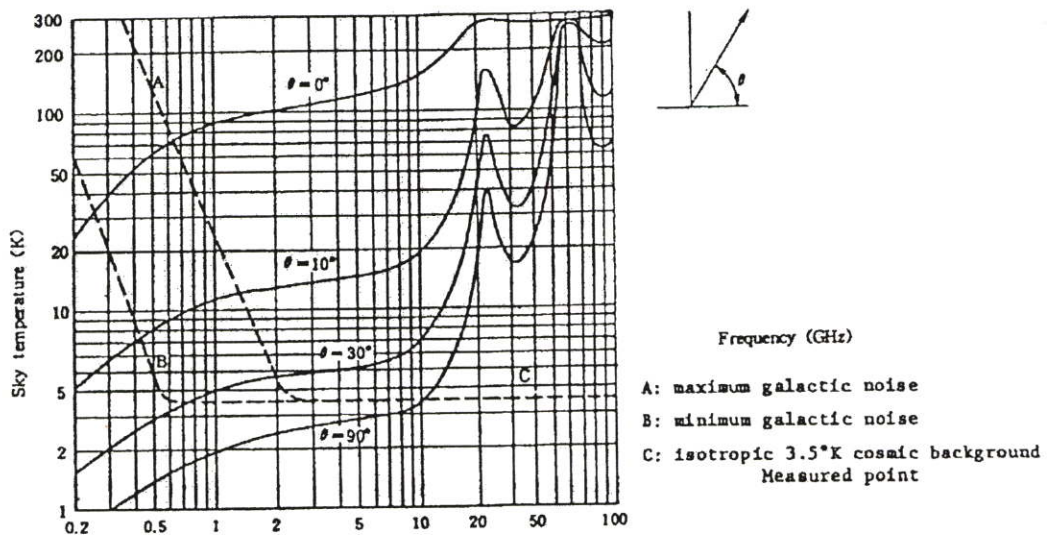
2.2 ย่านความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารดาวเทียม

2.2.1 ความถี่ที่ใช้ในระบบสื่อสารดาวเทียม

ปกติแล้วคลื่นวิทยุที่ส่งผ่านชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มผิวโลกอยู่ ถ้าใช้ความถี่ต่ำก็จะเกิดการ จางหายเนื่องจากการเกิดการดูดกลืนที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ถ้าความถี่ต่ำกว่าความถี่วิกฤตก็ จะเกิดการสะท้อนกลับที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แต่ถ้าความถี่สูงเกินไป เช่น สูงกว่า 10GHz

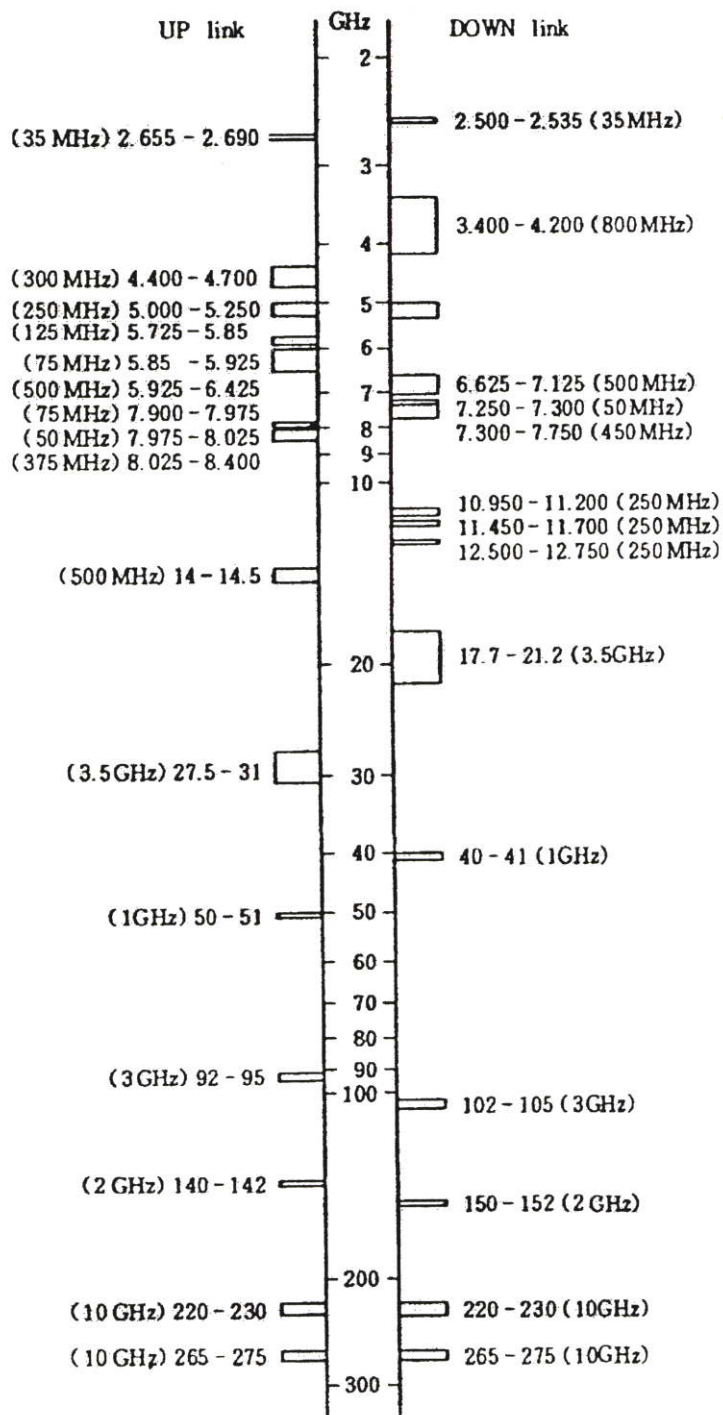
คลื่นก็จะถูกดูดกลืนโดยชั้นบรรยากาศของโลก และเกิดการลดทอนเนื่องจากก๊าซ เมฆ หมอก และ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกิดการลดทอนเนื่องจากฝน

ช่วงความถี่ที่มีผลต่อการลดทอนดังกล่าวข้างต้นค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับย่านอื่นๆ เรียกย่านความถี่นี้ว่า “Radio window” ทาง ITU-R หรือ CCIR เดิม เสนอแนะว่าย่านความถี่ 1-10GHz เป็นย่านความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารดาวเทียม แต่ในปัจจุบันนี้ย่านความถี่ในช่วง radio window นี้ไม่พอใช้งาน จำเป็นต้องใช้ย่านความถี่สูงกว่านี้ขึ้นไปอีก เช่น ดาวเทียมอินเทลแซทใช้ย่านความถี่ 14/11GHz ดาวเทียม CS-3 ของญี่ปุ่น ใช้ย่านความถี่ 30/20GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ Ka และมีการเปลี่ยนระบบการสื่อสารจากระบบแอนะล็อกไปเป็นระบบดิจิทัล

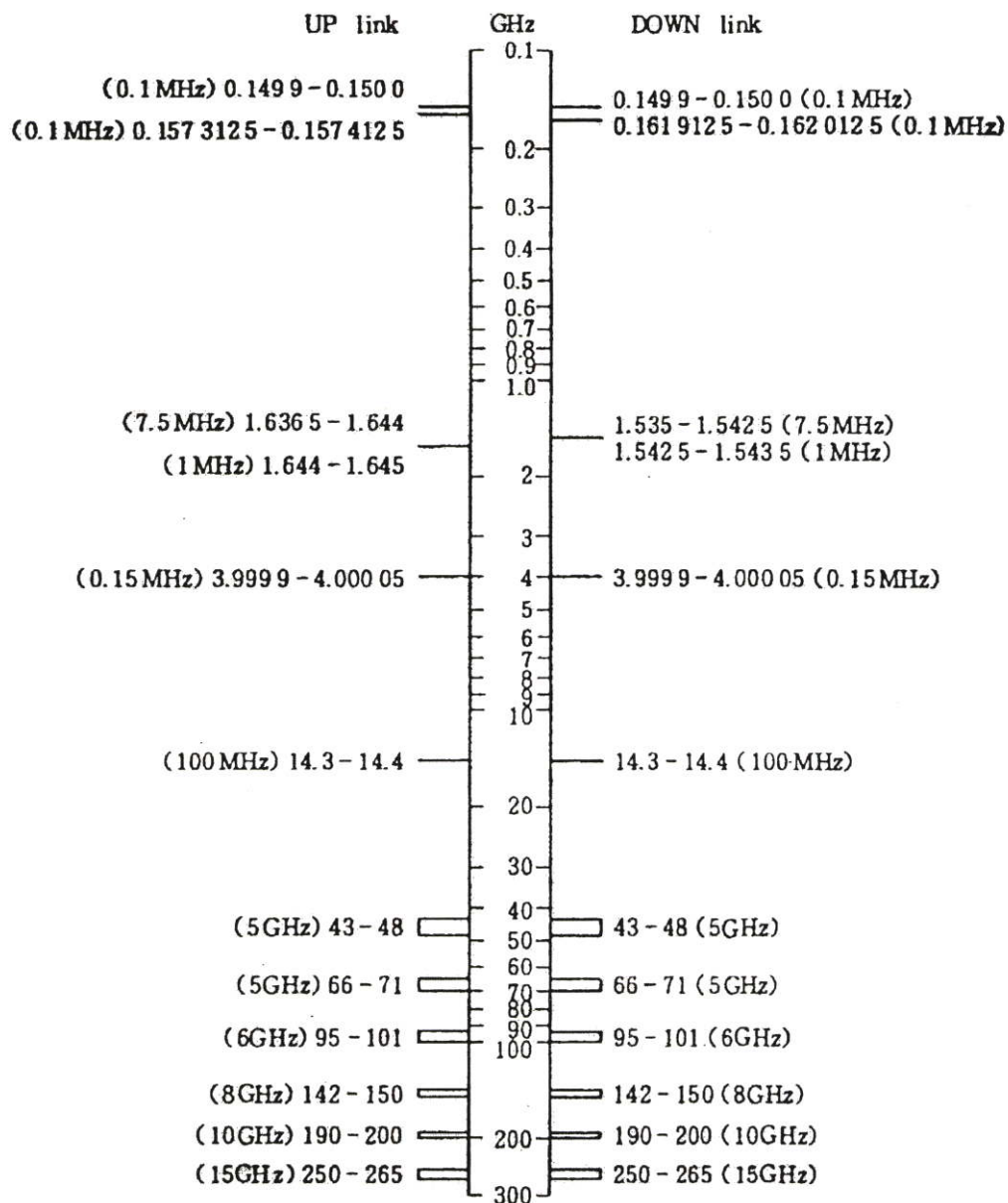


รูปที่ 2.4 Sky temperature เนื่องจาก galactic background noise และการดูดกลืนจากชั้นบรรยากาศ

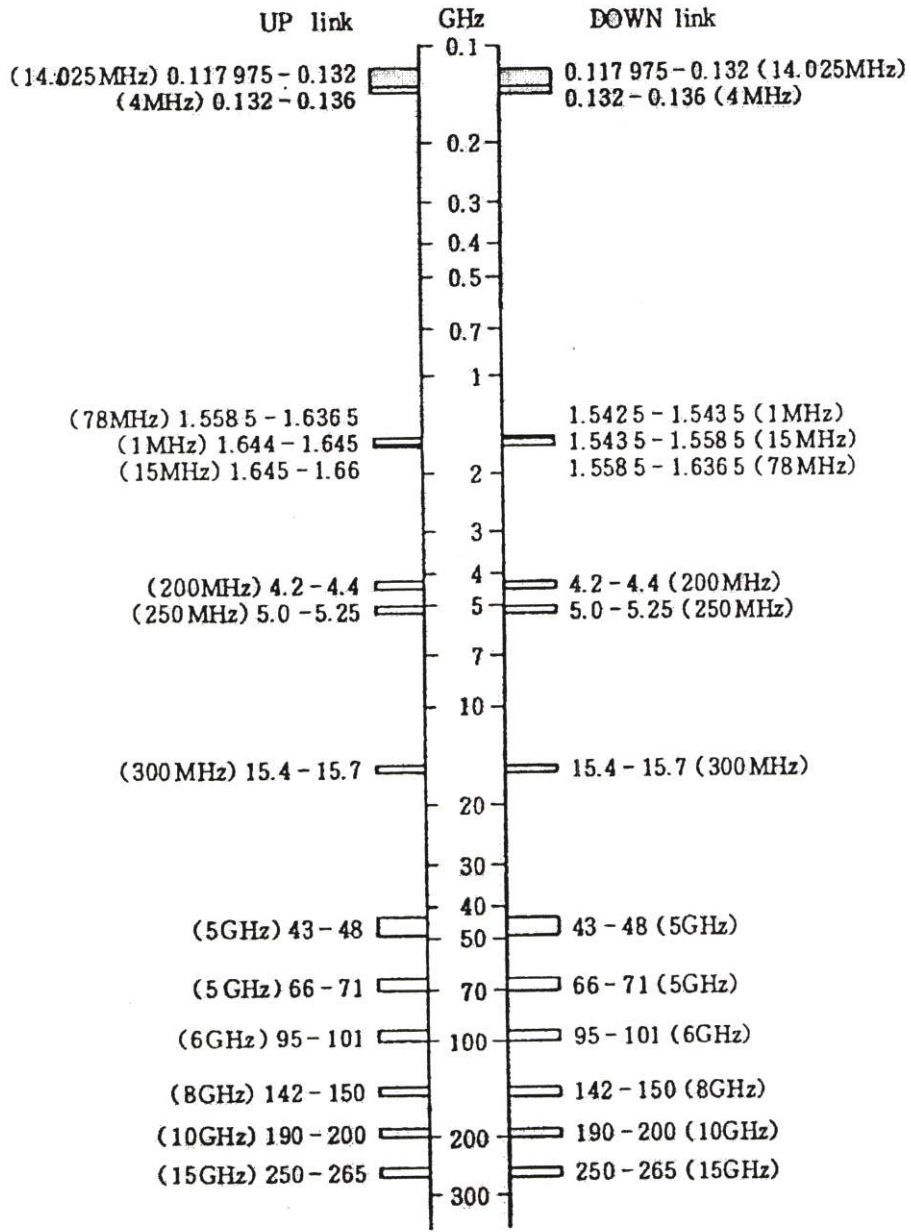
ได้มีการประชุมเกี่ยวกับการกำหนดย่านความถี่เพื่อใช้งานในกิจการต่างๆ หลายครั้ง เช่น Extra-ordinary Administrative Radio Conference (EARC) ในปี 2506 World Administrative Radio conference for Space Telecommunication (WARC-ST) ในปี 2514 General World Administrative Radio conference (WARC-G) ในปี 2522 สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) ได้กำหนดย่านความถี่สำหรับการสื่อสารไว้นจนถึงความถี่ 275GHz [5]



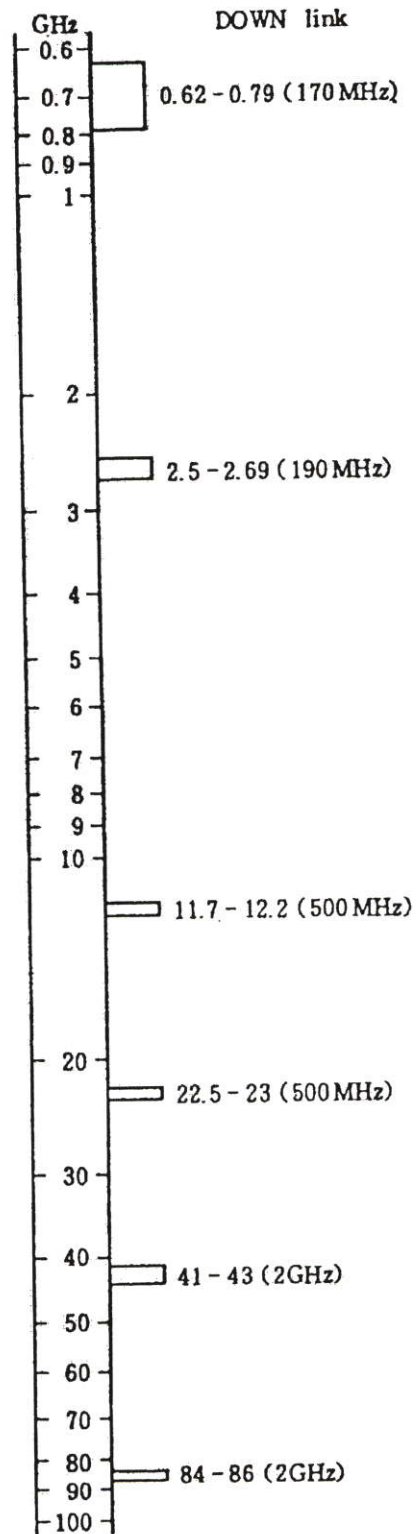
รูปที่ 2.5 ความถี่ที่ใช้สำหรับดาวเทียมแบบอยู่กับที่



รูปที่ 2.6 ความถี่ที่ใช้สำหรับดาวเทียมเพื่อกิจการเดินเรือทะเล



รูปที่ 2.7 ความถี่ที่ใช้สำหรับดาวเทียมเพื่อกิจการเดินอากาศ

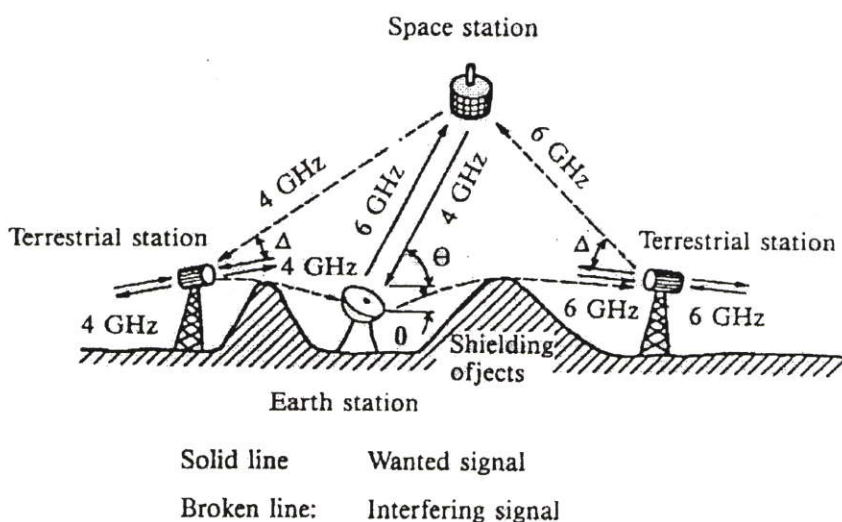


รูปที่ 2.8 ความถี่ที่ใช้สำหรับดาวเทียมเพื่อการถ่ายทอดวิทยุโทรทัศน์

2.2.2 การรบกวนซึ่งกันและกัน

เมื่อมีการใช้ระบบสื่อสารดาวเทียมเพิ่มมากขึ้น การรบกวนซึ่งกันและกันระหว่างระบบสื่อสารดาวเทียมและระบบไมโครเวฟภายในประเทศก็มีเพิ่มขึ้นเนื่องจากใช้ความถี่อยู่ในย่านเดียวกัน นอกจากนี้ระหว่างระบบสื่อสารดาวเทียมด้วยกันเองก็มีการรบกวนซึ่งกันและกันเช่นเดียวกัน

รูปที่ 2.9 แสดงการรบกวนซึ่งกันและกันที่เกิดขึ้นระหว่างดาวเทียมและระบบไมโครเวฟภายในประเทศที่ใช้ความถี่ร่วมกันในย่าน 4/6GHz ระหว่างสถานีไมโครเวฟ สถานีภาคพื้นดินและดาวเทียม [5]



รูปที่ 2.9 การรบกวนซึ่งกันและกันระหว่างระบบสื่อสารดาวเทียมและระบบไมโครเวฟภาคพื้นดิน

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นและเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องกดหรือลดพู่ข้าง (Side lobe) ของจานสายอากาศเพื่อลดการรบกวนซึ่งกันและกัน สถานีไมโครเวฟภาคพื้นดินต้องออกแบบเส้นทาง และตำแหน่งที่ตั้งเพื่อไม่ให้พู่คลื่นใหญ่ (Main lobe) ชี้ไปยังสถานีภาคพื้นดิน หรือชี้ไปยังดาวเทียม

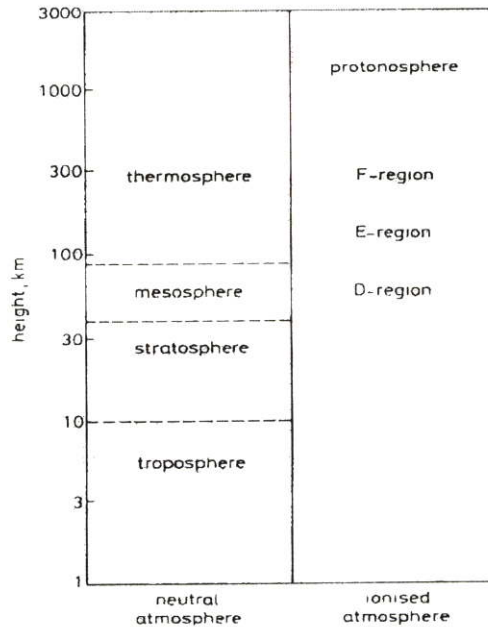
2.3 ชั้นบรรยากาศ

2.3.1 การแบ่งชั้นบรรยากาศ

โลกเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศของดวงอาทิตย์และการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของดวงอาทิตย์ทำให้เกิดผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศของโลกที่แตกต่างกันได้ อนุภาคที่ถูกปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์มีปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กโลก แรงกระทำจากอนุภาคเหล่านี้กดสนามแม่เหล็กด้านที่หันเข้าหาดวงอาทิตย์ของโลก และทำให้เกิด ปรากฏการณ์ที่ เรียกว่า “Bow shock” อนุภาคยัง

ทำให้เกิดการแตกตัวของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศของโลก ซึ่งทำให้เกิดชั้นบรรยากาศที่มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น

ชั้นบรรยากาศของโลกแบ่งออกในรูปของจำนวนของทรงกลมที่ครอบคลุมอยู่ด้วยความหนาที่กำหนดให้ และพื้นที่ ชั้นบรรยากาศแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักคือ ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลางทางไฟฟ้า และชั้นบรรยากาศที่มีอิเล็กตรอนอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 [3]



รูปที่ 2.10 การแบ่งชั้นบรรยากาศของโลก

ที่ความสูงต่ำกว่า 80 กิโลเมตร ก๊าซจะผสมกันดีและมีสัดส่วนส่วนประกอบที่เหมือนกัน ที่เรียกว่า บรรยากาศที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homosphere) ในตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมหลักของชั้นบรรยากาศนี้ ที่ความสูงสูงกว่า 80 กิโลเมตร ก๊าซจะแบ่งเป็นชั้นๆ ตามน้ำหนัก และเรียกชั้นนี้ว่า บรรยากาศที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterosphere) พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ 1.4 kW/m^2 และพลังงานนี้เป็นแรงขับของชั้นบรรยากาศที่เป็นกลางทางไฟฟ้า อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดชั้นบรรยากาศนี้ ไม่ได้คงที่หรือ ไม่ได้ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับความสูง การกระจายตัวต่างๆ ไปแสดงได้ดังรูปที่ 2.11

การที่ชั้นบรรยากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นผลให้เกิดการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ โดยไอโซนในชั้นบรรยากาศ และบริเวณนี้เป็นชั้นบรรยากาศที่เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้นเมื่อได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ ส่วนชั้นบรรยากาศ โทรโพสเฟียร์และ สตาร์โทสเฟียร์ จะมีการเปลี่ยนแปลงของความชื้น และชั้นของความแปรปรวน ซึ่งการทำความเข้าใจถึงสภาพภูมิอากาศจะช่วยให้การพิจารณาวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดกับการแพร่กระจายคลื่นผ่านดาวเทียมได้

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของอากาศในชั้นบรรยากาศใกล้กับระดับน้ำทะเล

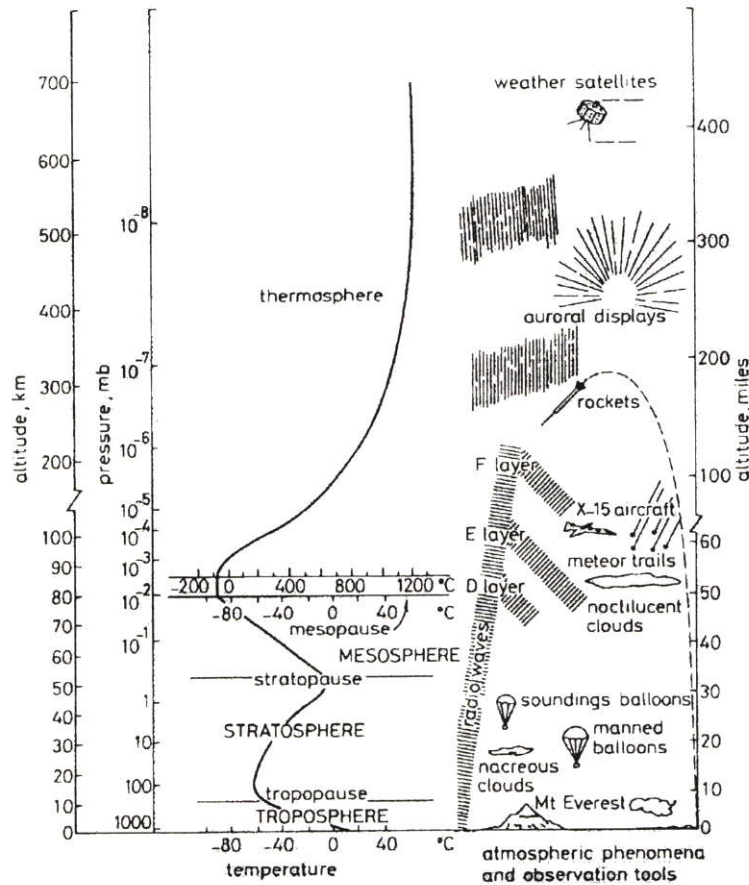
ก๊าซ	สัญลักษณ์	ส่วนผสม (% โดยปริมาตร)	น้ำหนักโมเลกุล
ไนโตรเจน	N ₂	78.084	28.0134
ออกซิเจน	O ₂	20.9476	31.9988
อาร์กอน	Ar	0.934	39.948
คาร์บอนไดออกไซด์	CO ₂	0.934	44.00995
นีออน	Ne	0.001818	20.183
ฮีเลียม	He	0.000524	4.0026
คริปทอน	Kr	0.000114	83.80
ซีนอน	Xe	0.0000087	131.30
ไฮโดรเจน	H ₂	0.00005	2.01594
มีเทน	CH ₄	0.0002	16.04303
ไนตรัสออกไซด์	N ₂ O	0.00005	44.0128
โอโซน	O ₃	ฤดูร้อน 0 ถึง 0.000007	47.9982
		ฤดูหนาว 0 ถึง 0.000002	47.9982
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	SO ₂	0 ถึง 0.0001	64.0628
ไนโตรเจนไดออกไซด์	NO ₂	0 ถึง 0.000002	46.0055
แอมโมเนีย	NH ₃	0 ถึงเล็กน้อย	17.03061
คาร์บอนมอนอกไซด์	CO	0 ถึงเล็กน้อย	28.01055
ไอโอดีน	I ₂	0 ถึง 0.000001	253.8088

2.3.2 รูปแบบของสภาพอากาศ

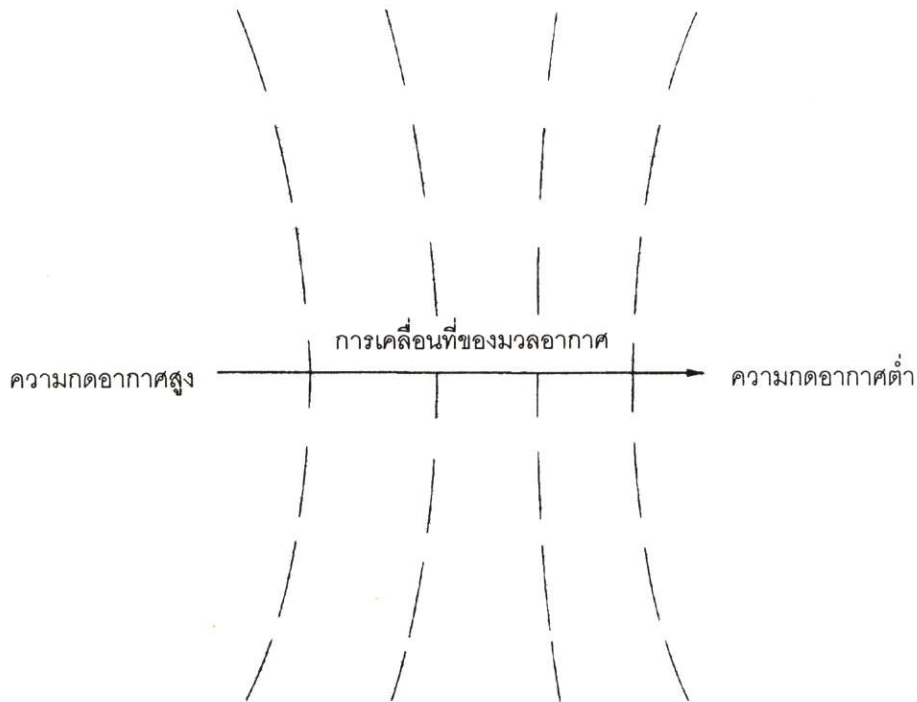
ถ้าพลังงานไฟฟ้าในชั้นบรรยากาศมีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอทั่วกันทั้งโลกก็จะไม่มีการเคลื่อนที่ภายในชั้นบรรยากาศ แต่พลังงานที่สะสมในชั้นบรรยากาศเกิดจากพลังงานที่มาถึงโลกจากดวงอาทิตย์ และมีการกระจายตัวของพลังงานที่ไม่สม่ำเสมอที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรจะรับพลังงานไว้จำนวนมาก ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าบริเวณขั้วโลก การไม่เท่ากันนี้ทำให้เกิด กลไกการเคลื่อนที่ของมวลอากาศสองอย่างคือการเคลื่อนที่ในแนวระนาบและการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

การเคลื่อนที่ในแนวระนาบ โดยปกติแล้ว มวลอากาศร้อนที่มีแรงดันอากาศเฉลี่ยสูงกว่ามวลอากาศเย็น ซึ่งเป็นผลให้มีอากาศไหลจากบริเวณที่มีแรงดันสูงไปยังบริเวณที่มีแรงดันต่ำ ในกรณีที่ไม่มีแรงจากภายนอกกระทำ ทิศทางการไหลจะเป็นดังในรูปที่ 2.12 คือจะเคลื่อนที่ตั้งฉาก

กับเส้นที่มีแรงดันคงที่ แต่ในความจริง การไหลนี้ไม่ได้เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของโลกทำให้เกิดแรงหมุนขึ้นมา แรงนี้รู้จักกันในชื่อของ ผลกระทบของคอริโอลิส (Coriolis effect) ทำให้เกิดการไหลของอากาศส่วนใหญ่ขนานกับเส้นแรงดันคงที่แทน และแรงหมุนนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกันระหว่างขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้[3]

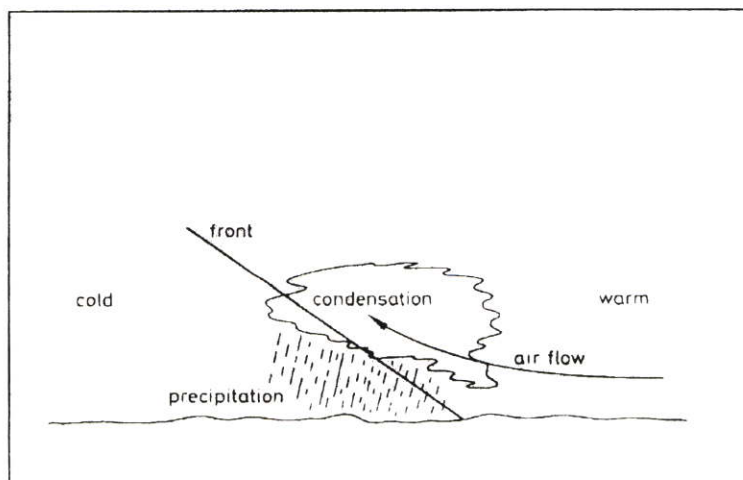


รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของความกดอากาศและอุณหภูมิของชั้นบรรยากาศโลก



รูปที่ 2.12 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศภายใต้สภาวะที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ

เมื่อมวลอากาศปะทะกัน อากาศที่เย็นกว่ามีแนวโน้มที่จะเคลื่อนสู่ด้านล่างของอากาศที่อุ่นกว่า ทำให้เกิดการแทรกและยกตัวของอากาศอุ่นขึ้น และผลจากการที่อากาศอุ่นถูกทำให้เย็นตัวลง จึงเกิดฝนดังแสดงในรูปที่ 2.13 ในบางครั้ง มวลอากาศเย็นคู่หนึ่งสามารถคักอากาศอุ่นระหว่างกลางได้ ซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีที่แนวปะทะอากาศเย็นเกิดรอบๆ แนวปะทะอากาศอุ่นเป็นผลให้มวลอากาศอุ่นถูกยกตัวขึ้นอย่างสมบูรณ์จากพื้นผิวโลก



รูปที่ 2.13 ภาคตัดแนวตั้งของแนวปะทะระหว่างมวลอากาศอุ่นและมวลอากาศเย็น

การเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง โดยทั่วไปการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของมวลอากาศประกอบไปด้วย แรงดันและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในมวลอากาศเพื่อชดเชยกับการเปลี่ยนแปลงของแรง ภายนอกที่มากระทำ เมื่อการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งเป็นไปอย่างช้าๆ จะเรียกกระบวนการนี้ว่า Dry adiabatic process เพราะว่าส่วนประกอบของน้ำในมวลอากาศนั้นจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของมวลอากาศต้องมีการชดเชยจากการเปลี่ยนแปลง ของปริมาตร การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อความสูงหรือ Lapse rate ของกระบวนการ แบบ Dry adiabatic มีค่าคงที่คือ $9.8^{\circ}/\text{km}$ ถ้าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งทำให้รูปแบบทางเคมีของส่วนประกอบ ของน้ำเปลี่ยนไป กระบวนการนั้นจะเรียกว่า Moist adiabatic ด้วยเหตุที่การควบแน่นของไอน้ำจะ ให้ความร้อนแฝงออกมา ทำให้มวลอากาศยังคงมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศรอบๆ Lapse rate ของ กระบวนการนี้จะน้อยกว่ากระบวนการแบบ Dry adiabatic และไม่เป็นค่าคงที่

2.4 ผลกระทบต่อการสื่อสารดาวเทียม

2.4.1 ผลกระทบทางเฟส

การทำนายการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในสภาพอากาศปกติเป็นการผสมกันหลายๆ อย่าง ของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสัญญาณ จึงเป็นการยากที่จะจดจำสาเหตุที่ทำให้สัญญาณที่สังเกตเปลี่ยน แปลง โดยทั่วไป จีนทิลเลชันที่เกิดกับเฟสนั้นไม่สำคัญเมื่อเทียบกับจีนทิลเลชันที่เกิดกับ แอมพลิจูดยกเว้นระบบที่มีมุมเงยต่ำมากๆ หรืองานสายอากาศมีขนาดใหญ่มากๆ แต่ในผลการ วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับเฟสในช่วงความถี่ 10-30GHz แสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากการ กระจายสามารถละเอียดได้ในกรณีของสภาพอากาศปกติ ในการสื่อสารหลายๆระบบมีการใช้ แบนด์วิธช่วงขณะที่มีความกว้างมากขึ้น เช่น แบนด์วิธปกติอยู่ที่ 72MHz แต่สามารถเปลี่ยนแบนด์วิธ ให้เป็น 100MHz ได้เพื่อรองรับการส่งข้อมูลความเร็วสูง ซึ่งจะมีผลกระทบทางเฟสได้เช่นกันแต่ สามารถละทิ้งได้ในกรณีที่แบนด์วิธช่วงขณะนั้นมีขนาดน้อยกว่า 1% ของความถี่คลื่นพาห์

2.4.2 ผลกระทบทางแอมพลิจูด

ผลกระทบต่อระบบที่เกิดในสภาพอากาศปกติต่อแอมพลิจูดสามารถแยกออกอย่างกว้างๆ ได้ 2 ประเภทคือ แบบช้ามากๆ และแบบที่เกิดเร็วๆ อย่างแรกจะเรียกว่า bulk effect และอย่างหลัง จะเรียกว่า short-term effect

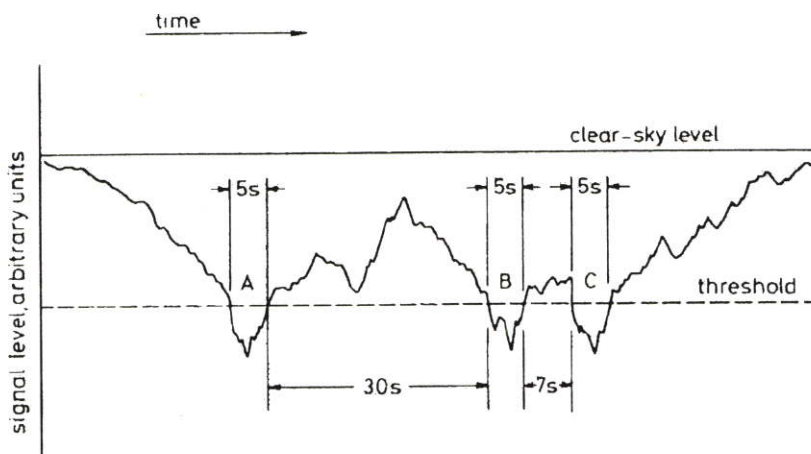
Bulk effect ส่วนที่โดนกระทบส่วนใหญ่ที่เกิดจากผลกระทบเหล่านี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับสภาพอากาศปกติ การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์เป็นเวลาสองสามชั่วโมง สามารถทำให้การเปลี่ยนแปลงประมาณ 1dB ในบางเส้นทางการแพร่คลื่นที่ความถี่สูงกว่า 10GHz โดยตัวของมันเองแล้วขนาดของระดับสภาพอากาศปกติที่เปลี่ยนแปลงไม่ใช่เรื่องสำคัญมากนัก แต่

ถ้าใช้ระบบที่มีการควบคุมกำลังส่งจะต้องเผื่อค่าพลังงานเข้าไปโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของสัญญาณที่รับเข้ามา ในระบบนี้จะมีผลกระทบที่ค่อนข้างสำคัญทีเดียว เช่น โดยปกติค่าอัตราการส่วนการลดทอนเนื่องจากฝนในย่านความถี่ 14GHz และ 11GHz คือ 1.45 ถ้ามีฝนตกและทำให้สัญญาณที่รับเข้ามามีการลดทอนลงไป 3dB และถ้าคำนวณค่าการลดทอนที่เกิดกับความถี่ 14GHz ก็จะเป็น 4.35dB ซึ่งควรจะเพิ่มกำลังส่งขึ้นอีก 4.35dB เช่นกันตามทฤษฎีการชดเชยการลดทอนเนื่องจากฝน อย่างไรก็ตาม ถ้าการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นบรรยากาศ (ในช่วงที่เกิดฝน) เป็นเหตุให้ระดับเฉลี่ยของสัญญาณรับลดลง 0.5dB แทนที่อุปกรณ์จะแสดงค่าจางหายของสัญญาณแค่ 3dB แต่กลับเป็น 3.5dB แทน ดังนั้นควรเพิ่มกำลังส่งเป็น 5.075dB โดยให้มีค่าผิดพลาดอยู่ที่ประมาณ 1dB

Short-term effect ชินทิลเลชั่นที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์การจากผลกระทบที่ไม่มีการดูดกลืน เช่น ระดับเฉลี่ยของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับค่าผิดพลาดของแอมพลิจูด ไม่เหมือนกับผลกระทบที่เกิดจากการเดินทางของคลื่นจากหลายทิศทาง แต่เป็นพฤติกรรมที่เกิดจากการกระจายตัวแบบลาดเอียง ในระบบการวัดชินทิลเลชั่นที่มีมุมเงยค่าชินทิลเลชั่นที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะมีผลกระทบที่ไม่ดีต่อระบบที่มีการควบคุมกำลังส่งถ้าเวลาตอบสนองของระบบช้ามาก อัตราการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดจากชินทิลเลชั่นที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะลดลงตามมุมเงยที่ลดลง จากสถิติที่ได้มีการรายงานมาโดย Strickland [3] แสดงค่าอัตราการจางหายที่สูงกว่า 10dB/s มีอยู่ประมาณ 0.03% ของเวลาทั้งหมด โดยปกติชินทิลเลชั่นที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มีค่าอัตราการจางหายประสิทธิผลไม่เกิน 1dB/s ยกเว้นในกรณีที่รุนแรงมากๆ ซึ่งเกิดไม่บ่อยนัก อัตราการเปลี่ยนแปลงระดับนี้อยู่ในช่วงเวลาที่ระบบควบคุมส่วนใหญ่สามารถตอบสนองได้ แต่อย่างไรก็ตามขนาดของชินทิลเลชั่นที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์สามารถสร้างปัญหาให้แก่เครื่องรับดาวเทียมได้ ด้วยเหตุที่โดยปกติชินทิลเลชั่นที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะรวมอยู่กับการลดทอนเนื่องจากฝน และส่วนเพื่อที่เพิ่มขึ้นต้องสามารถรองรับการลดลงของสัญญาณที่เกิดจากชินทิลเลชั่นที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ได้ การเปลี่ยนแปลงของโทรโพสเฟียร์ชินทิลเลชั่นทั้งการเปลี่ยนแปลงคาบรายวัน และการเปลี่ยนแปลงคาบฤดูมีความสำคัญ ด้วยเหตุที่หลายๆ ระบบถูกออกแบบจากหลักเกณฑ์ของเดือนที่รุนแรงที่สุด (worst month) จากข้อมูลที่มีอยู่ของโทรโพสเฟียร์ชินทิลเลชั่น แสดงค่าอัตราส่วนของเดือนที่แย่ที่สุดต่อค่าเฉลี่ยตลอดปี มีค่าที่เหมือนกับค่าอัตราส่วนที่ได้จากการคำนวณของการลดทอนเนื่องจากฝน

ระบบการสื่อสารที่เป็นสากลจะถูกดูแลโดยวิธีการเชื่อมต่อและคำแนะนำที่ตั้งไว้ โดยการยอมรับขององค์กร CCIR และ CCITT สำหรับบริการ fixed satellite ที่ให้เทคนิคการส่งระบบดิจิทัล คำแนะนำที่ใช้คือ Recommendation G.821 ซึ่งนิยามที่ใช้ค่อนข้างซับซ้อน แต่รูปที่ 2.14 ใช้อ้างอิงนิยามของคำแนะนำนี้ได้ ในการวัดการลดทอนทำโดยการรวมเวลาทั้งหมดที่ต่ำกว่าค่าระดับ

ที่ตั้งไว้ ดังในกรณีของรูปที่ 2.14 นี้จะเท่ากับ 15 วินาที แต่ในคำแนะนำมีกฎ 10 วินาทีอยู่และกฎนี้ นิยามไว้ว่า สำหรับระบบที่เป็นดิจิทัลบอกไว้ว่าระยะเวลาการจางหาที่น้อยกว่า 9 วินาที จะไม่ถือเป็น unavailable time และ Recommendation G.821 ฉบับปรับปรุงบอกว่าช่วงเวลาที่น้อยกว่า 9 วินาทีนี้สัญญาณต้องกลับคืนมาอยู่เหนือค่าที่ตั้งไว้และต้องอยู่เหนือระดับที่ตั้งไว้เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 10 วินาที ดังในรูปที่ 2.14 การจางหาย A นั้นเป็นไปตามกฎเกณฑ์ที่ปรับปรุงแล้ว แต่การจางหาย B นั้นไม่ใช่ ในกรณีของการจางหาย B ช่วงเวลาของการจางหายคือเวลาที่ทั้งหมดที่ต่ำกว่าระดับที่ตั้งไว้จนกว่าสัญญาณกลับมามีค่าระดับที่ตั้งไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 10 วินาที ดังนั้น การจางหาย B และ C บวกกับเวลาระหว่างการจางหายทั้งสอง จึงถูกนับเป็น unavailable time ผลการคำนวณจาก 2 แบบของ G.821 ในการหาเวลาการจางหายได้ unavailable time เป็น 0 วินาที (ตามกฎ 10 วินาที) และ 17 วินาที (G.821 ฉบับปรับปรุง)



รูปที่ 2.14 ความแตกต่างของ available time และ unavailable time ในการคำนวณทางสถิติของการจางหายของ Recommendation G.821

จากรูป A, B และ C เป็นการจางหายที่มีคาบเวลา 5 วินาทีเท่ากัน หลังจากการจางหาย A สัญญาณกลับมามีค่าระดับที่ตั้งไว้เป็นเวลานานกว่า 10 วินาทีดังนั้นการจางหาย A จึงไม่ถือเป็น unavailable time ในสถิติการจางหายสะสม ส่วนอีกช่วงหนึ่งนั้นสัญญาณกลับมามีค่าระดับที่ตั้งไว้ไม่ถึง 10 วินาที ดังนั้นการจางหาย B C บวกกับช่วงเวลาระหว่างการจางหายทั้งสองจึงถูกนับเป็น unavailable time

2.4.3 ผลที่เกิดกับระบบ

สาเหตุหลักๆ เหล่านี้เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์สถานีภาคพื้นดิน สถานีภาคพื้นดินที่ใช้ระบบติดตามดาวเทียมสามารถที่จะปรับมุมจานสายอากาศให้ชี้ไปยังดาวเทียมได้ตลอดเวลา แต่ในขณะที่มีโทรโพสเฟียร์ซินทิลเลชันอย่างรุนแรง สามารถทำให้ความแม่นยำของระบบการติดตามดาวเทียมลดลงไปได้อย่างมาก ในบางกรณีต้องทำการปิดกลไกการติดตามดาวเทียมที่ระดับที่ได้ตั้งไว้เพื่อป้องกันการการหลุดหายของสัญญาณเนื่องจากงานสายอากาศชี้ผิดพลาด

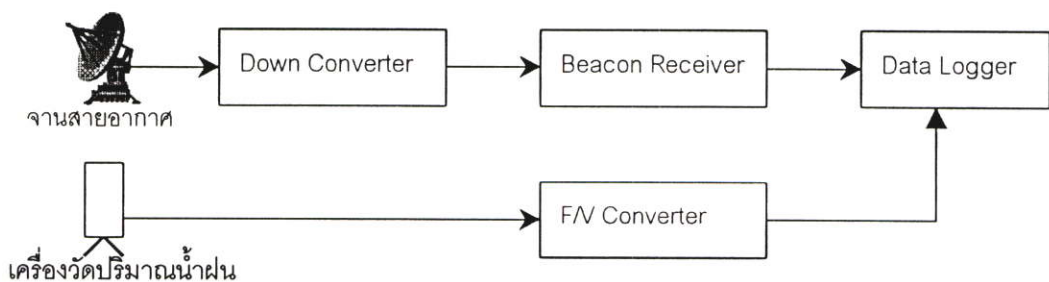
บทที่ 3

ผลกระทบของสัญญาณดาวเทียมจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

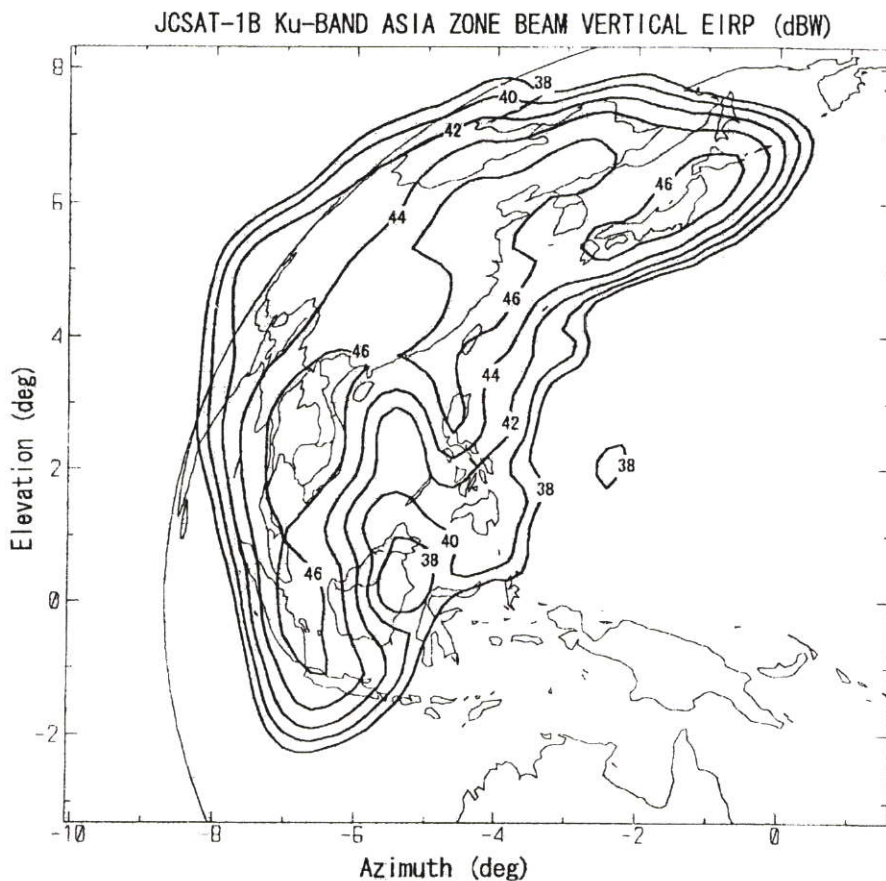
ในการสื่อสารผ่านดาวเทียมในย่านความถี่ Ku ผลกระทบหลักเกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ซึ่งเราได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ในบทนี้จะกล่าวถึงผลกระทบจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์บางประการที่ได้จากการทดลอง คือ ซินทิลเลชัน และการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมเนื่องจากฝน

3.1 อุปกรณ์และวิธีที่ใช้ในการทดลอง

ระบบการวัดการลดทอนสัญญาณดาวเทียมเนื่องจากฝนนี้แสดงดังในรูปที่ 3.1 โดยทำการวัดระดับสัญญาณนำร่อง (Beacon Signal) จากดาวเทียม JCSAT-1B โดยใช้จานสายอากาศขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.80 เมตร ผ่านอุปกรณ์ภายนอก (Out Door Unit) มายังเครื่องรับสัญญาณนำร่อง ความแรงของสัญญาณที่รับมาได้จะถูกเปลี่ยนเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนี้ต่อไปยังเครื่องบันทึกสัญญาณไฟฟ้าและเก็บผลไว้ในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล รับสัญญาณนำร่องจากดาวเทียม JCSAT-1B ที่ตำแหน่ง 150 องศาตะวันออก มุมเงยของจานสายอากาศ 32 องศา รับสัญญาณนำร่องที่มีโพลาไรซ์แนวตั้ง มีค่า EIRP ที่กรุงเทพฯ เท่ากับ 46.7dBW หรือดังแสดงในรูปที่ 3.2 ส่วนทางด้าน การวัดอัตราการตกของฝน ทำการวัดอัตราการตกของฝน 2 ตำแหน่ง ที่แรกคือที่เดียวกับจานสายอากาศใช้อุปกรณ์วัดฝนแบบ Tipping Bucket ขนาด 0.5 มิลลิเมตรแล้วแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อบันทึกในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเช่นเดียวกับค่าระดับสัญญาณนำร่อง ส่วนตำแหน่งที่ 2 ทำการวัดอัตราการตกของฝนในแนวการแพร่คลื่นที่ระยะทาง ประมาณ 1880 เมตร ห่างจากจานสายอากาศ ดังรูปที่ 3.3 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนตัวที่สองใช้แบบ Tipping Bucket ขนาด 0.5 มิลลิเมตรเช่นกัน และเก็บค่าจำนวนฝนที่ตกในรูปของ มิลลิเมตรต่อนาที



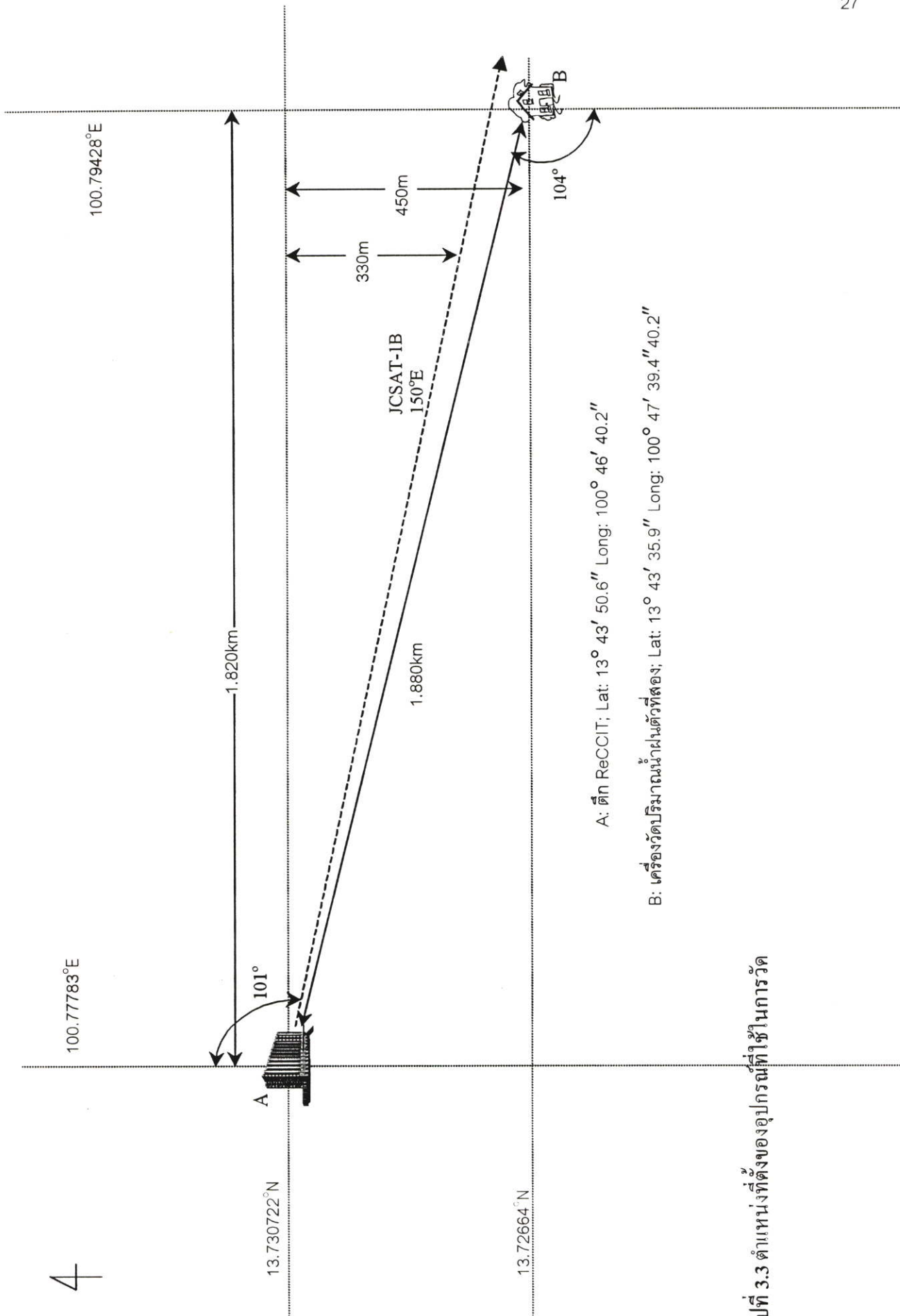
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบการวัด



รูปที่ 3.2 พื้นที่ครอบคลุมของ JCSAT-1B

ตารางที่ 3.1 ค่าระดับสัญญาณที่สถานีภาคพื้นดิน

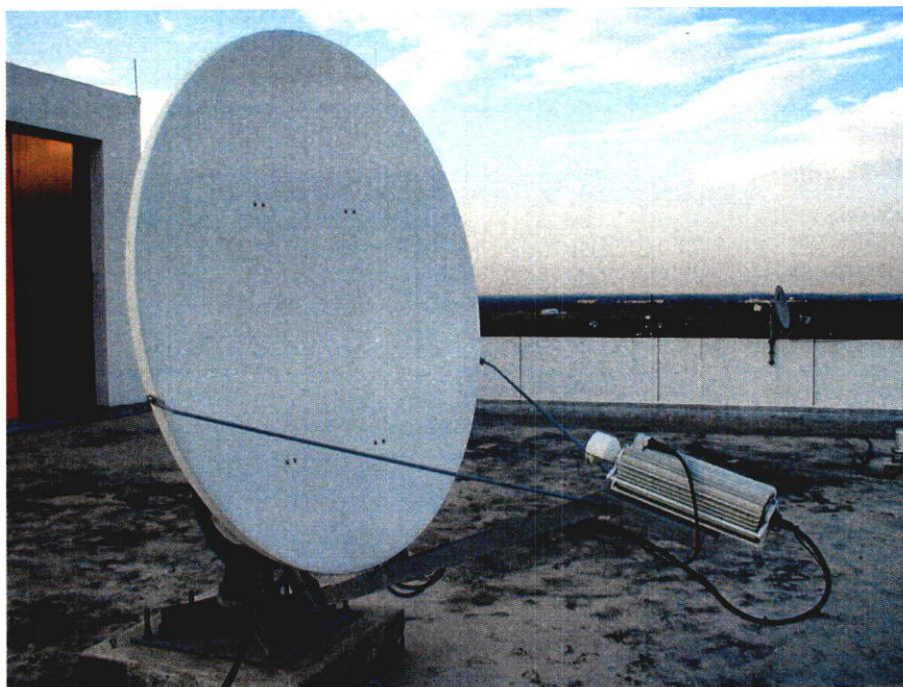
สถานี	KMITL กรุงเทพฯ 13.7°N 100.8°E
ความถี่สัญญาณนำร่อง	12747.5MHz
ความถี่สัญญาณนำร่องหลังจากผ่าน IDU	1447.5MHz
มุมกวาด	101°
มุมเงย	32°
ค่า EIRP ของดาวเทียม	46.7 dBW
ค่า การสูญเสียในอวกาศว่าง	-206 dB
อัตราขยายของจานสายอากาศ	45.7 dB
อัตราขยายของอุปกรณ์ ODU	68.4 dB
ค่าการสูญเสียในสายส่ง	-13 dB
ระดับสัญญาณที่อินพุทของ IDU	-58.2 dB



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

3.1.1 งานสายอากาศและอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ

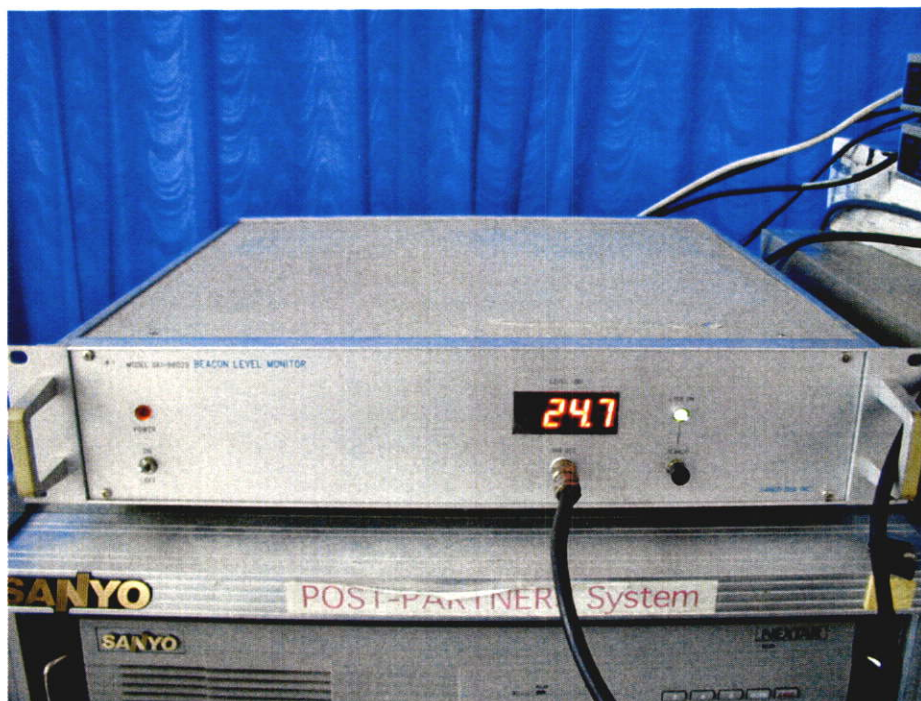
งานสายอากาศที่ใช้ในการทดลองเป็นงานสายอากาศแบบ ออฟเซตพาราโบลา มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.80 เมตร มีอัตราขยาย 45.4 dB ที่ความถี่รับ 12.5GHz และ 46.2dB ที่ความถี่ส่ง 14.25GHz เกณฑ์ขยาย 66dB Noise Temperature 140 K ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สำหรับอุปกรณ์ ODU และ 27 K สำหรับงานสายอากาศที่มุมเงย 40 องศา



รูปที่ 3.4 งานสายอากาศและอุปกรณ์ขยายสัญญาณรบกวนต่ำที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 เครื่องรับสัญญาณนำร่อง

ในการทดลองนี้ใช้เครื่องรับสัญญาณนำร่องของดาวเทียม ระดับสัญญาณที่รับได้ถูกแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงนี้ถูกนำไปบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ด้วยคาบเวลา 1 นาที โดยทำการสุ่มข้อมูลทุกวินาทีแล้วเฉลี่ยข้อมูลที่ได้ในช่วงเวลา 1 นาที เครื่องรับสัญญาณนำร่องที่ใช้แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 และรายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.2 ผลที่ได้จากการปรับเทียบโดยการป้อนความถี่ 1447.5MHz จากเครื่องกำเนิดความถี่ และเปลี่ยนค่ากำลังเอาต์พุต จะได้ดังรูปที่ 3.6 สมการที่ได้จากการปรับเทียบใช้ในการแปลงแรงดันเอาต์พุตของเครื่องรับสัญญาณนำร่องให้เป็นค่าสัญญาณที่รับเข้ามาในรูปของเดซิเบล โดยมีสมการคือ $y=9.656556x-96.122524$ เมื่อ y คือ กำลังที่อินพุตของเครื่องรับ มีหน่วยเป็น dBm และ x คือ เอาต์พุตโวลต์เดจของเครื่องรับสัญญาณนำร่อง



รูปที่ 3.5 เครื่องรับสัญญาณนำร่องที่ใช้ในการทดลอง

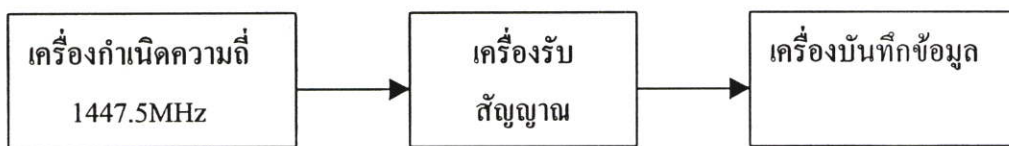
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของเครื่องรับสัญญาณนำร่อง

ความถี่ขาเข้า	1447.5MHz
อินพุท อิมพีแดนซ์	50 โอห์ม VSWR \leq 1.3
แบนด์วิธ	400 เฮิรตซ์
แรงดันเอาต์พุท	1V \pm 0.1V/10dB
ออฟเซตของแรงดันเอาต์พุท	-100dB~-80dBm Input /0V Output

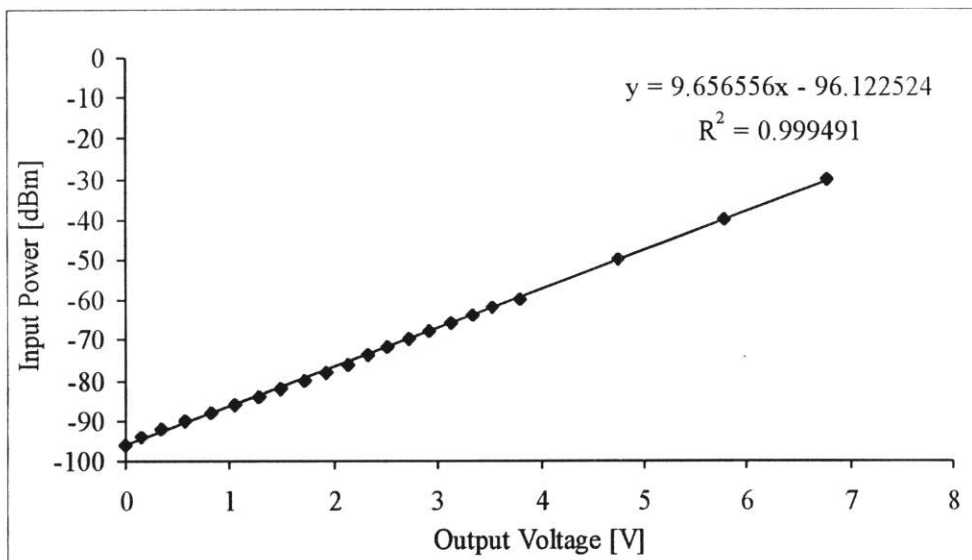
3.1.3 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ

อุปกรณ์บันทึกสัญญาณแบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่บันทึกสัญญาณดาวเทียม และบันทึกสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน ซึ่งแบ่งย่อยออกเป็นอีกสองส่วนคือ ส่วนที่อยู่ติดกับงานสายอากาศรับ และส่วนที่อยู่ที่ระยะประมาณ 2 กิโลเมตรจากงานสายอากาศในแนวเส้นทางการแพร่คลื่น อุปกรณ์บันทึกสัญญาณนำร่องและปริมาณน้ำฝนที่อยู่ติดกับงานสายอากาศประกอบด้วยอุปกรณ์ส่งข้อมูลที่มีอินพุทเป็นแรงดันไฟตรง ที่ได้จากเอาต์พุทของเครื่องรับสัญญาณนำร่อง และแรงดันไฟตรงของเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนหลังจากผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณจากจำนวนพัลส์ให้เป็นแรงดันไฟตรงแล้ว นอกจากอุปกรณ์ส่งข้อมูลแล้ว ยังประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ส่งข้อมูล โปรแกรมที่ใช้คือโปรแกรม Labview ซึ่งเก็บข้อมูลรายนาทิตลอด 24 ชั่วโมง และแยกเก็บข้อมูลออกเป็นแต่ละวัน

ส่วนอุปกรณ์เก็บข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ระยะ 2 กิโลเมตรจากงานสายอากาศในเส้นทางการแพร่คลื่น เป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการเก็บข้อมูล และติดตั้งไว้ในตัวเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนเลย ข้อมูลที่เก็บจะเป็นปริมาณของฝนที่ตกในแต่ละนาที่ และบันทึกเฉพาะนาที่ที่มีฝนตก ความสามารถในการเก็บข้อมูลสามารถเก็บได้สูงสุด 5000 นาที่ หรือเท่ากับ 2500 มิลลิเมตร แล้วจะหยุดเก็บข้อมูลจนกว่าจะมีการนำข้อมูลออกไปจากหน่วยความจำ นอกจากนี้ยังได้ทำการบันทึกข้อมูลฝนจากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนอีกประเภทหนึ่ง คือ แบบ นับหยดฝน (Rain Drop Type Rain Gauge) อุปกรณ์นี้ใช้หลักการของหยดน้ำที่ผ่านชั้นของน้ำมัน ซึ่งหยดน้ำที่ผ่านน้ำมันนั้น เท่ากับ 0.0083 มิลลิเมตรต่อหยด (พัลส์) หรือ 0.5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



(ก)วิธีการในการปรับเทียบ



(ข)สมการที่ได้จากการปรับเทียบ

รูปที่ 3.6 การปรับเทียบและทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของเครื่องรับสัญญาณนำร่อง

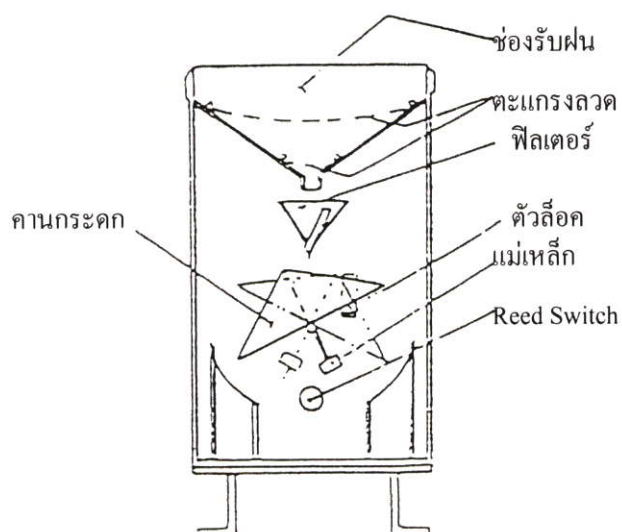
3.1.4 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณน้ำฝนในงานวิจัยนี้มี สอง ชนิดคือ แบบ Tipping Bucket Type มีขนาดของ Bucket เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และ แบบ Rain Drop Type: RD ที่มีความละเอียดอยู่ที่ 0.0083 มิลลิเมตรต่อน้ำหนึ่งหยดที่ผ่านตัวเซ็นเซอร์ด้วยปากกรับน้ำฝนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร แต่อุปกรณ์นี้มีข้อจำกัดอยู่ในกรณีที่อัตราการตกของฝนสูงมากๆ ค่าสูงสุดที่อุปกรณ์ตัว

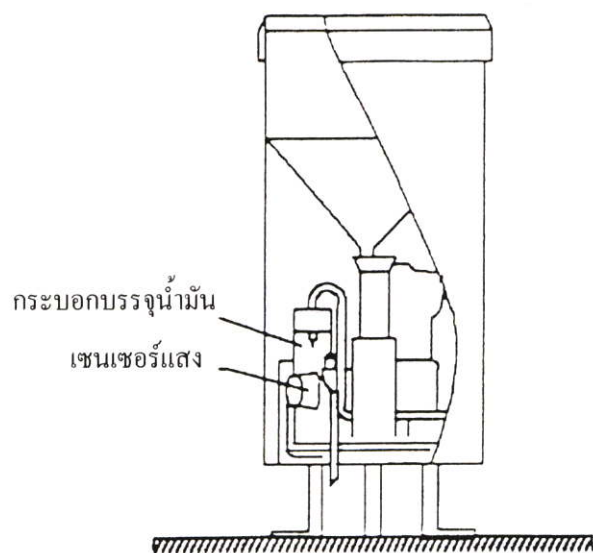
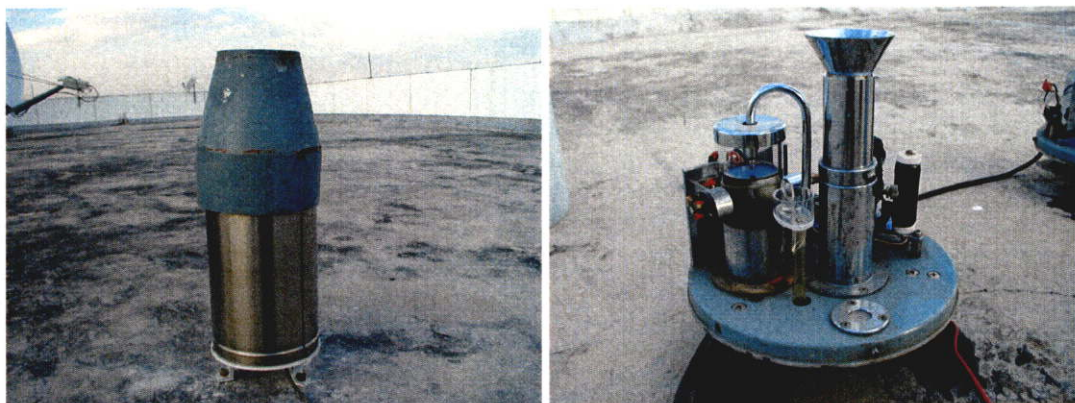
นี้วัดได้คือ 14 หยดต่อวินาที ก่อนที่หยดน้ำที่ผ่านชั้นน้ำมันจะเป็นสายต่อเนื่องกัน ด้วยปากรับน้ำฝนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร หรือที่อัตราการตกของฝนประมาณ 420 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง แต่จากข้อจำกัดของอุปกรณ์แปลงสัญญาณพัลส์ให้เป็นแรงดันไฟตรงจึงทำให้วัดค่าอัตราการตกของฝนสูงสุดได้ประมาณ 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ในช่วงเวลาการเก็บข้อมูล 1 นาที ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงวิธีการเก็บข้อมูลและอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน โดยการทำให้ปากรับน้ำฝนมีพื้นที่ลดลงครึ่งหนึ่ง และลดเวลาในการนับลงเหลือ 10 วินาที ด้วยการปรับปรุงนี้จะทำให้สามารถวัดอัตราการตกของฝนที่สูงๆ ได้ ซึ่งจากที่ผู้วิจัยคำนวณค่าสูงสุดที่วัดได้จะอยู่ที่ ประมาณ 840 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Tipping Bucket ที่ติดตั้งที่งานสาขอากาศ และที่ระยะประมาณ 2 กม. ในแนวแพร์คลีน และโครงสร้างภายในอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน



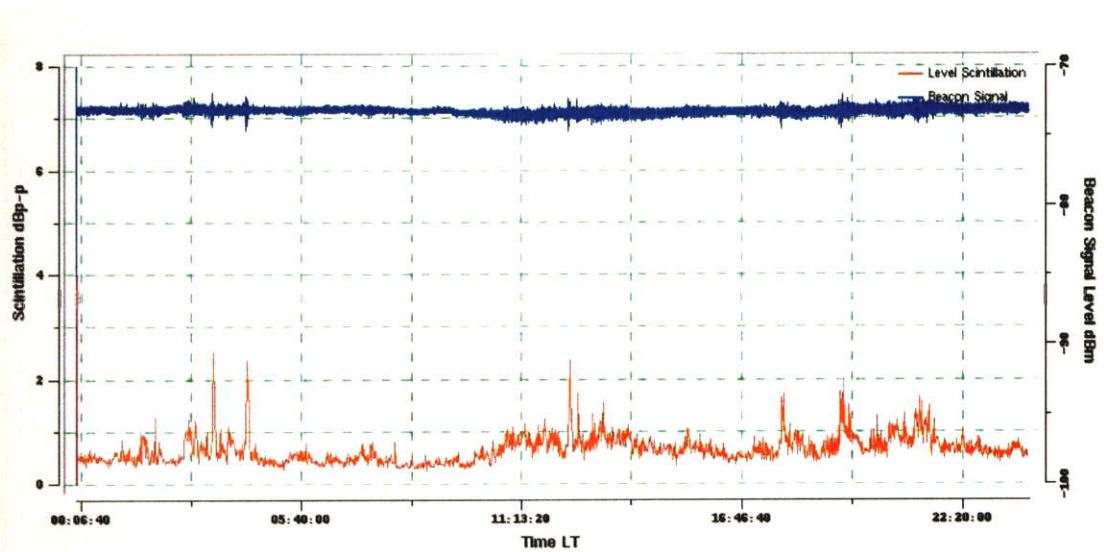
รูปที่ 3.7 (ต่อ)



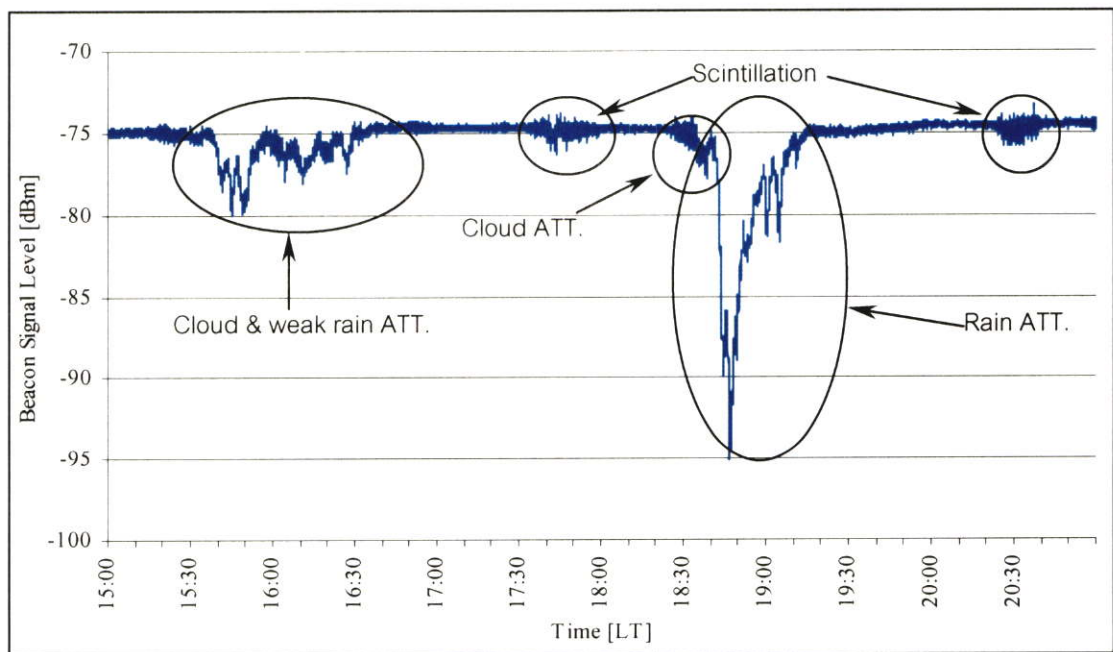
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Rain Drop Type ที่มีการลดขนาดของช่องรับฝนให้มีพื้นที่ลดลงครึ่งหนึ่งจากขนาดเดิม

3.2 ผลการทดลอง

เนื่องจากสัญญาณที่มาจากดาวเทียมมีระบบควบคุมกำลังส่ง ซึ่งทำให้ระดับสัญญาณจากดาวเทียมเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่รับได้ในย่านความถี่ 12 GHz นี้รวมเอาการเปลี่ยนระดับสัญญาณเนื่องจากระบบควบคุมกำลังส่งนี้ด้วย นอกจากนี้ยังรวมผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นด้วย ดังในรูป 3.9 (ก) แสดงตัวอย่างของระดับสัญญาณนำร่องดาวเทียมในวันที่ 1 มีนาคม 2544 ซึ่งไม่มีฝนตก



(ก)



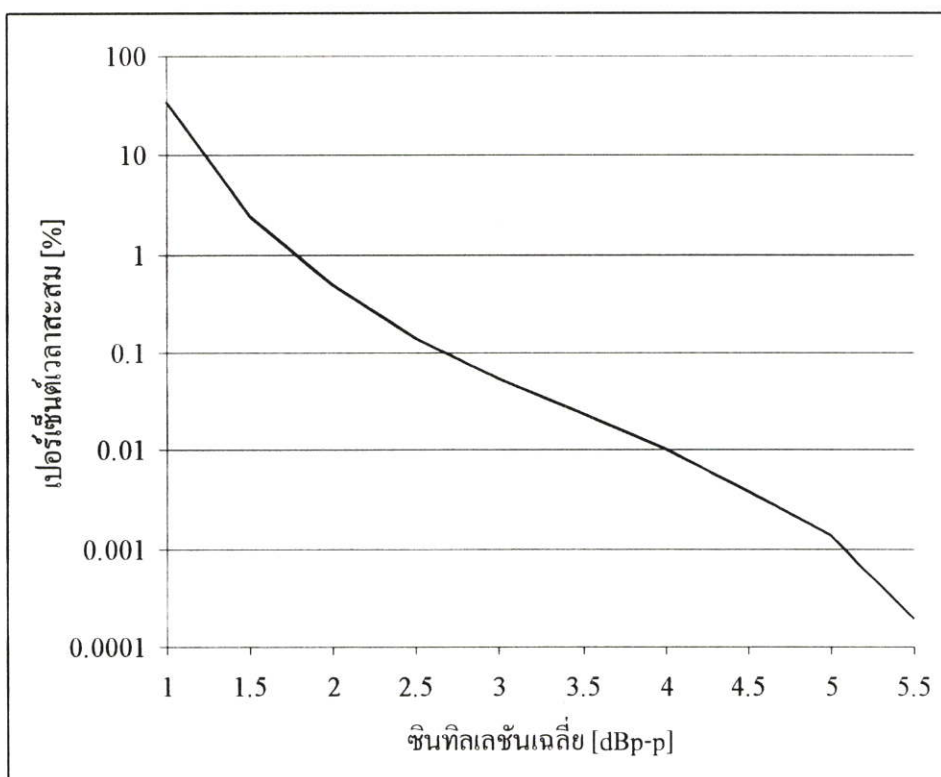
(ข)

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างสัญญาณนำร่องที่ได้จากการทดลอง (ก) กรณีที่ไม่มีฝนตก (ข) กรณีที่มีฝนตก

จะเห็นว่าระดับสัญญาณรบกวนแสดงด้วยเส้นสีน้ำเงิน เกิดการแกว่งตัวหรือเกิดซินทิลเลชันเป็นช่วงๆ โดยที่ระดับสัญญาณเฉลี่ยไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ระดับการแกว่งตัวจากยอดถึงยอดแสดงด้วยเส้นสีแดง ในขณะที่รูปที่ 3.9 (ข) แสดงระดับสัญญาณดาวเทียมในช่วงที่มีฝนตกประกอบไปด้วย ซินทิลเลชัน การลดทอนเนื่องจากเมฆ และการลดทอนเนื่องจากฝน จะเห็นว่า การลดทอนเนื่องจากเมฆ และการลดทอนเนื่องจากฝนที่มีอัตราการตกน้อย แยกออกจากกันได้ยาก เนื่องจากระดับการลดทอนของสัญญาณมีค่าน้อย นอกจากเมฆทำให้เกิดการลดทอนแล้ว ยังทำให้สัญญาณเกิดซินทิลเลชันด้วย

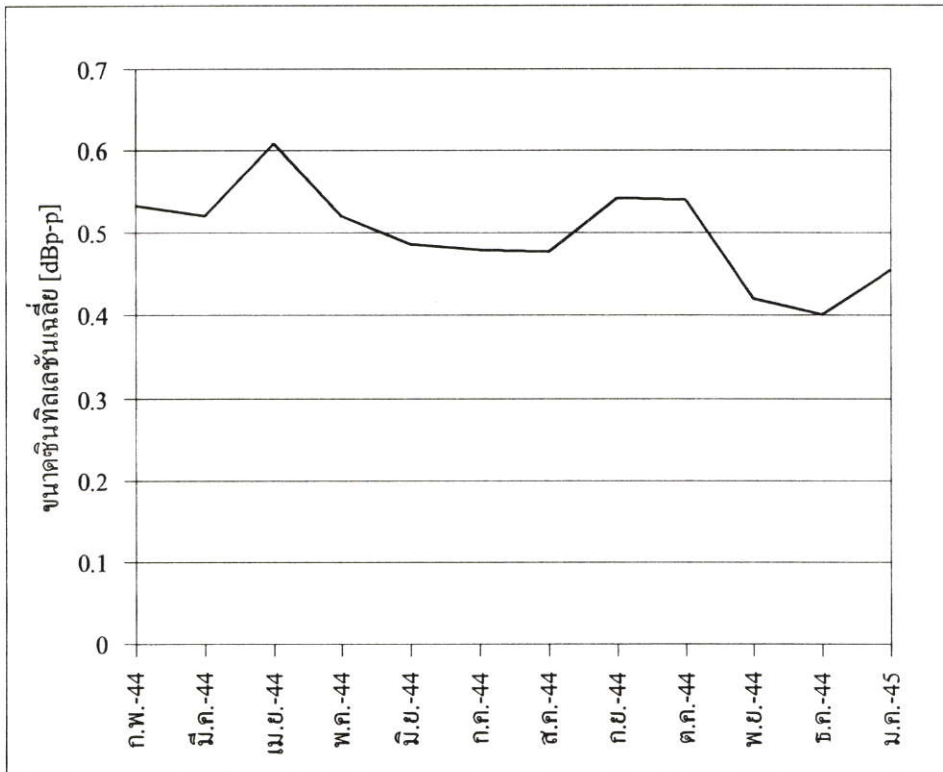
3.2.1 ผลทางสถิติของซินทิลเลชัน

ซินทิลเลชันที่เกิดกับสัญญาณรบกวน ทำให้ระดับสัญญาณแกว่งขึ้นลง การหาค่าทางสถิติทำได้โดยการหาค่ายอดถึงยอดของระดับสัญญาณรบกวนในแต่ละนาทีจากข้อมูลรายวินาที ซึ่งมีหน่วยเป็น dBp-p ยกเว้นในช่วงที่เกิดฝนตก แล้วนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมรายปี จากเดือนกุมภาพันธ์ 2544 ถึงเดือน มกราคม 2545 โดยนำแบ่งระดับซินทิลเลชันออกเป็นช่วงๆ จาก 0.5 ถึง 1 dBp-p แล้วหาความถี่สะสมของซินทิลเลชันที่มีค่าเท่ากับ หรือมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ของแต่ละช่วง ในระยะเวลา 12 เดือน



รูปที่ 3.10 เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมของซินทิลเลชันที่สูงกว่าค่าบนแกนนอนในช่วง ก.พ.44 ถึง ม.ค. 45

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นว่าขนาดของซินทิลเลชันสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 5.5 dBp-p ที่ 0.000193% หรือ 1 นาที ใน 1 ปี และที่ 0.01 % หรือประมาณ 1 ชั่วโมงใน 1 ปี ขนาดของซินทิลเลชันอยู่ที่ประมาณ 4 dBp-p สัญญาณที่เกิดซินทิลเลชันจะมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระดับสัญญาณทำให้ระดับสัญญาณโดยเฉลี่ยไม่ต่างไปจากเดิมมากนักดังนั้นในกรณีที่ขนาดซินทิลเลชันต่ำจะส่งผลกระทบต่อระบบสื่อสารน้อยมาก หรือไม่เกิดขึ้นเลย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของซินทิลเลชัน โดยการหาค่าซินทิลเลชันเฉลี่ยในแต่ละเดือน ดังแสดงในรูป 3.11



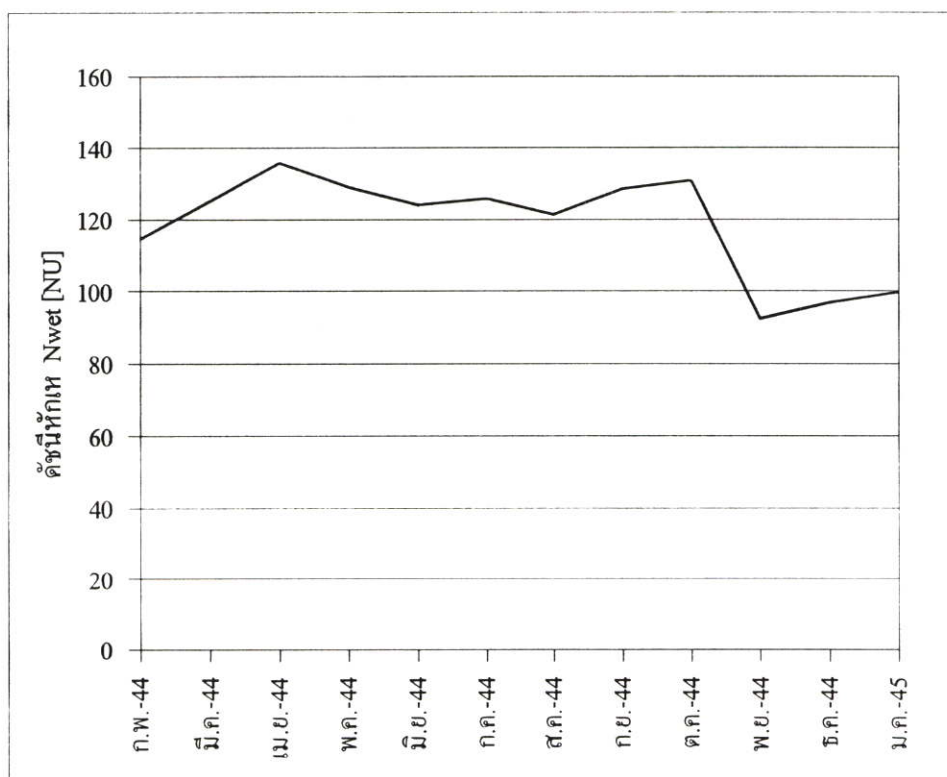
รูปที่ 3.11 ขนาดซินทิลเลชันเฉลี่ยแต่ละเดือน จาก ก.พ. 2544 ถึง ม.ค. 2545

จากรูปที่ 3.11 เป็นขนาดซินทิลเลชันเฉลี่ยแต่ละเดือน จะเห็นว่าเดือน เม.ย. 2544 มีค่าซินทิลเลชันเฉลี่ยสูงสุดคือประมาณ 0.6 dBp-p และเดือน ธ.ค. 2544 เป็นเดือนที่มีซินทิลเลชันเฉลี่ยต่ำสุดคือ ประมาณ 0.4 dBp-p เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของซินทิลเลชันกับดัชนีหักเหของชั้นบรรยากาศ [29] โดยปกติค่าดัชนีหักเหของชั้นบรรยากาศ (n) มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกินประมาณ 10^{-4} ดังนั้นจึงใช้ค่าดัชนีหักเหในรูปของ N (N หน่วย) นิยามจาก $N=(n-1)*10^6$ เมื่อ N เป็นดังสมการต่อไปนี้

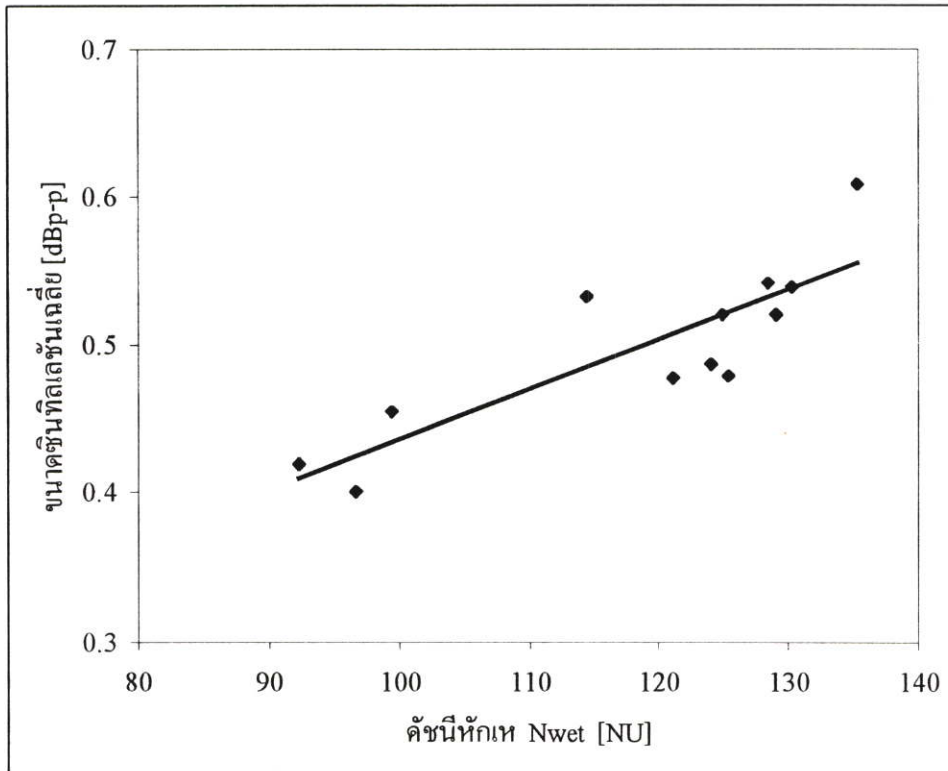
$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (3.1)$$

เมื่อ P คือ ความกดอากาศ (mb)
 T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}$ K)
 e คือ ความกดของไอน้ำ (mb)

ความกดของไอน้ำ (e) มีความสัมพันธ์กับ ความชื้นสัมพัทธ์ H(%) และความกดของไอน้ำอิ่มตัว (e_s) ดังนี้ คือ $e=H*e_s/100$ และ e_s เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิของชั้นบรรยากาศ T ($^{\circ}$ K) ดังนี้ คือ $e_s=6.11*\exp[19.7T/(T+273)]$ และโดยปกติของดัชนีหักเห พจน์แรกทางด้านขวาของสมการ (3.1) เรียกว่า N_{dry} และพจน์ที่สอง เรียกว่า N_{wet} ในกรณีอุณหภูมิต่ำมากๆ ค่า N_{wet} มีค่าต่ำมาก และดัชนีหักเห โดยรวมแล้วไม่ขึ้นกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น N_{dry} จะลดลงอย่างช้าๆ ในขณะที่ N_{wet} max จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนบางกรณี N_{wet} max มีค่าสูงกว่า N_{dry} ในกรณีที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูง ค่าดัชนีหักเหไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อย่างมาก [4] ดัชนีหักเหของชั้นบรรยากาศในรูปของ N_{wet} จากเดือน ก.พ. 2544 ถึง ม.ค. 2545 ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แสดงดังในรูปที่ 3.12 ค่าดัชนีหักเหสูงสุดในเดือน เม.ย 2544 และต่ำสุดในเดือน พ.ย. 2544 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห กับขนาดซินทิเลชันเป็นดังในรูปที่ 3.13

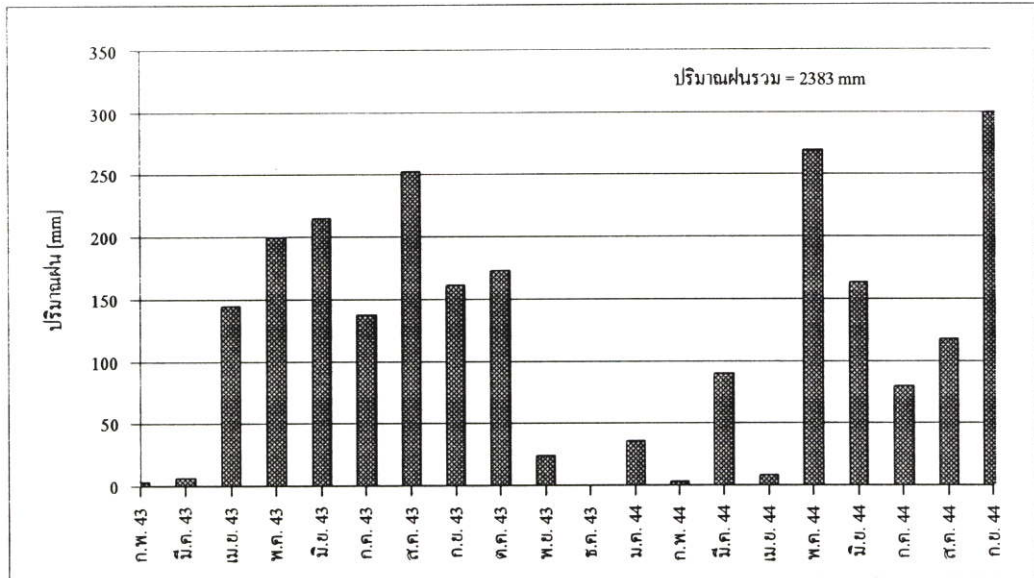


รูปที่ 3.12 ดัชนีหักเหในแต่ละเดือนที่ สจล.



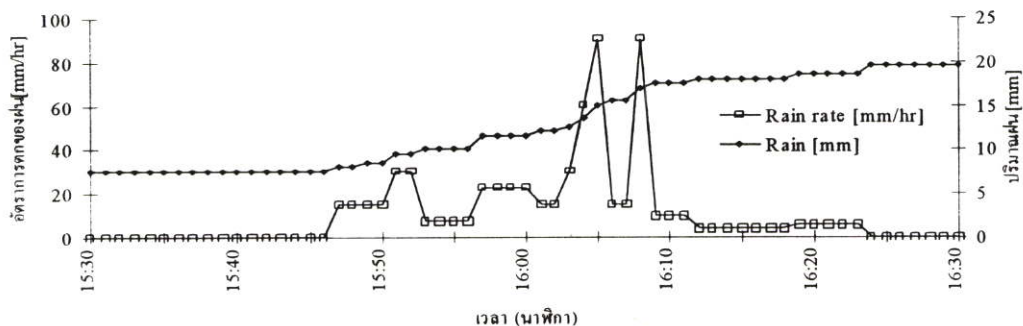
รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างซินทิลเลชันและ ดัชนีหักเห Nwet

นอกจากผลกระทบจากซินทิลเลชันที่มีต่อสัญญาณดาวเทียมในย่าน Ku การลดทอนสัญญาณดาวเทียมซึ่งมีผลกระทบต่อระบบมากกว่า ซึ่งสามารถทำให้โครงข่ายเชื่อมโยงถูกตัดขาดได้ ในการวิเคราะห์ข้อมูลการลดทอนเนื่องจากฝนผู้วิจัยได้ทำการหาความหนาแน่นของระดับสัญญาณและเลือกระดับสัญญาณที่มีความหนาแน่นมากที่สุดในแต่ละเดือนเพื่อใช้เป็นระดับอ้างอิงในการหาค่าการลดทอนของสัญญาณต่อไป ปริมาณฝนที่ตกทั้งหมดในแต่ละเดือน จากเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2543 ถึงเดือน กันยายน พ.ศ. 2544 แสดงในรูปที่ 3.14 จากรูปจะเห็นว่าช่วงเดือนเมษายน ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2543 และช่วงเดือน พฤษภาคม ถึงประมาณเดือนกันยายน 2544 เป็นช่วงฤดูฝน



รูปที่ 3.14 ปริมาณฝนในแต่ละเดือน

อัตราการตกของฝนที่วัดได้จะอยู่ในรูปของปริมาณสะสมในแต่ละนาที่ โดยจะสะสมจาก 0 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นทีละ 0.5 มิลลิเมตร จนถึง 100 มิลลิเมตรแล้วจะกลับมาเริ่มที่ 0 มิลลิเมตรอีกครั้ง จากวิธีการเก็บข้อมูลนี้ นำกลับมาคำนวณค่าอัตราการตกของฝนในแต่ละนาที่ไว้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 อย่างคือ อย่างแรกในกรณีที่ฝนตกหนักกว่า 30 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ในกรณีนี้ค่าปริมาณสะสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆนาที่ และจะเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการตกของฝนในขณะนั้น การหาอัตราการตกของฝนในกรณีนี้ทำโดยการหาปริมาณที่แตกต่างกันในแต่ละนาที่ และนำมาคูณด้วย 60 ก็จะได้ค่าอัตราการตกของฝนที่เป็นมิลลิเมตรต่อชั่วโมงในช่วงนาที่นั้นออกมา กรณีหลังคือกรณีที่อัตราการตกของฝนต่ำกว่า 30 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ในกรณีนี้ปริมาณสะสมของฝนจะไม่เพิ่มขึ้นทุกนาที่ ในกรณีนี้จะใช้วิธีการเฉลี่ยในการหาอัตราการตกของฝนแทน โดยการหาคาบเวลาของช่วงที่ปริมาณฝนไม่เพิ่มขึ้น แต่ไม่เกิน 30 นาที ถ้านานกว่า 30 นาที จะถือว่าไม่มีฝนตก แล้วนำค่าปริมาณฝนที่ได้คูณกับ 60 หาค่าด้วยช่วงเวลาที่มีปริมาณฝนคงที่ ตัวอย่างของการหาอัตราการตกของฝนนี้ แสดงในรูปที่ 3.15

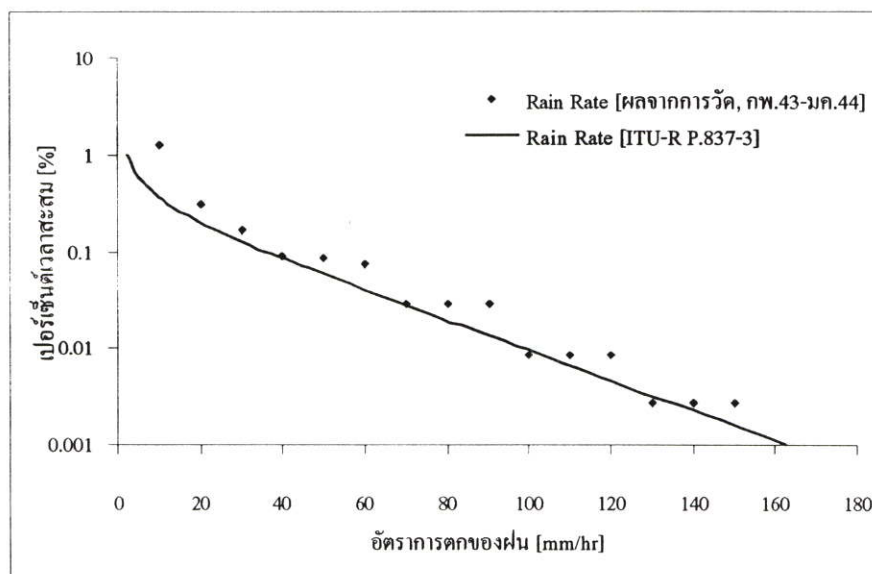


รูปที่ 3.15 ตัวอย่างการคำนวณอัตราการตกของฝน

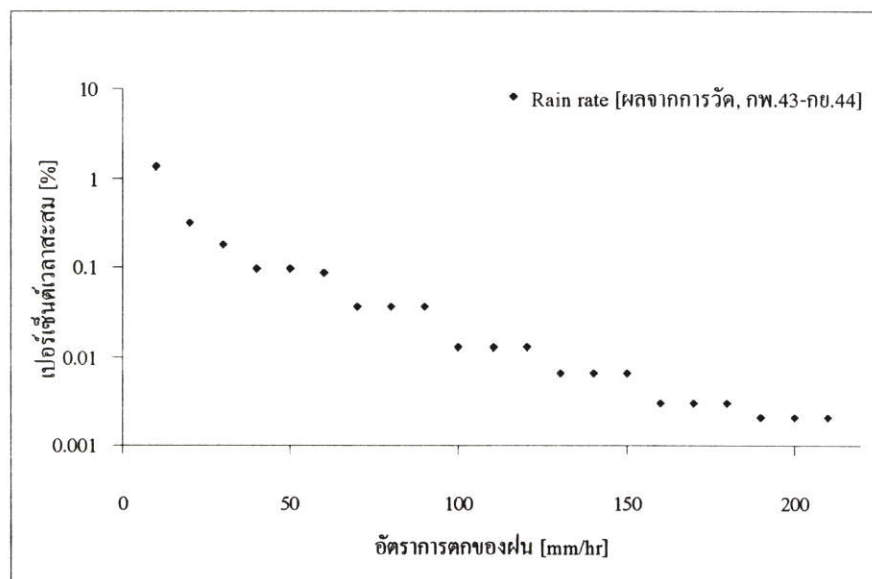
ในส่วนของการวัดอัตราการตกของฝนที่ระยะ 2 กม. จากงานสายอากาศจะบันทึกค่าปริมาณฝนเป็นมิลลิเมตรในแต่ละนาทิจ โดยเก็บไว้ในชุดเก็บข้อมูลที่ติดตั้งอยู่ภายในเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน ข้อมูลที่ได้นำมาผ่านกระบวนการแปลงให้เป็นค่าอัตราการตกของฝนแบบเดียวกันกับ ข้อมูลฝนที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนที่งานสายอากาศ

3.2.2 ผลทางสถิติของอัตราการตกของฝน

ค่าเปอร์เซ็นต์เวลาของอัตราการตกของฝน ได้จากการคิดคำนวณค่าเวลาที่ฝนตกแต่ละระดับ โดยกำหนดช่วงความละเอียดเป็น 0-10, 10-20, 20-30, 30-60, 60-90,..., 270-300 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จำนวนครั้งที่เกิดอัตราการตกของฝนแต่ละระดับรวมตลอดทั้งปี เดือน กุมภาพันธ์ 2543 ถึง มกราคม 2544 เมื่อนำค่าเวลาของอัตราการตกของฝนในแต่ละช่วงมาคำนวณหาความถี่สะสม จะได้เป็นจำนวนเวลาทั้งหมดที่อัตราการตกของฝนสูงกว่าระดับนั้นๆ เมื่อนำไปคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับเวลาตลอดทั้งปีจะได้เป็นเปอร์เซ็นต์เวลาที่มีอัตราการตกของฝนสูงกว่าระดับแกนนอนในช่วงเวลา 12 เดือน ในกรณีเดียวกันเมื่อพิจารณาตั้งแต่ เดือน กุมภาพันธ์ 2543 ถึง กันยายน 2544 จะได้เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมระยะเวลา 20 เดือน



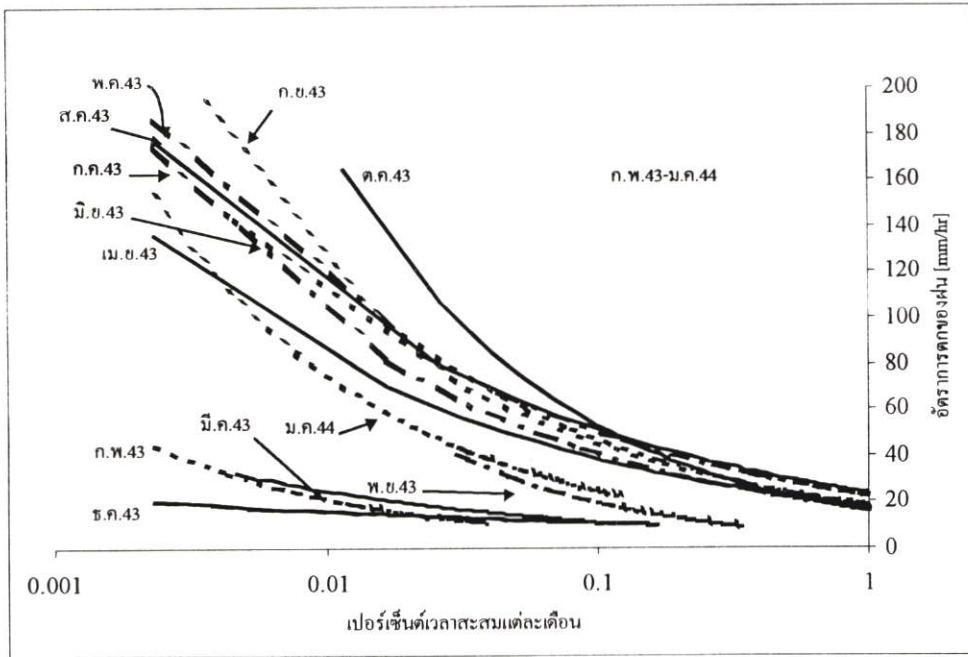
ก) เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมระยะเวลา หนึ่งปี และค่าที่ได้จากโมเดลของ ITU-R P.837-3



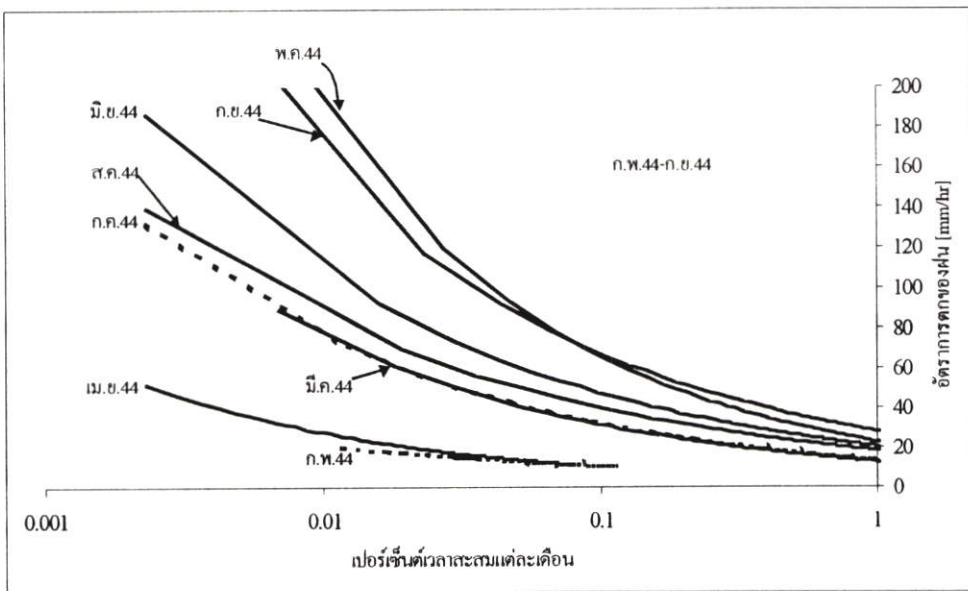
ข) เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมระยะเวลา 20 เดือน

รูปที่ 3.16 เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมของอัตราการตกของฝน ที่สูงกว่าค่าบนแกนนอนในช่วงเวลา หนึ่งปีและ 20 เดือน

รูปที่ 3.16 เป็นเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมตลอดปี และ 20 เดือน จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์เวลาตลอดปีมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโมเดลของ ITU-R P.837-3 ซึ่งไม่สามารถดูรายละเอียดลงไปได้ เมื่อพิจารณาในรายเดือน โดยใช้วิธีการคำนวณแบบเดียวกันโดยคิดในแต่ละเดือน จะได้เปอร์เซ็นต์เวลาที่มีอัตราการตกของฝนสูงกว่าระดับระดับนั้นแต่ละเดือนของทั้ง 12 และ ทั้ง 20 เดือน ดังรูปที่ 3.17



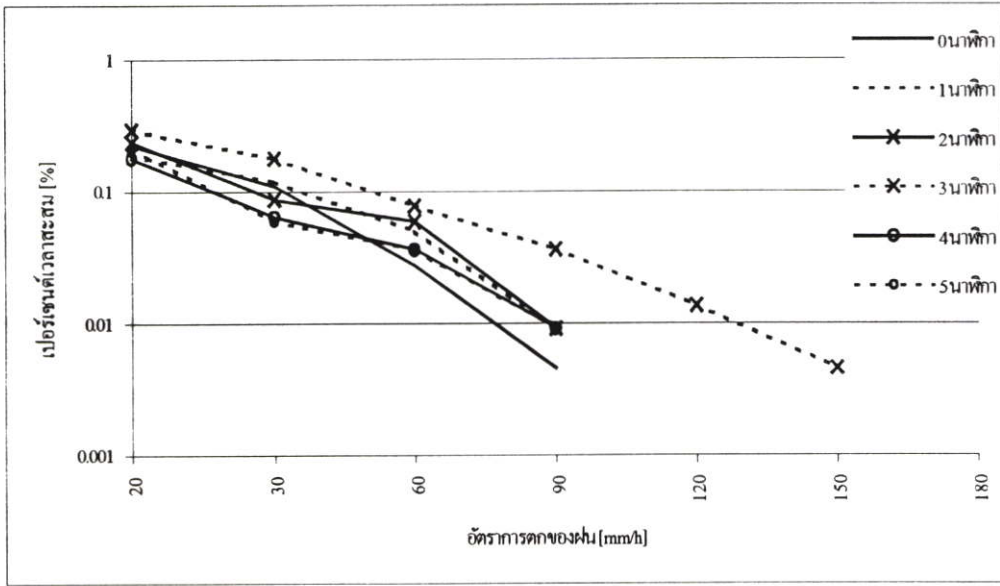
ก)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมแต่ละเดือนตั้งแต่ ก.พ.43 ถึง ม.ค. 44



ข)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมแต่ละเดือนตั้งแต่ ก.พ.44 ถึง ก.ย.44

รูปที่ 3.17 เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมของอัตราการตกของฝนที่สูงกว่าค่าแกนนอน ในแต่ละเดือน

จากรูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่าเดือน ตุลาคม 2543 และ เดือน พฤษภาคม 2544 เป็นเดือนที่ฝนตกหนักกว่าเดือนอื่นๆ เมื่อพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมเป็นรายชั่วโมงตลอดช่วงที่พิจารณา ทำโดยการหาค่าเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมในแต่ละชั่วโมงภายในคาบเวลาที่สนใจ ผลที่ได้แสดงดังในรูปที่ 3.18 และ 3.19

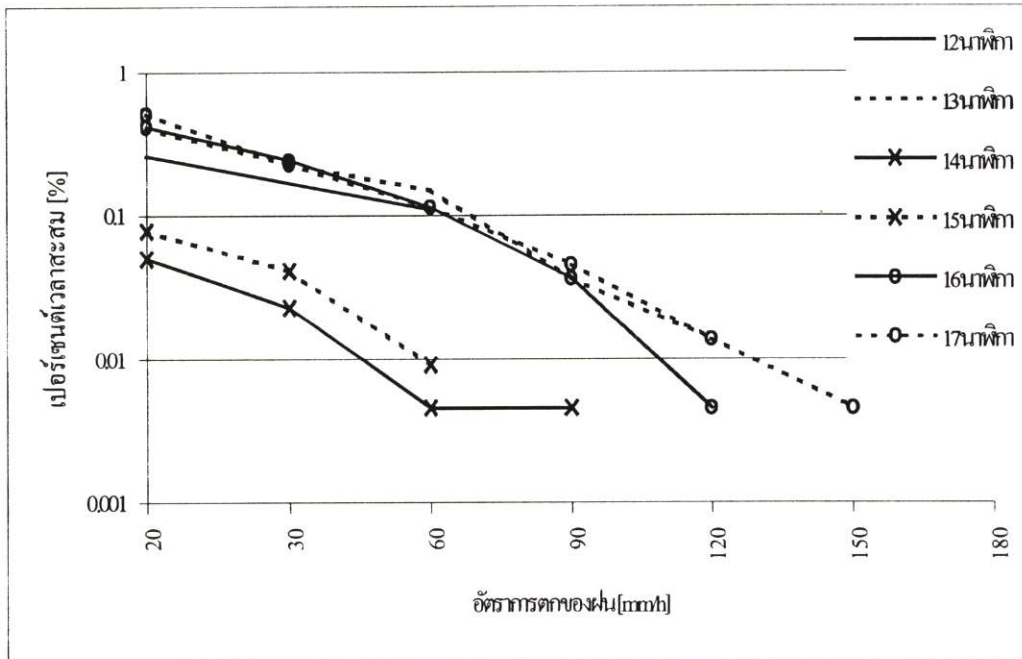


ก)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมในช่วงเวลา 0-5 นาที

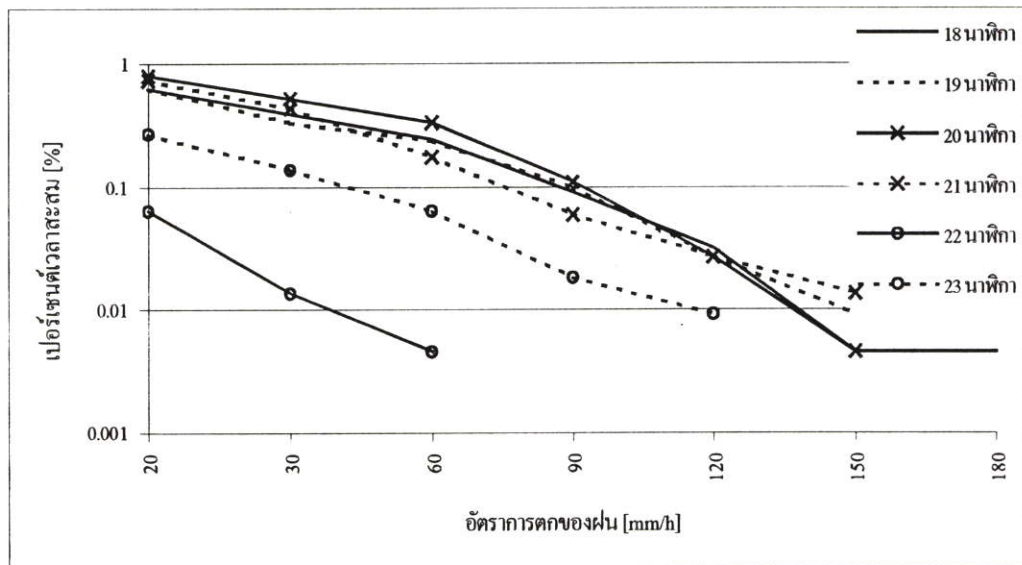


ข)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมในช่วงเวลา 6-11 นาที

รูปที่ 3.18 เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมของอัตราฝนที่สูงกว่าค่าเกณฑ์นอน ในแต่ละชั่วโมง จาก ก.พ.43 ถึง

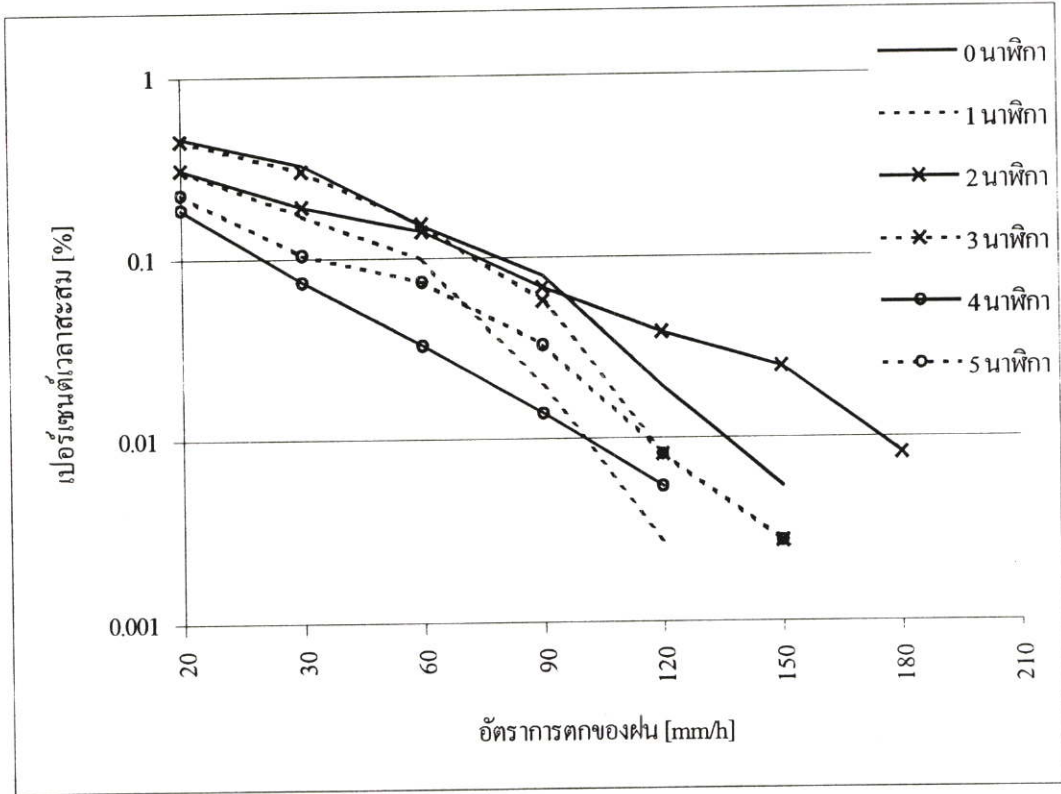


ค)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมในช่วงเวลา 12-17 นาที

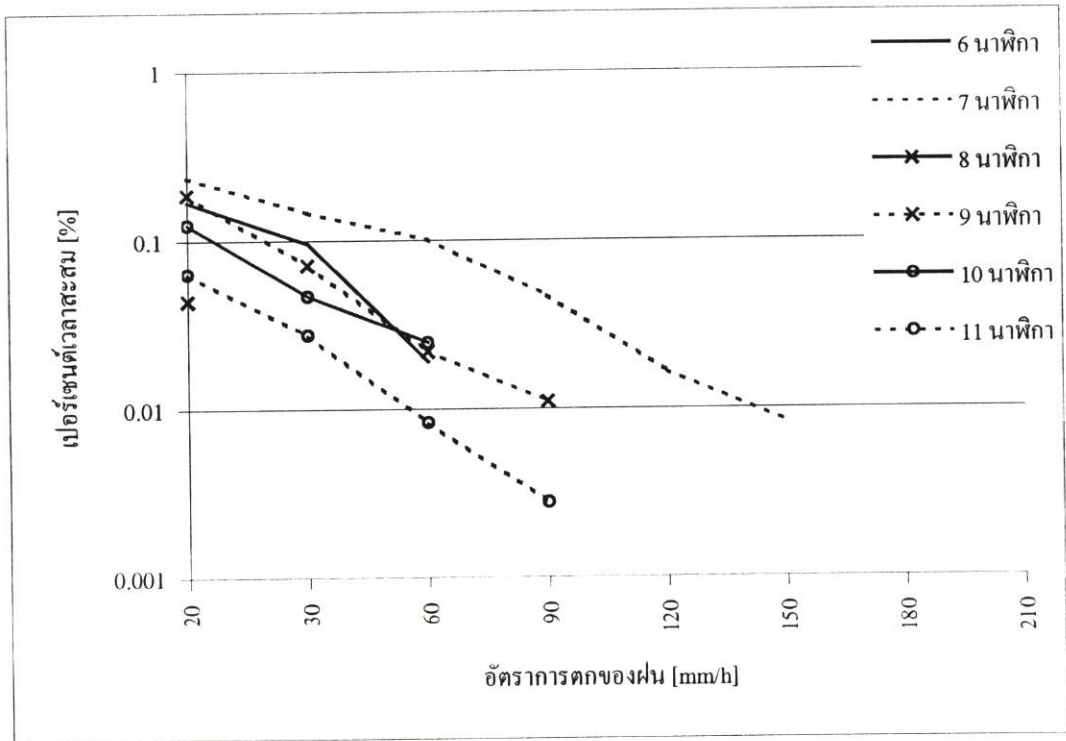


ง)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมในช่วงเวลา 18-23 นาที

รูปที่ 3.18 (ต่อ)

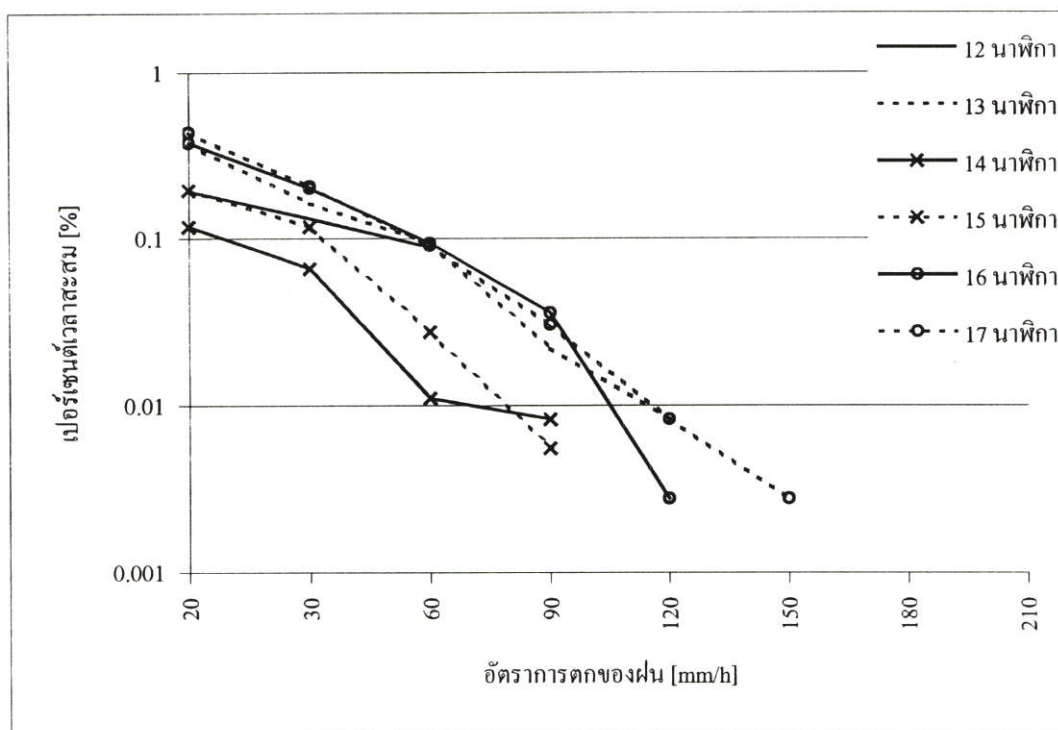


ก) เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมในช่วงเวลา 0-5 นาที

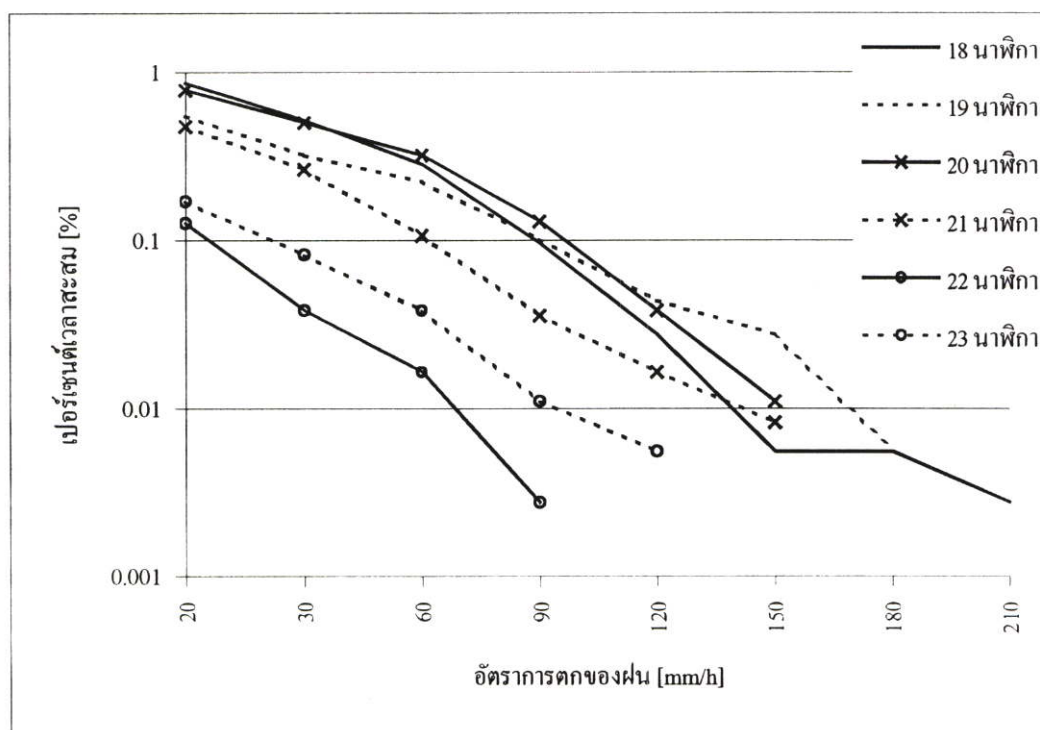


ข) เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมในช่วงเวลา 6-11 นาที

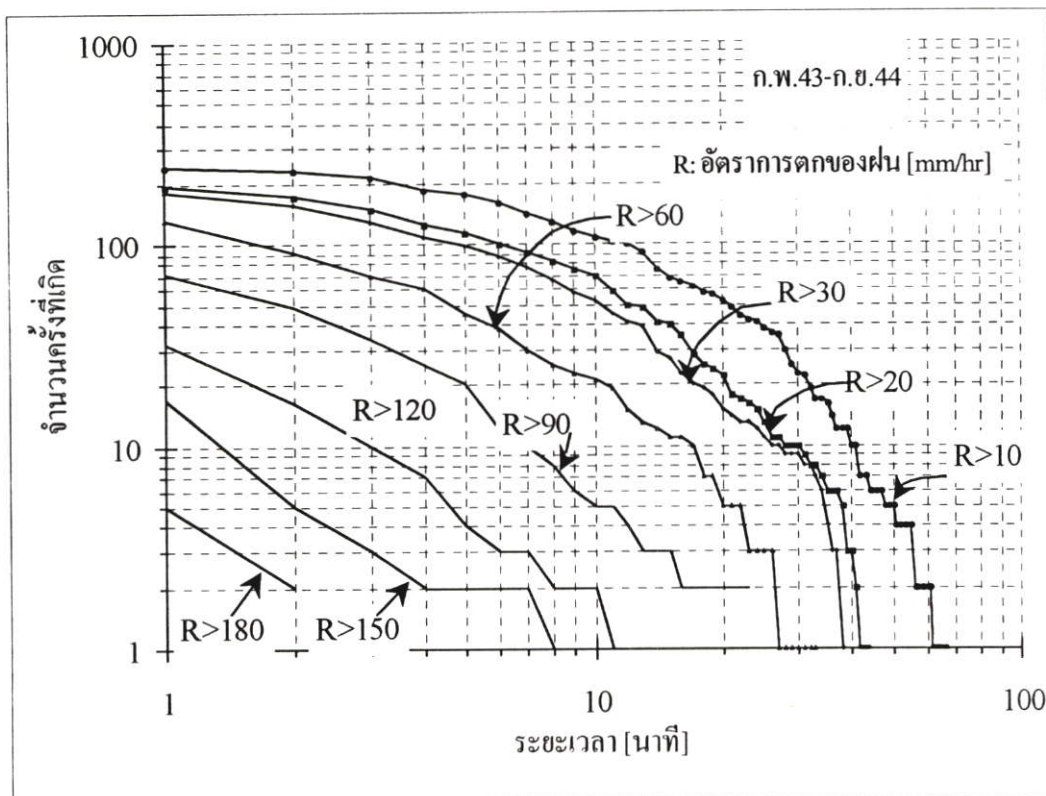
รูปที่ 3.19 เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมของอัตราฝนที่สูงกว่าค่าเกณฑ์ในในแต่ละชั่วโมง จาก ก.พ.43 ถึง



ค) เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมในช่วงเวลา 12-17 นาที



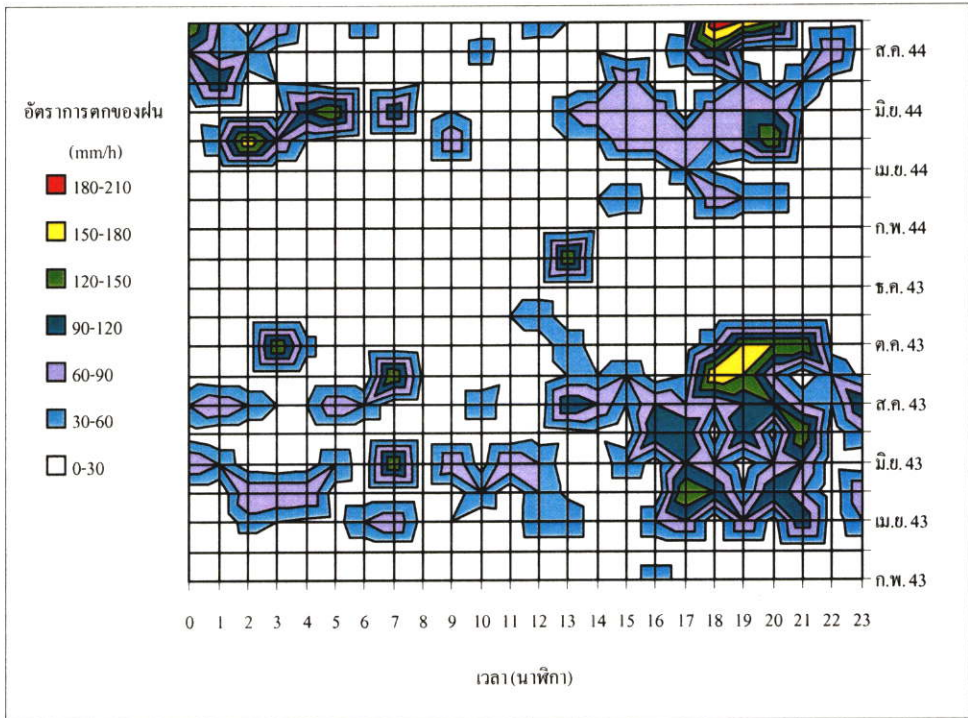
ง) เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมในช่วงเวลา 18-23 นาที



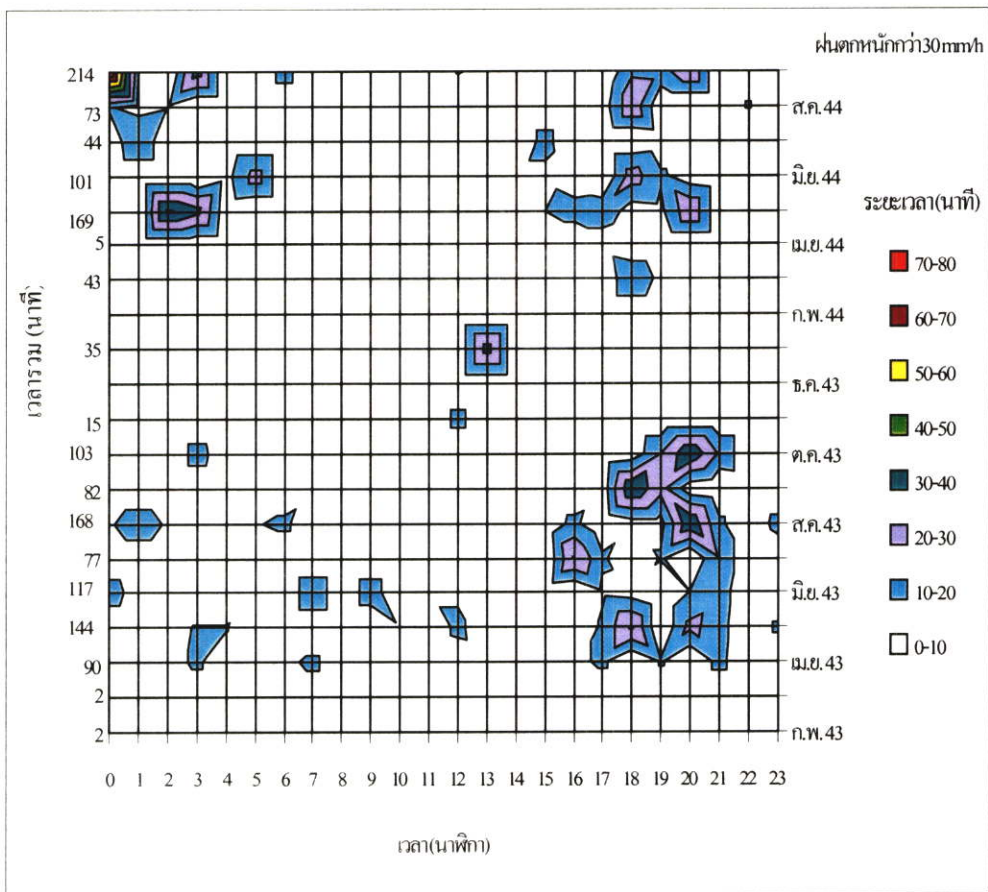
รูปที่ 3.20 ระยะเวลาและจำนวนครั้งที่เกิดในแต่ละอัตราการตกของฝน

เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาการตกของฝน โดยการหาจำนวนนาทที่ที่ฝนตกต่อเนื่องว่ายาวนานเท่าไร มีอัตราการตกเท่าไร และเกิดขึ้นจำนวนกี่ครั้งในช่วงเวลาที่สนใจ โดยกำหนดให้เหตุการณ์ฝนหนึ่งเหตุการณ์เริ่มจากนาทที่ที่ฝนตก หาจำนวนนาทที่อัตราการตกของฝนสูงกว่าค่าที่กำหนดว่ามีระยะเวลากี่นาทในเหตุการณ์ฝนนั้น และเหตุการณ์ฝนสิ้นสุดเมื่ออัตราการตกของฝนเท่ากับ 0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงติดต่อกัน ไม่น้อยกว่า 10 นาที ผลจากการวิเคราะห์แสดงดังในรูปที่ 3.20

เมื่อนำข้อมูลฝนทั้งหมดมาทำแผนภาพแสดงอัตราการตกของฝนสูงสุดในแต่ละชั่วโมง โดยการหาอัตราการตกของฝนสูงสุดในแต่ละชั่วโมงของทั้งเดือนแล้วนำมาพล็อตลงบนแผนภาพจะได้ดังในรูปที่ 3.21 ส่วนรูปที่ 3.22 แสดงถึงระยะเวลาที่มีฝนตกหนักกว่า 30 60 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงติดต่อกันตามลำดับโดยใช้เกณฑ์เดียวกันกับที่ใช้ในรูปที่ 3.19

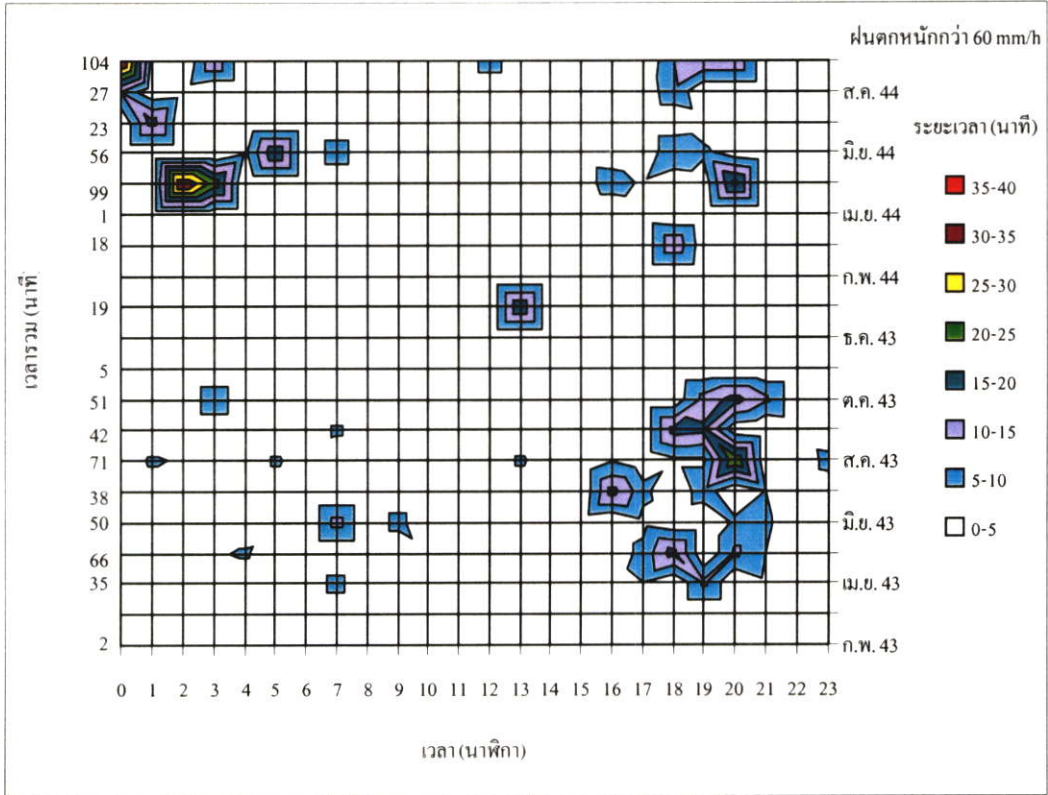


รูปที่ 3.21 แผนภาพอัตราารตกของฝนสูงสุดแต่ละชั่วโมงในแต่ละเดือน

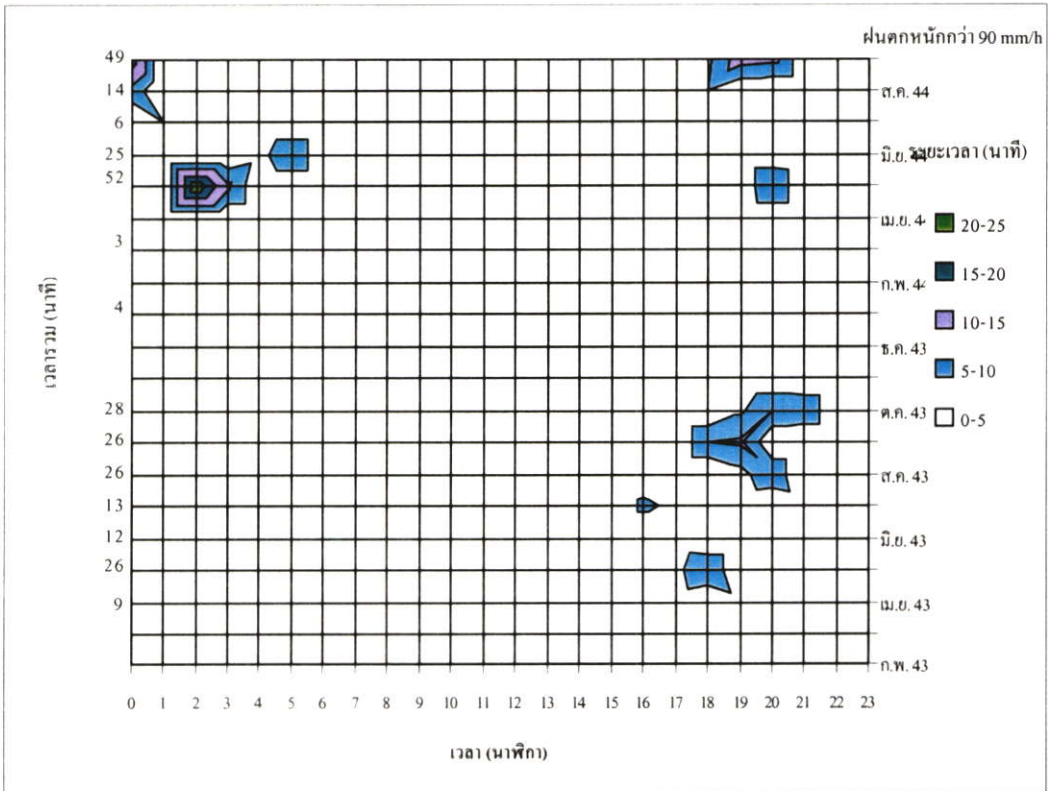


ก) ระยะเวลาที่อัตราารตกของฝนสูงกว่า 30 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 3.22 ระยะเวลาที่อัตราารตกของฝนสูงกว่าค่าที่สนใจ

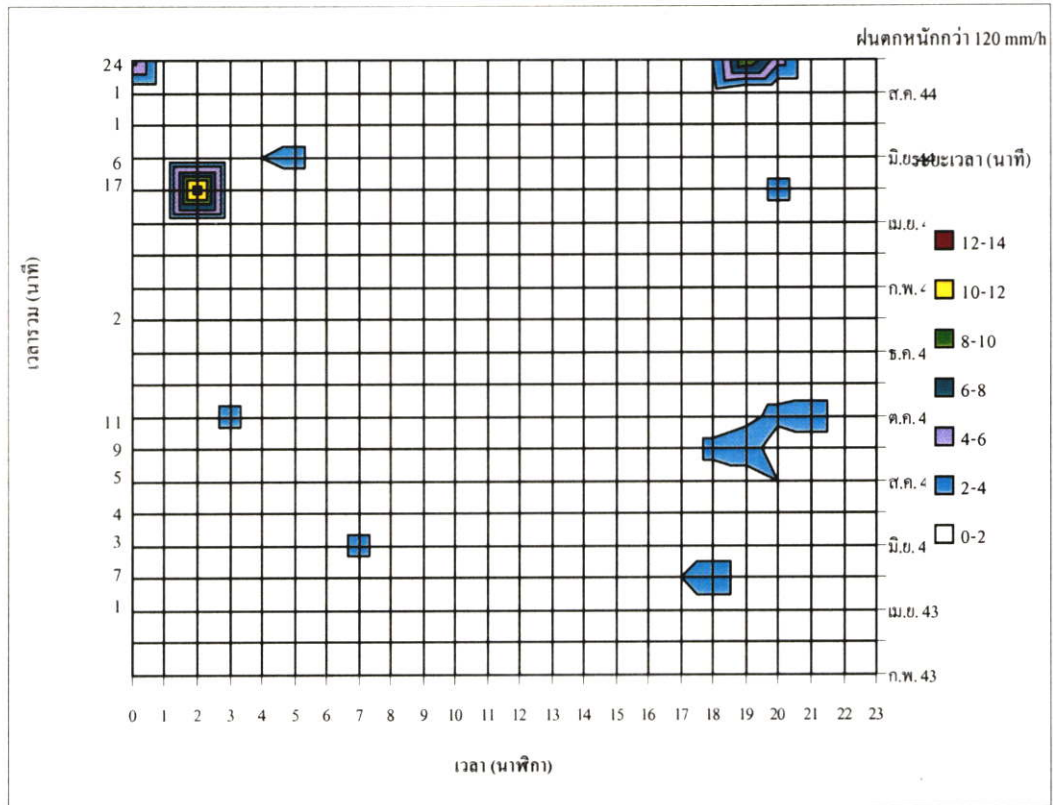


ข) ระยะเวลาที่อัตราการตกของฝนสูงกว่า 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



ค) ระยะเวลาที่อัตราการตกของฝนสูงกว่า 90 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

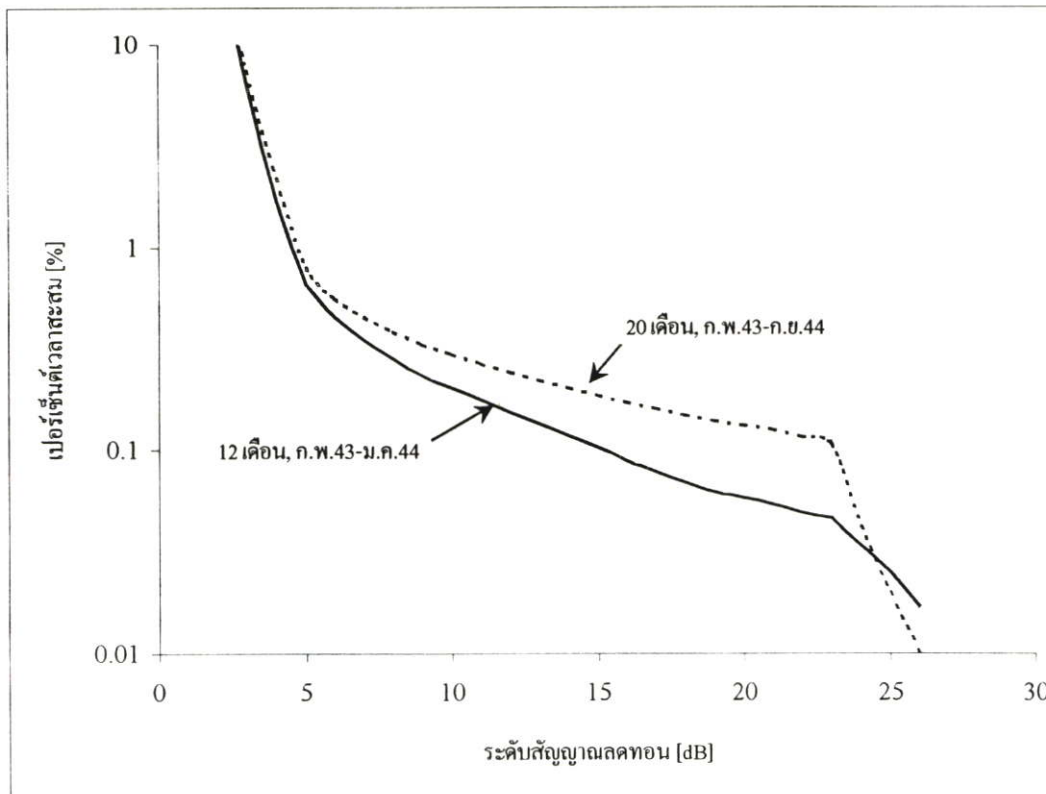
รูปที่ 3.22 (ต่อ)



ง) ระยะเวลาที่อัตราการตกของฝนสูงกว่า 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
รูปที่ 3.22 (ต่อ)

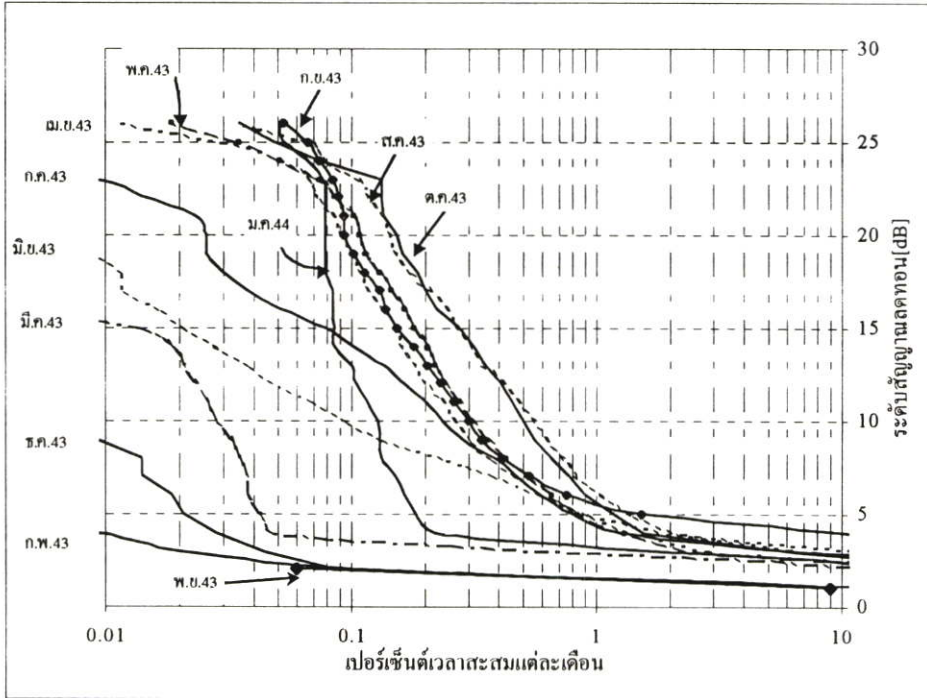
3.2.3 ผลทางสถิติของการลดทอนของสัญญาณดาวเทียม

ค่าเปอร์เซ็นต์เวลาของการลดทอนของสัญญาณดาวเทียม ได้จากการคำนวณค่าเวลาที่สัญญาณลดทอนลงแต่ละระดับ โดยกำหนดช่วงความละเอียด 1dB จาก 0 ถึง 30dB แต่เนื่องจากว่าระบบที่ในการทดลองนี้สามารถวัดค่าลดทอนของสัญญาณได้ประมาณ 23 dB ค่าที่สูงกว่านี้จะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณปกติ ในทำนองเดียวกันกับการคิดเปอร์เซ็นต์เวลาของอัตราการตกของฝน เมื่อนำมาคิดกับค่าการลดทอนของสัญญาณนำร่องดาวเทียม จะได้เปอร์เซ็นต์เวลาที่สัญญาณลดทอนสูงกว่าระดับเกณฑ์นอนในช่วงเวลา 12 เดือนและ ช่วงเวลา 20 เดือน

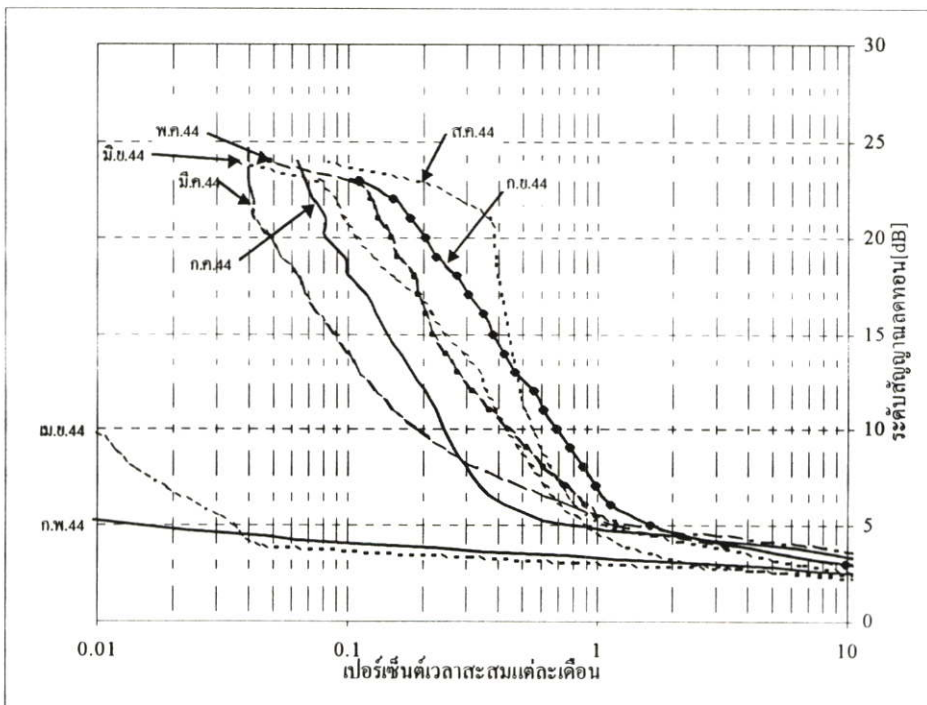


รูปที่ 3.23 เปอร์เซนต์เวลาสะสมของการรบกวนของสัญญาณรบกวน ในช่วงเวลา 12 และ 20 เดือน

เมื่อพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมรายเดือน โดยใช้วิธีการคำนวณแบบเดียวกันจะได้ เปอร์เซนต์เวลาสะสมแต่ละเดือนในช่วงเดือน ก.พ.43 ถึง ม.ค. 44 และ ก.พ.44 ถึง ก.ย.44 ดังรูปที่ 3.24



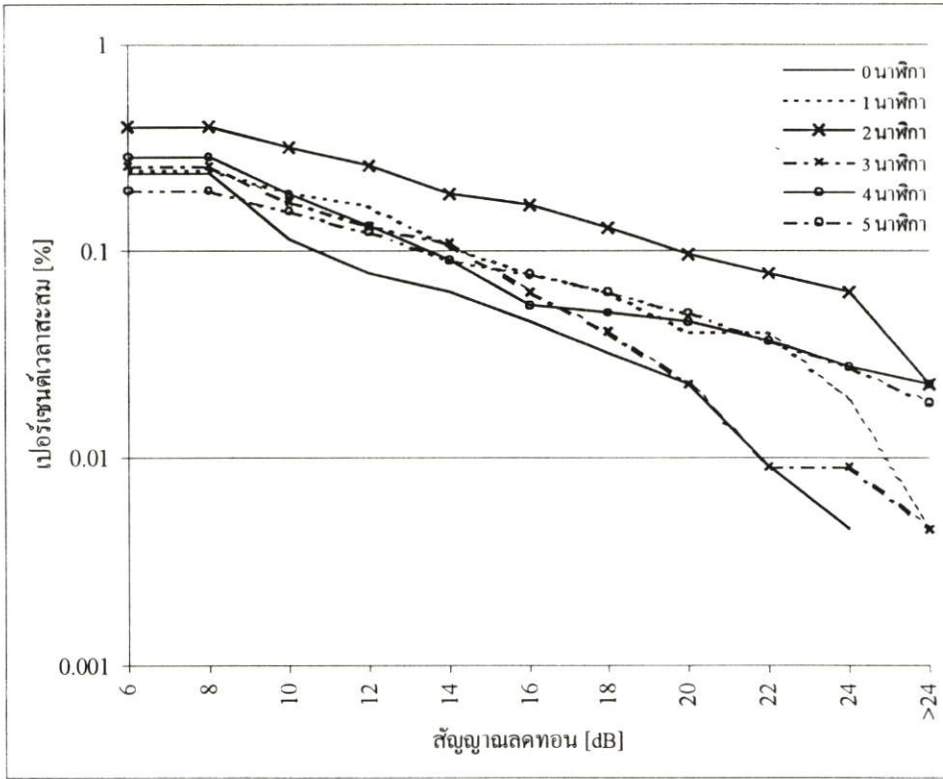
(ก) เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมการลดทอนสัญญาณแต่ละเดือนตั้งแต่ ก.พ.43 ถึง ม.ค. 44



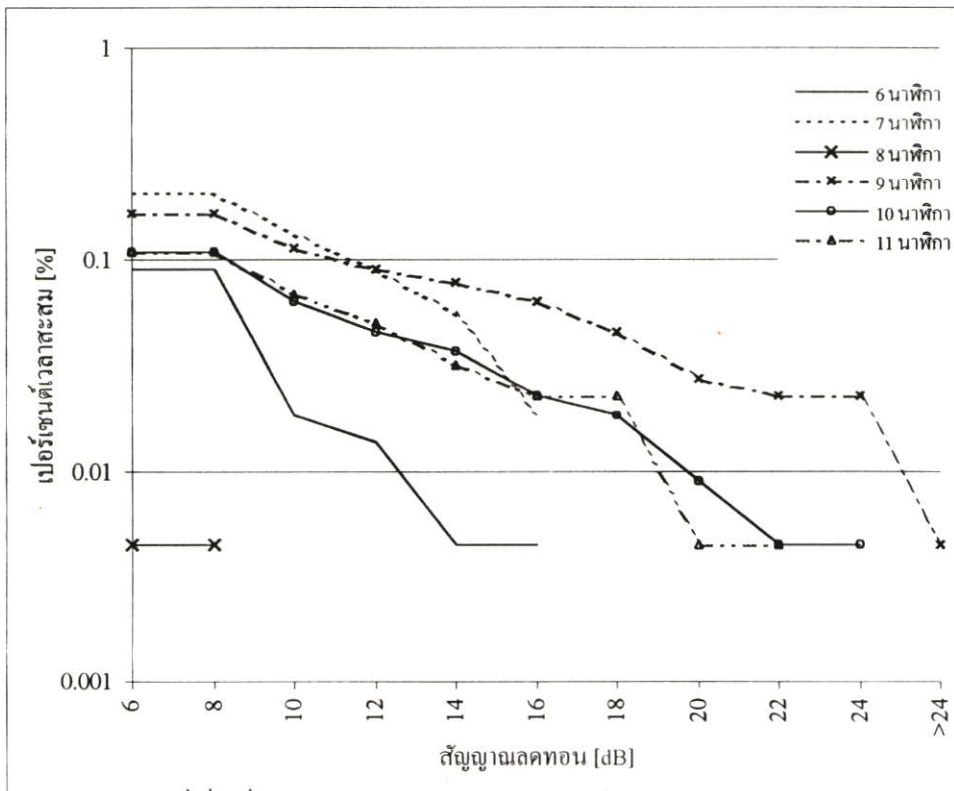
(ข) เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมการลดทอนสัญญาณแต่ละเดือนตั้งแต่ ก.พ.44 ถึง ก.ย.44

รูปที่ 3.24 เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมของการลดทอนของสัญญาณนำร่องจาก ก.พ. 43 ถึง ก.ย. 44

ในการทำงานเดียวกันเมื่อพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมรายชั่วโมง โดยใช้วิธีการคำนวณเดียวกัน จะได้เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมแต่ละชั่วโมง ของทั้ง 12 และ 20 เดือน

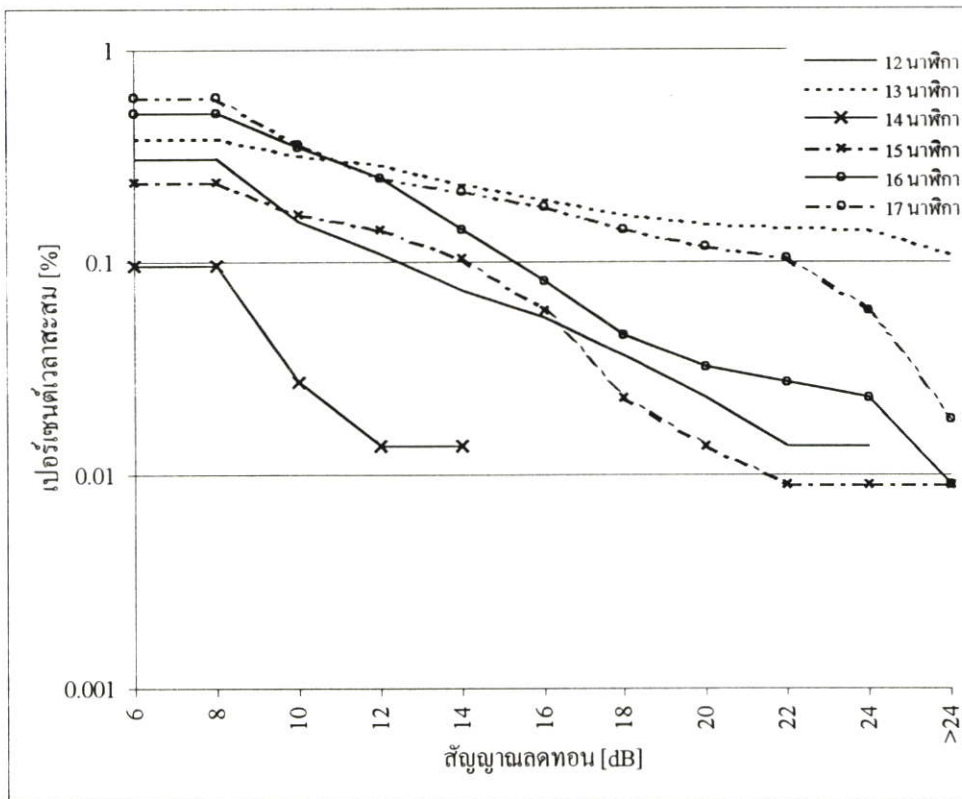


ก)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมการลดทอนสัญญาณในช่วงเวลา 0-5 นาที

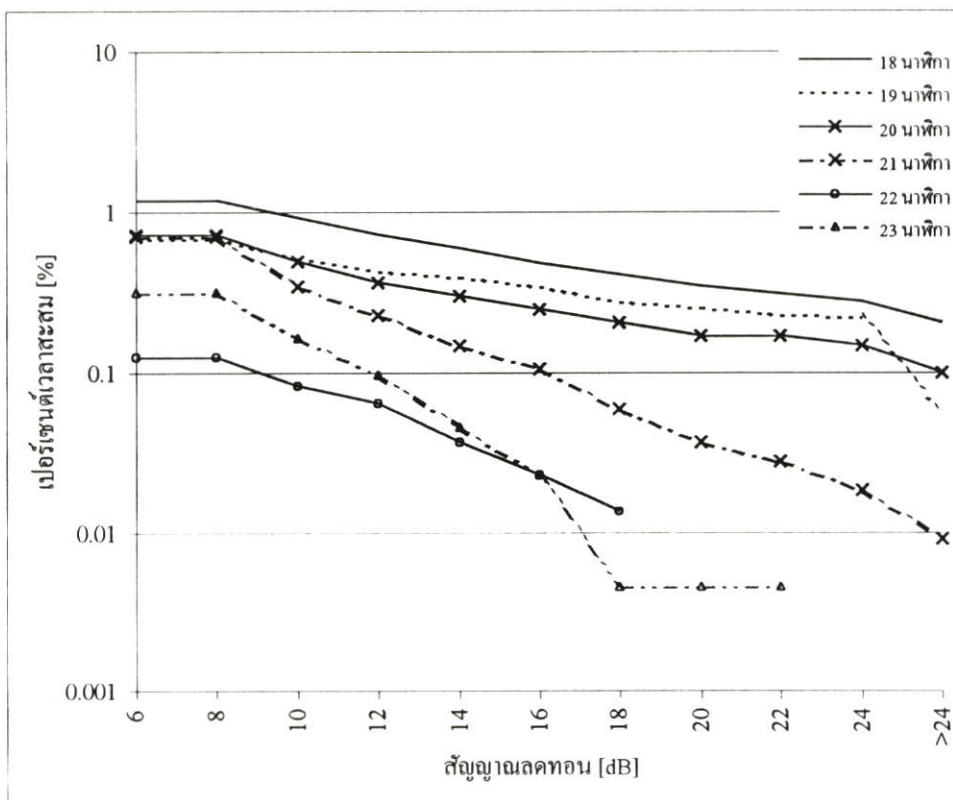


ข)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมการลดทอนสัญญาณในช่วงเวลา 6-11 นาที

รูปที่ 3.25 เปอร์เซนต์เวลาสะสมของการลดทอนสัญญาณนำร่องที่สูงกว่าค่าเกณฑ์
ในแต่ละชั่วโมง จาก ก.พ.43 ถึง ม.ค.44

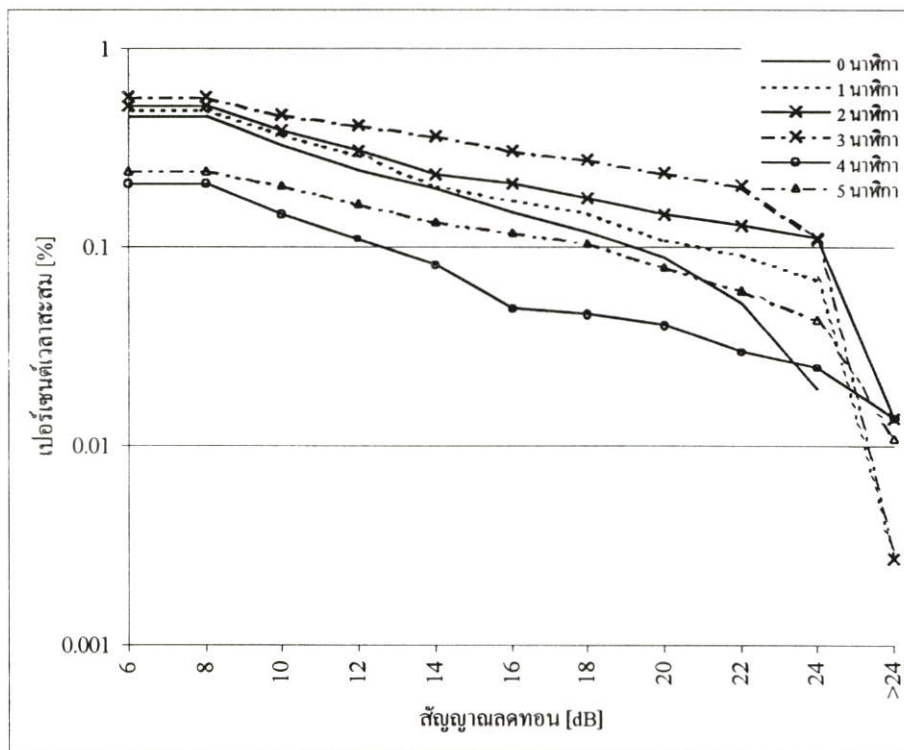


ค)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมการลดทอนสัญญาณในช่วงเวลา 12-17 นาที

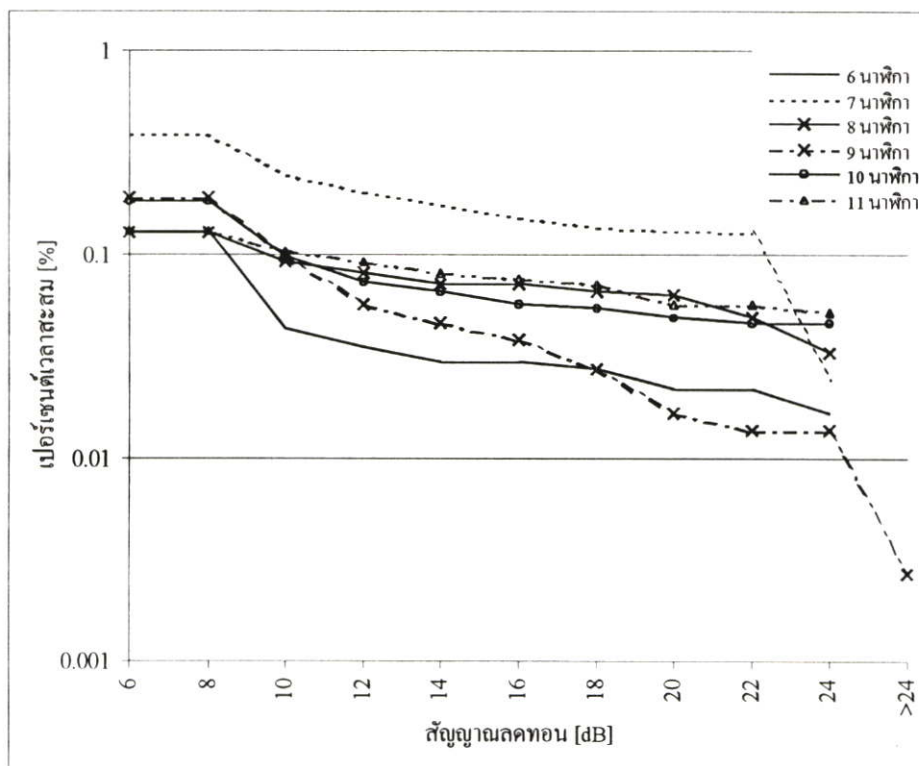


ง)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมการลดทอนสัญญาณในช่วงเวลา 18-23 นาที

รูปที่ 3.25 (ต่อ)

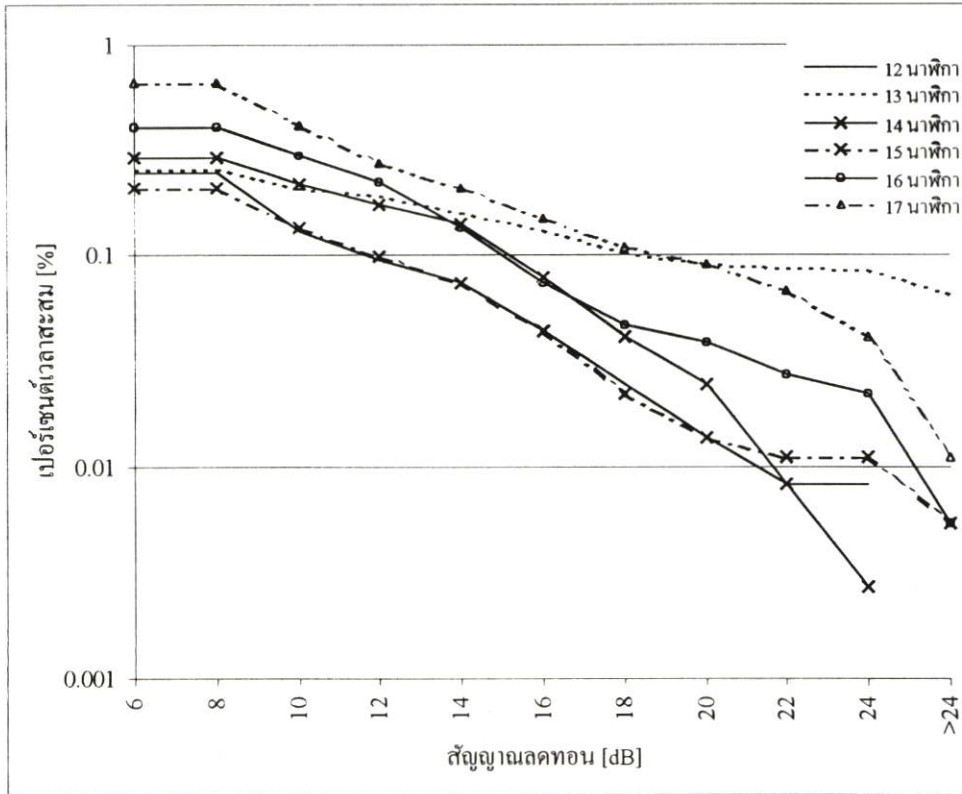


ก)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมการลดทอนสัญญาณในช่วงเวลา 0-5 นาที

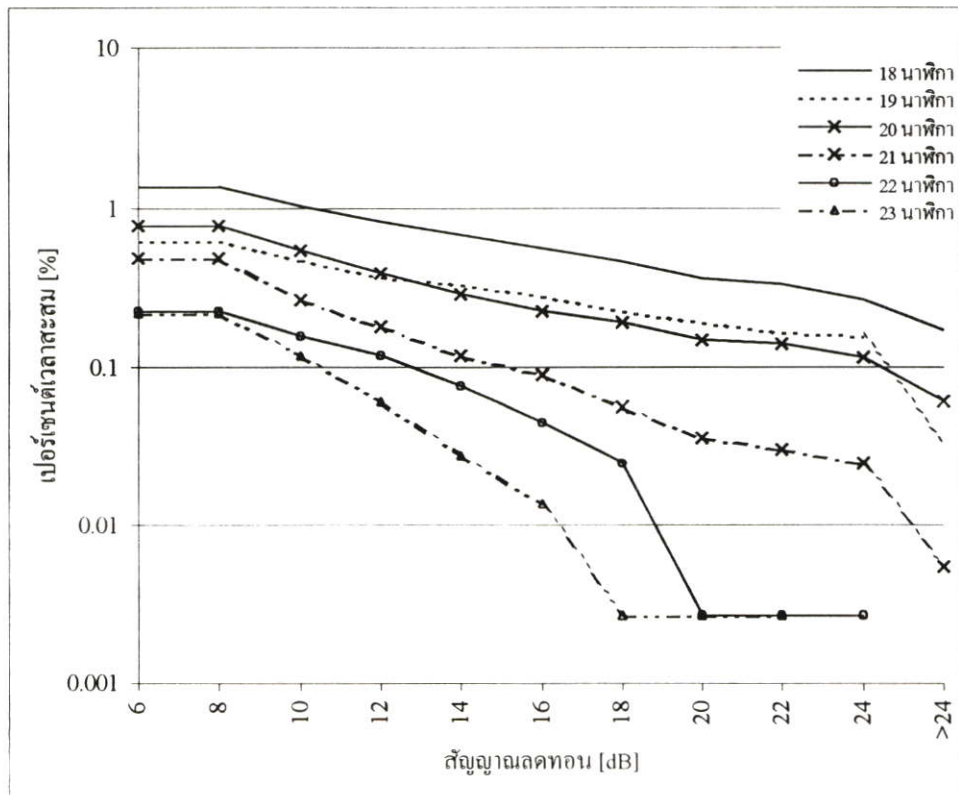


ข)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมการลดทอนสัญญาณในช่วงเวลา 6-11 นาที

รูปที่ 3.26 เปอร์เซนต์เวลาสะสมของการลดทอนสัญญาณนำร่องที่สูงกว่าค่าแกนนอน
ในแต่ละชั่วโมง จาก ก.พ.43 ถึง ก.ย.44



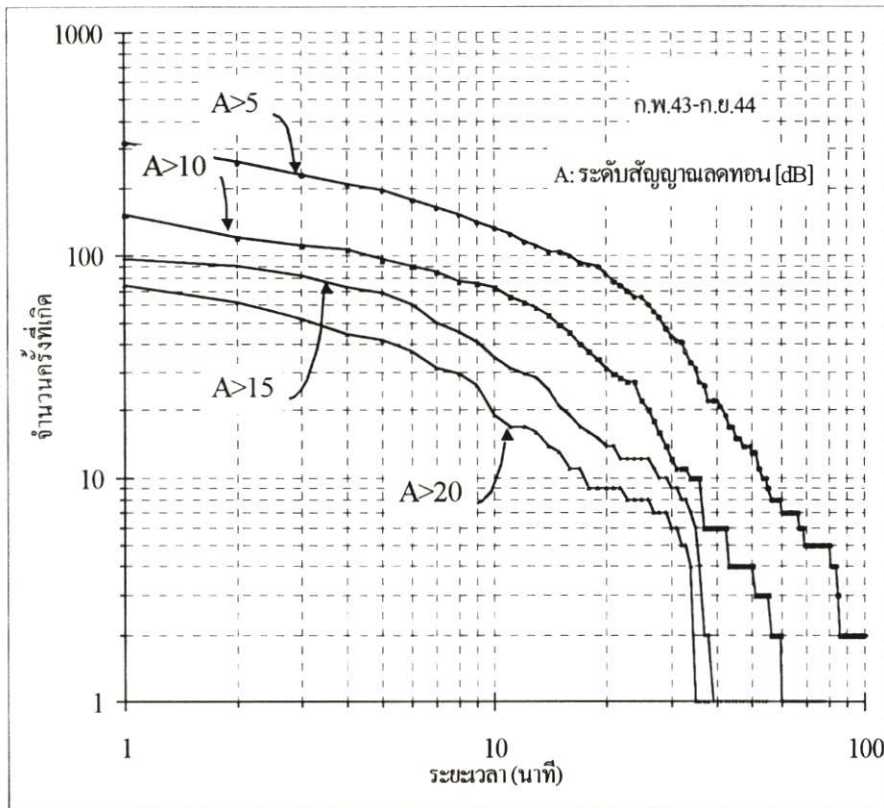
ค)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมการลดทอนสัญญาณในช่วงเวลา 12-17 นาที



ง)เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมการลดทอนสัญญาณในช่วงเวลา 18-23 นาที

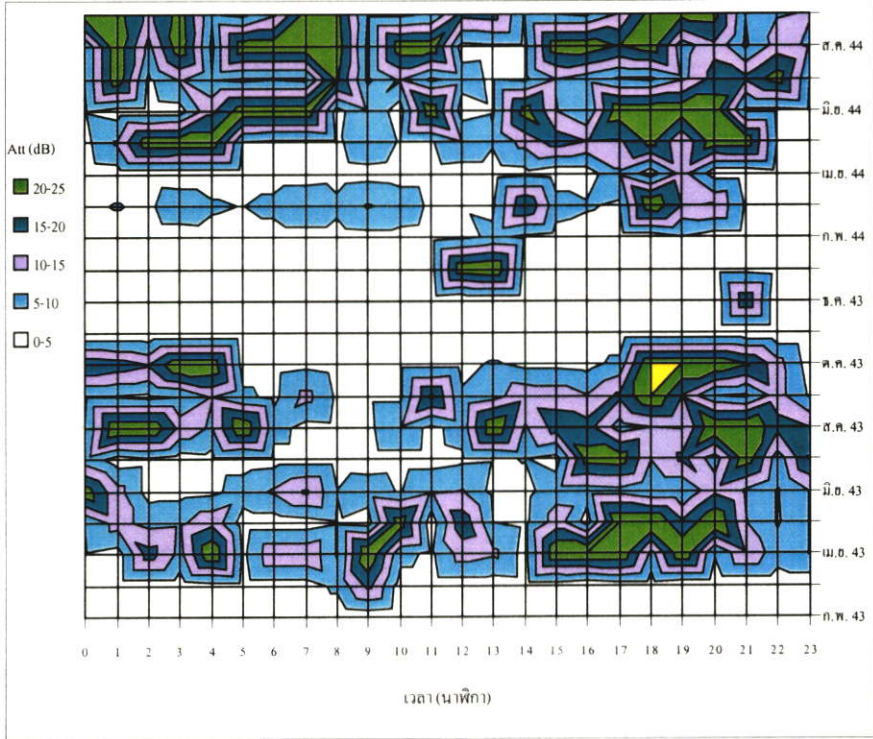
รูปที่ 3.26 (ต่อ)

เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาการลดทอนของสัญญาณนำร่อง โดยการหาจำนวนนาฬิกาที่เกิดการลดทอนที่ต่อเนื่องกัน ว่ายาวนานเท่าไร มีการลดทอนไปเท่าไร และเกิดขึ้นกี่ครั้งในช่วงเวลาที่สนใจ โดยกำหนดให้เหตุการณ์การลดทอนสัญญาณหนึ่งเหตุการณ์เริ่มจากนาฬิกาที่สัญญาณมีการลดทอนสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ ในที่นี้คือ 5, 10, 15 และ 20 dB เป็นนาฬิกาเริ่มต้นและมีการลดทอนสูงกว่าค่าเหล่านี้ทันที เมื่อการลดทอนของสัญญาณต่ำกว่าค่าเหล่านี้ก็จะคิดเป็นหนึ่งครั้งของการลดทอนที่มีระดับสูงกว่าค่าที่กำหนดและเป็นระยะเวลาที่นับได้เป็นนาฬิกา ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 3.27

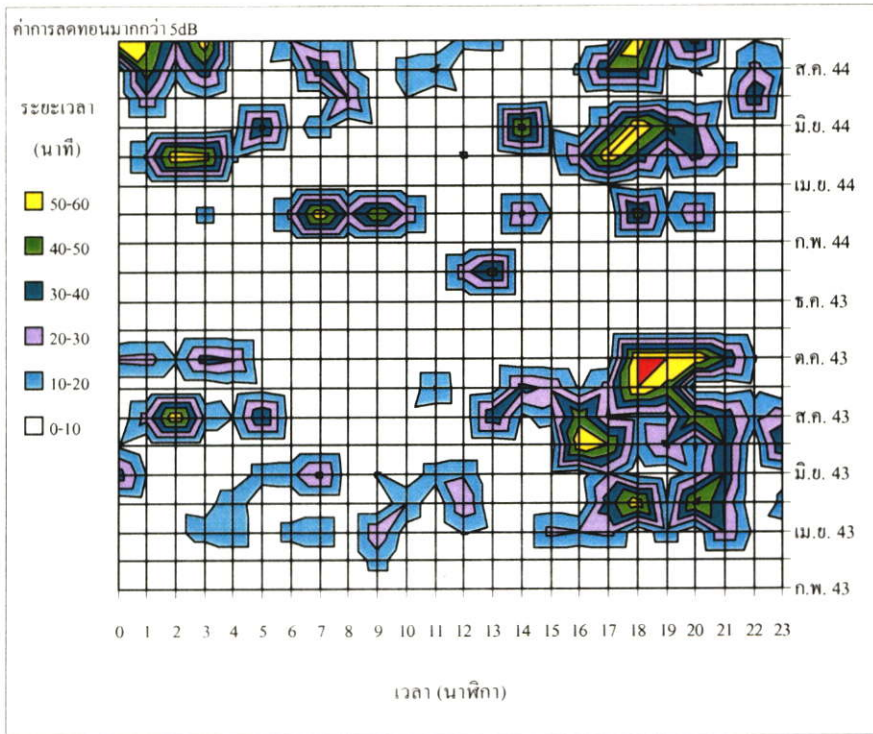


รูปที่ 3.27 ระยะเวลาและจำนวนครั้งที่เกิดในแต่ละระดับของการลดทอนของสัญญาณนำร่อง

เมื่อนำข้อมูลการลดทอนสัญญาณนำร่องทั้งหมดมาทำเป็นแผนภาพของค่าการลดทอนสูงสุดในแต่ละชั่วโมง โดยการหาค่าการลดทอนสูงสุดในแต่ละชั่วโมงของทั้งเดือนแล้วนำมาพล็อตลงบนแผนภาพจะได้ดังรูปที่ 3.28 ส่วนรูปที่ 3.29 แสดงระยะเวลาที่สัญญาณนำร่องมีการลดทอนสูงกว่า 5, 10, 15 และ 20 dB ติดต่อกัน ตามลำดับ

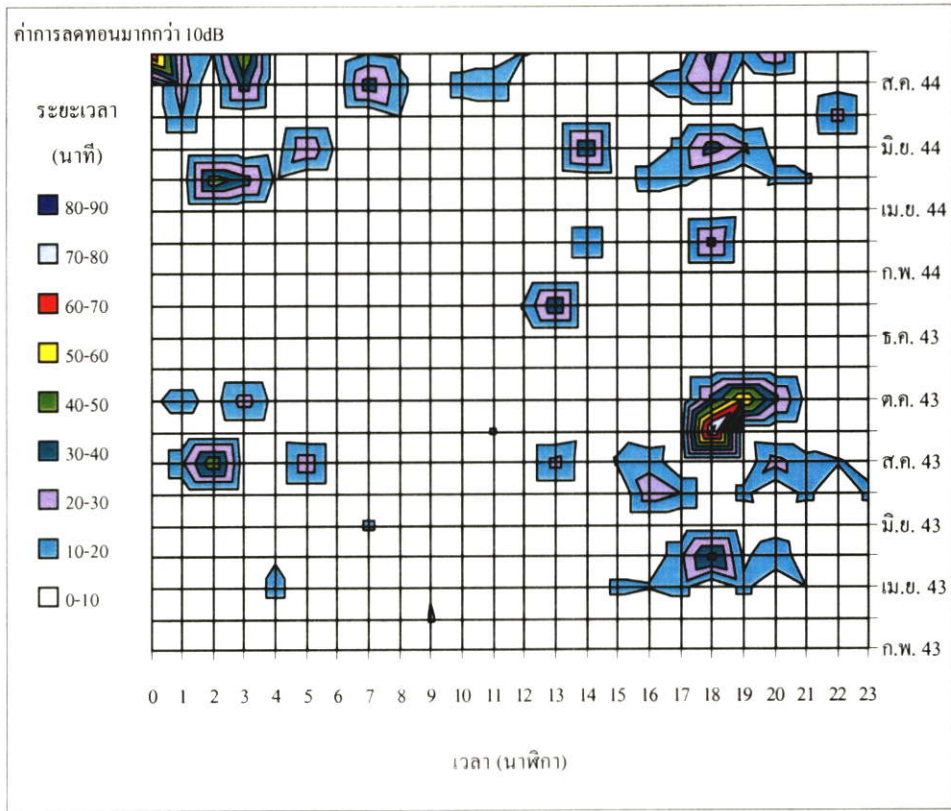


รูปที่ 3.28 แผนภาพการลดทอนสัญญาณรบกวนสูงสุดแต่ละชั่วโมงในแต่ละเดือน

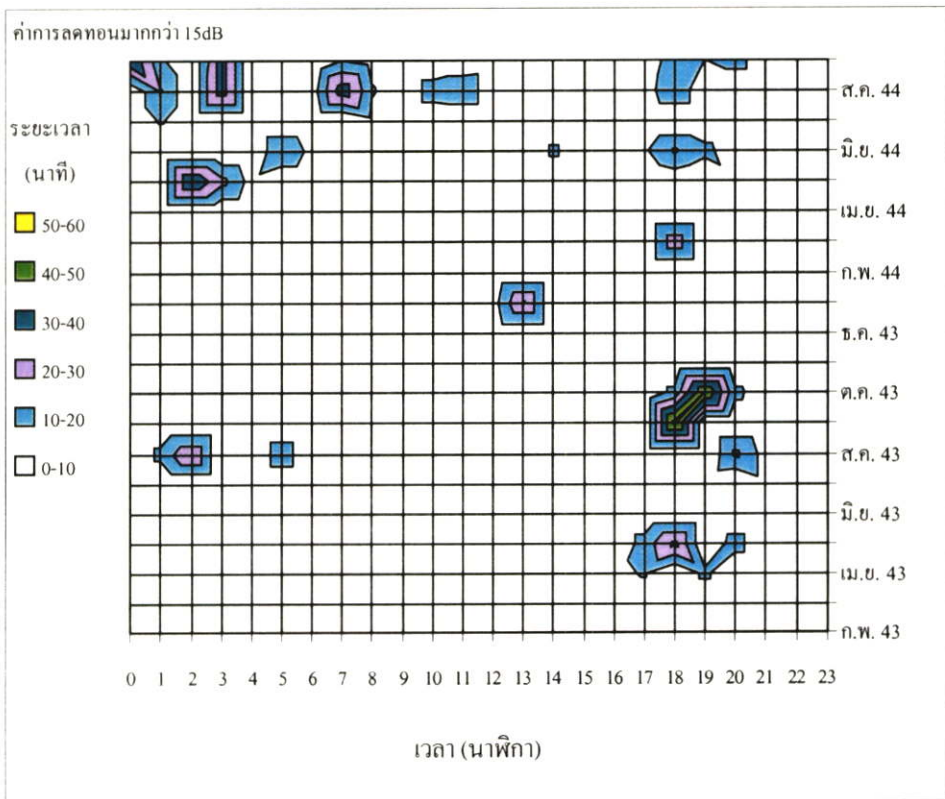


ก) ระยะเวลาที่สัญญาณลดทอนสูงกว่า 5 dB

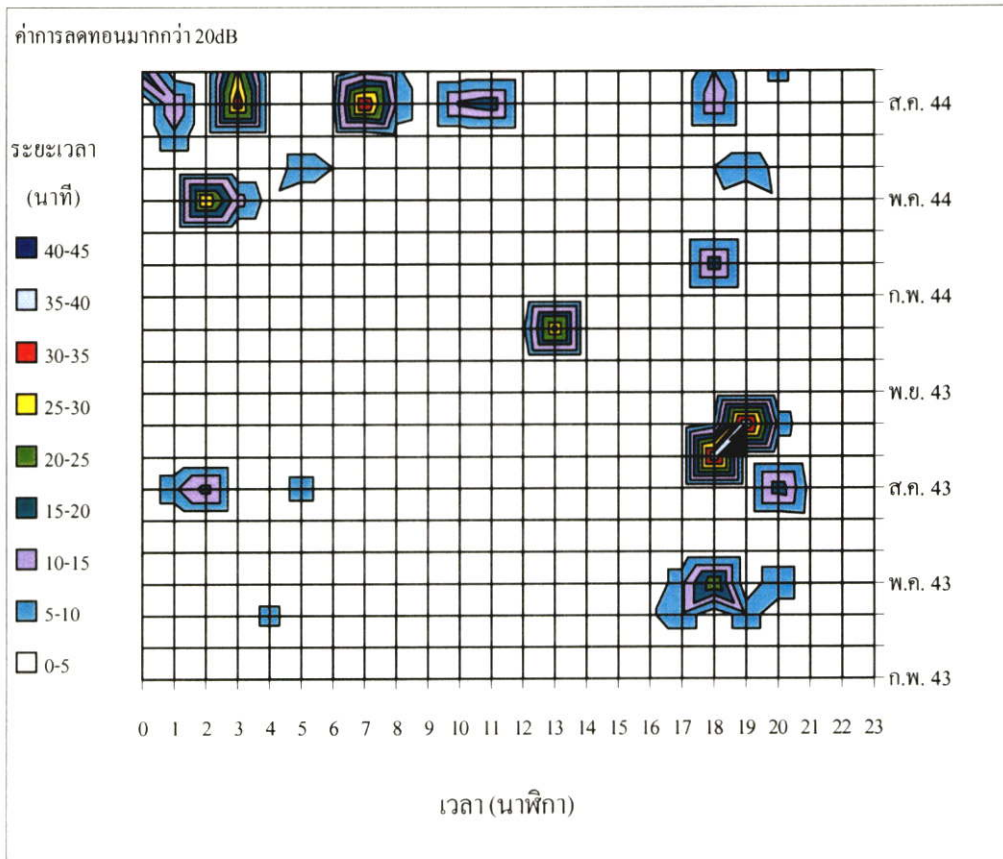
รูปที่ 3.29 ระยะเวลาที่การลดทอนของสัญญาณรบกวนสูงกว่าค่าที่สนใจ



ข) ระยะเวลาที่สัญญาณรบกวนสูงกว่า 10dB



ค) ระยะเวลาที่สัญญาณรบกวนสูงกว่า 15 dB

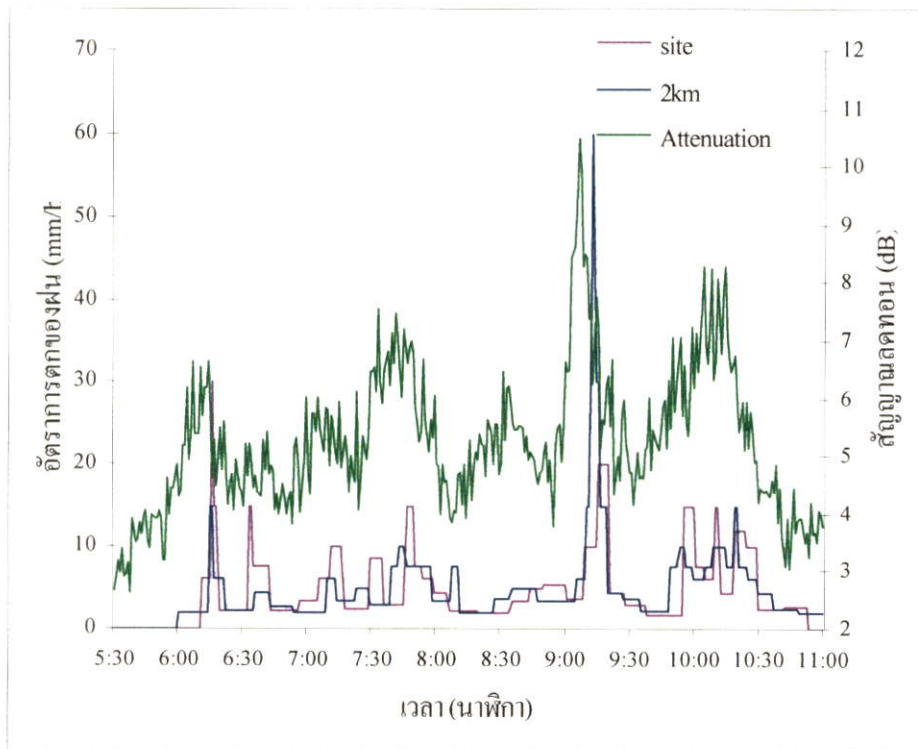


ง) ระยะเวลาที่สัญญาณลดทอนสูงกว่า 20 dB

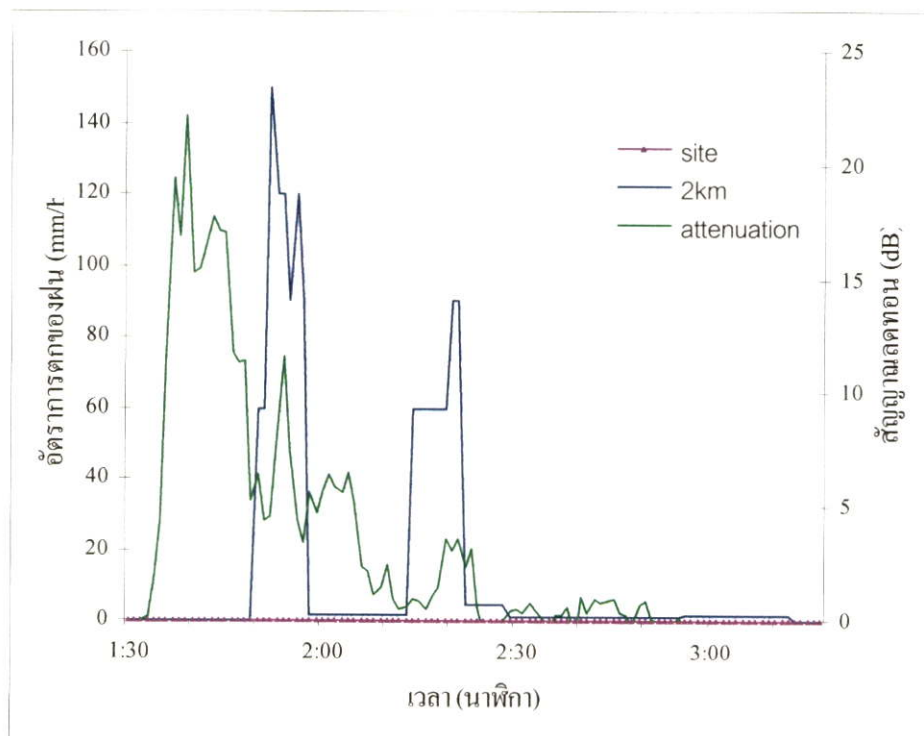
รูปที่ 3.29 (ต่อ)

3.2.4 ลักษณะการตกของฝนที่ได้จากการวัด 2 จุด

ในหัวข้อที่แล้วเป็นผลทางสถิติของการอัตราการตกของสัญญาณดาวเทียมและอัตราการตกของฝนที่ทำการวัดที่เดียวกับงานสายอากาศ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการวัดอัตราการตกของฝนที่ระยะประมาณ 2 กิโลเมตร ในเส้นทางแพร์คลีน ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นของบทนี้ ระยะเวลาที่ได้ทำการวัด เริ่มตั้งแต่ เดือน กุมภาพันธ์ ถึง กันยายน 2544 รูปที่ 3.30 เป็นตัวอย่างของเหตุการณ์ฝน จะเห็นว่าในรูป (ก) นั้น อัตราการตกของฝนไม่สูงมากนัก ระยะเวลาสั้น และตกเป็นบริเวณกว้าง เพราะสามารถวัดอัตราการตกของฝนได้ทั้ง 2 จุดวัด และมีอัตราการตกของฝนที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นช่วงเวลาประมาณ 9:20น. ส่วนในรูป (ข) เป็นเหตุการณ์ฝนที่มีอัตราการตกของฝนสูง ระยะเวลาและ บริเวณไม่กว้างนัก เพราะเวลาที่ จุดวัดที่งานสายอากาศนั้น (site) ไม่มีข้อมูลฝนตก ในขณะที่ จุดวัดที่ระยะ 2 กิโลเมตร สามารถวัดอัตราการตกของฝนได้ และสัญญาณถูกลดทอนไปอย่างมาก



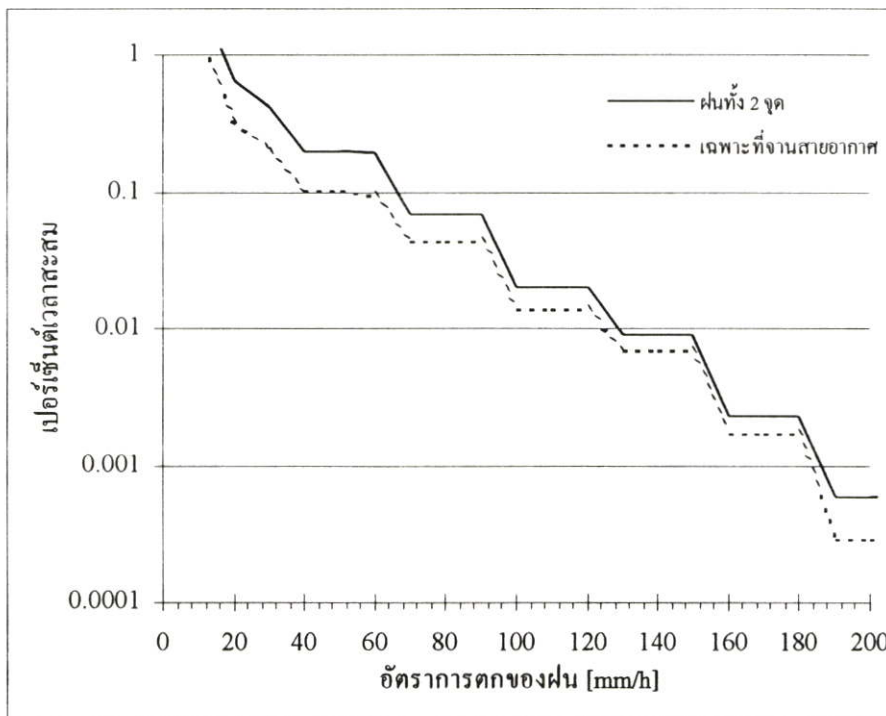
(ก)ฝนตกเป็นบริเวณกว้างและเป็นเวลานาน



(ข)ฝนตกบริเวณไม่กว้างมาก

รูปที่ 3.30 ตัวอย่างอัตราการตกของฝนทั้ง 2 จุดและค่าสัญญาณลดทอน

จะเห็นได้ว่าในบางเหตุการณ์ฝน ไม่มีฝนตกที่บริเวณงานสายอากาศ แต่ที่ระยะห่างออกไป 2 กิโลเมตรมีฝนตก และทำให้สัญญาณถูกลดทอน เมื่อนำฝนที่ตกทั้ง 2 จุดมาหาเปอร์เซ็นต์เวลาในช่วงเวลา 8 เดือน คัดจากข้อมูลในช่วงเดือน กุมภาพันธ์ ถึง กันยายน 2544 ซึ่งเป็นช่วงที่เวลาส่วนใหญ่เป็นช่วงฤดูฝน จึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์เวลามีค่าสูง คือที่เปอร์เซ็นต์เวลา 0.01% หรือ ประมาณ 35 นาทีในช่วงเวลา 8 เดือน ของข้อมูลที่ได้เฉพาะที่งานสายอากาศจุดเดียวและค่าที่ได้จากการคิดฝนทั้ง 2 จุดคือ 125 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงและ 129 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ที่พิจารณาที่ 0.01% ของเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมเพราะเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณในแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณความถี่วิทยุเนื่องจากฝน ค่าอัตราการตกของฝนที่แตกต่างกันจะให้ค่าที่ได้จากการทำนายต่างกัน ซึ่งจะได้อีกกล่าวในรายละเอียดภายหลัง



รูปที่ 3.31 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมของอัตราการตกของฝนที่ได้จากการวัดจุดเดียว และ 2 จุด

จากรูปที่ 3.30 ฝนที่ตกนั้นบางครั้งมีบริเวณที่ไม่กว้างมากนัก เมื่อพิจารณาระยะเวลาห่างกันของการตกของฝนที่จุดสังเกต ทั้ง 2 จุด โดยใช้ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) เป็นตัวชี้เวลาที่แตกต่างกันของจุดสังเกตทั้งสองจุด คือค่าช่วงเวลาที่ให้ค่าสหสัมพันธ์สูงสุด ค่าอัตราการตกของฝนสูงสุดของแต่ละจุดสังเกต และคาบเวลาในการตกของฝน โดยคิดจากเวลาที่ฝนเริ่มตกที่จุดสังเกตจุดใดจุดหนึ่ง จนกระทั่งฝนหยุดตกทั้ง 2 จุดสังเกต ในการหาค่าสหสัมพันธ์สูงสุดนั้นทำโดยการเลื่อนข้อมูลฝนของจุดสังเกตที่ 2 กิโลเมตรผ่านข้อมูลฝนของจุดสังเกตที่งานสายอากาศ หาช่วงห่างของ

ตำแหน่งที่ได้ค่าสหสัมพันธ์สูงสุดและตำแหน่งของเหตุการณ์ฝนจริงว่าห่างกันกี่นาที ค่าที่ได้นี้จะ เป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ ค่าบวกหมายถึงตำแหน่งที่ให้ค่าสหสัมพันธ์สูงสุดนั้นเกิดขึ้นเมื่อข้อมูล ฝนที่จุดสังเกตที่ 2 กิโลเมตร เกิดช้ากว่าเหตุการณ์ฝนจริง ในทางกลับกันค่าลบหมายถึงข้อมูลฝนที่ จุดสังเกตที่ 2 กิโลเมตร เกิดเร็วกว่าเหตุการณ์ฝนจริง จึงจะได้ค่าสหสัมพันธ์สูงสุด นอกจากนี้ค่าช่วง ห่างที่ได้นี้ยังแยกออกเป็นเหตุการณ์ฝนนั้นเกิดที่จุดสังเกตใดก่อนระหว่างที่จุดสังเกตที่งานสาย อากาศ หรือจุดสังเกตที่ 2 กิโลเมตร ดังในตารางที่ 3.3 ซึ่งคิดเฉพาะเหตุการณ์ฝนที่ตกทั้งสองจุด สังเกต

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบเหตุการณ์ฝนที่ได้จาก 2 จุดสังเกต

เดือน-ปี	อัตราการตกของ ฝนสูงสุด (mm/h)		ค่า สหสัมพันธ์	ช่วงเวลาที่แตกต่าง (นาที)		ค่า สหสัมพันธ์ สูงสุด	คาบเวลา (นาที)
	KMITL	2 กม.		KMITL นำ	2 กม. นำ		
ก.พ. 44	-	-	-	-	-	-	-
มี.ค. 44	60	60	0.70377003		2	0.769541	35
	30	30	0.28149027		29	0.5583659	41
	10	30	0.56340008	3		0.7076151	32
	30	15	0.83786382		7	0.8359922	44
	30	60	0.65921549		2	0.7234969	304
	60	15	0.80813084	0		0.8081308	20
	60	120	0.05802852		7	0.9550579	26
	15	30	0.2108049	-6		0.9122377	65
	90	90	0.50272084	-13		0.8556002	80
	30	90	0.15748666	-5		0.8595688	17
เม.ย. 44	60	30	0.43071652	-15		0.7209156	33
พ.ค. 44	30	30	0.54486259	-5		0.9050128	76
	180	180	0.50373717		-7	0.9229263	98
	60	1.5	0.3917131	-9		0.5538013	30
	180	90	0.25676612	-15		0.66013	124
	90	60	0.12674629	-10		0.8076969	30
	90	60	0.11619087	-12		0.6458889	106
	90	60	0.34404165	-12		0.5257871	163

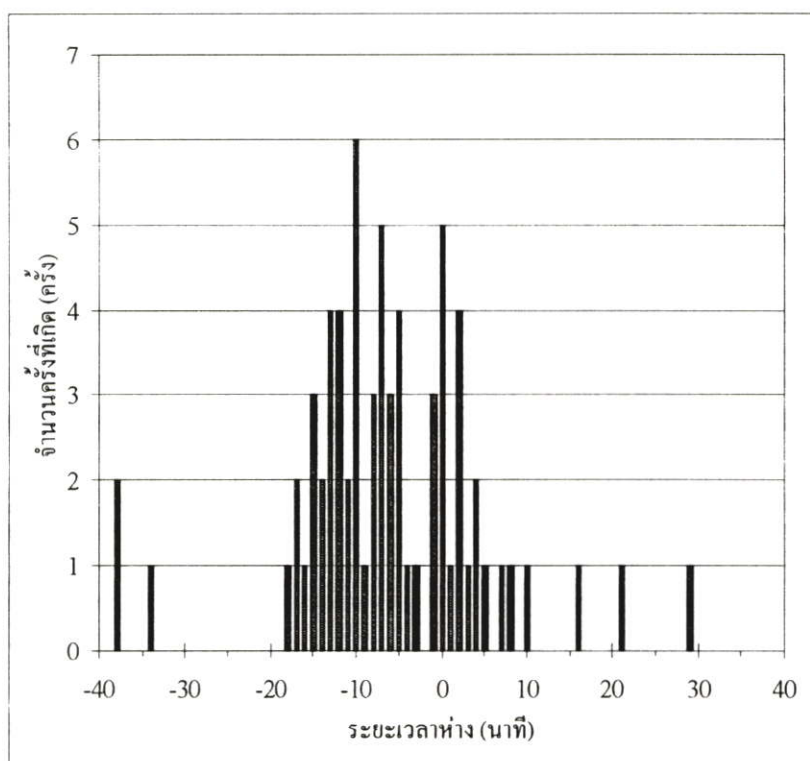
ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

เดือน-ปี	อัตราการตกของ ฝนสูงสุด (mm/h)		ค่า สหสัมพันธ์	ช่วงเวลาที่แตกต่าง (นาที)		ค่า สหสัมพันธ์ สูงสุด	คาบเวลา (นาที)
	KMITL	2 กม.		KMITL นำ	2 กม. นำ		
พ.ค. 44	30	60	-0.173538	-15		0.6935484	21
	150	90	0.05059428	-17		0.84014	80
	90	60	0.02095368	-38		0.8874066	48
	30	60	0.48812679	4		0.6035169	49
	60	30	0.3957435	-7		0.722445	30
	90	15	-0.3742521	-10		0.6129253	40
มิ.ย. 44	12	60	0.58338547		16	0.7576743	78
	90	30	0.09498616	-12		0.5524876	104
	7.5	15	0.82274828	-1		0.827803	61
	7.5	5	0.7069783		-5	0.7452708	45
	150	150	0.34853475	-13		0.6701556	66
	120	90	0.21948778	-7		0.833864	48
	90	60	-0.0054609	-10		0.9440664	20
	60	15	0.14064789	-18		0.6595887	39
	90	60	0.53219327	-3		0.7821193	41
	15	30	0.37867498	5		0.7235397	27
	60	30	0.52114321	-8		0.7383574	64
	90	90	0.50708435	-7		0.8322537	33
	30	90	0.84974412	0		0.8497441	53
	30	30	-0.0108753	-7		0.9026539	16
	90	90	-0.014376	-11		0.7923868	31
ก.ค. 44	90	90	0.42611917	-6		0.8842106	50
	120	90	0.46167708	-10		0.9128016	91
	6	15	0.5647661		10	0.7338259	78
	20	60	0.62886091	0		0.6288609	46
	60	120	0.56808902	-1		0.6415652	67
	40	120	0.2260568		21	0.7580751	65
	60	60	0.18387632	-13		0.8111085	39

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

เดือน-ปี	อัตราการตกของ ฝนสูงสุด (mm/h)		ค่า สหสัมพันธ์	ช่วงเวลาที่แตกต่าง (นาที)		ค่า สหสัมพันธ์ สูงสุด	คาบเวลา (นาที)
	KMITL	2 กม.		KMITL นำ	2 กม. นำ		
ส.ค. 44	30	15	0.32009191	-14		0.80604	31
	45	60	0.7192054		-6	0.7622971	153
	60	60	0.62723959		-4	0.7937244	89
	60	30	0.06855496		-8	0.4449352	43
	3	10	0.26060318		4	0.6412283	36
	30	6	0.37859763	2		0.4648972	37
	90	60	0.24009728	-10		0.7861058	106
	120	90	0.51700156	-8		0.8973741	283
	15	30	0.25470071	-13		0.7881582	87
ก.ย. 44	150	330	0.22350622	-38		0.6291359	67
	60	60	0.21256123	-12		0.828863	46
	60	60	0.16285394	-16		0.9165499	53
	210	90	0.20757398	-14		0.5513305	122
	30	15	0.33654628		-10	0.6369576	50
	30	30	0.08094192	-17		0.6899709	23
	60	60	0.3160261	-11		0.9771346	140
	150	60	0.21349764	-34		0.6050662	154
	180	120	0.72293149		2	0.778013	77
	60	60	0.83586352	0		0.8358635	102
	120	2.7	0.93681905		1	0.9616564	43
	7.5	6	0.81100694		-5	0.8565744	100
	90	90	0.67714463	8		0.7451137	112
	60	60	0.69969504		-0	0.8134076	15

เมื่อพิจารณาถึงจำนวนครั้งที่เกิดของเหตุการณ์ฝนที่มีค่าความต่างของเวลาต่างๆ จะได้ดังรูปที่ 3.32 ค่าความต่างของเวลาที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นค่าลบ หมายความว่า จะเหตุการณ์ฝนที่งานสายอากาศเกิดขึ้นก่อนและตามด้วยที่ระยะ 2 กิโลเมตรเกิดบ้อยที่สุดที่เวลา -10 นาที และส่วนใหญ่จะเกิดบ้อยในช่วง +10 ถึง -20 นาที

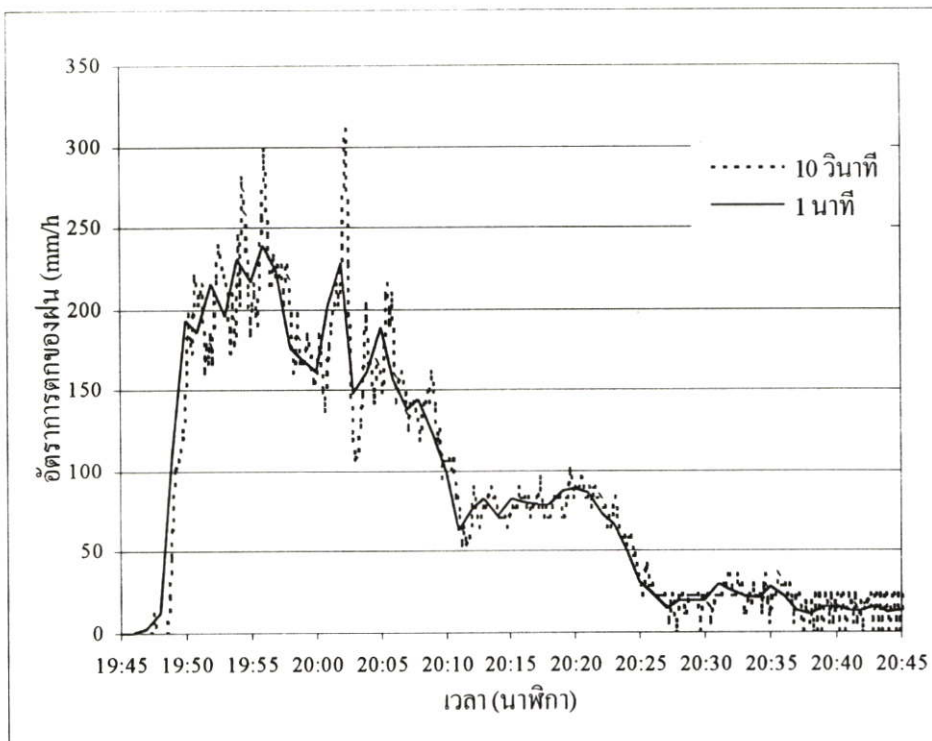


รูปที่ 3.32 ระยะเวลา และจำนวนครั้งที่เกิดของเหตุการณ์ฝน

3.2.5 การวัดอัตราการตกของฝนด้วยเครื่องวัดที่มีความละเอียดสูง

ผลการทดลองที่ได้นำเสนอมาข้างต้นเป็นข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณของฝนแบบ Tipping Bucket ดังรูปที่ 3.7 ที่มีความละเอียดอยู่ที่ 0.5 มิลลิเมตรต่อ พัลส์ หรือ 30 มิลลิเมตรต่อ ชั่วโมง เมื่อวัดอัตราการตกของฝนเป็นรายนาที ทำให้ค่าอัตราการตกของฝนที่ได้ไม่ละเอียดนัก เครื่องมือวัดปริมาณของฝนที่ละเอียดกว่าแบบ Tipping Bucket: TP ที่ใช้คือ เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบ นับหยดน้ำ (Rain Drop type Rain Gauge: RD) ดังรูปที่ 3.8 ที่มีความละเอียดอยู่ที่ 0.0083 มิลลิเมตรต่อ 1 พัลส์ หรือ 0.5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เมื่อวัดอัตราการตกของฝนเป็นรายนาที แต่ในความเป็นจริงอัตราการตกของฝนไม่ได้เท่ากันตลอดในช่วงเวลา 1 นาที ทำให้ค่าที่ได้จากเครื่องวัดชนิด RD นี้ต่ำลง สาเหตุที่ทำการวัดอัตราการตกของฝนเป็นรายนาที เพราะว่าสัญญาณนำร่องของดาวเทียมเป็นข้อมูลรายนาทีที่ได้จากเฉลี่ยข้อมูลรายวินาที การวัดปริมาณน้ำฝนเป็นราย 10 วินาที

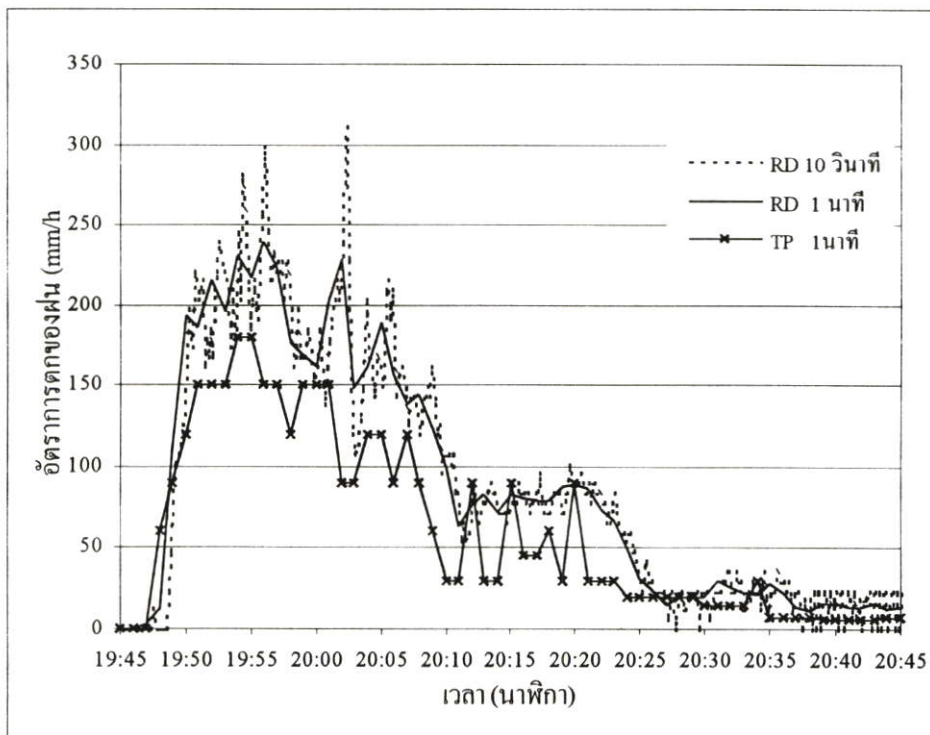
ทำให้ความละเอียดเป็น 3 มิลลิเมตรต่อ พัลส์ ต่อนาที นอกจากลดคาบเวลาจาก 1 นาทีเป็น 10 วินาที ยังทำการลดพื้นที่ปากกระบอกของเครื่องวัดลงครึ่งหนึ่ง ทำให้ความละเอียดกลายเป็น 6 มิลลิเมตรต่อ พัลส์ ต่อนาที สาเหตุที่ทำให้ต้องลดพื้นที่ปากกระบอกของเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนลงเพราะว่า ในกรณีที่ฝนตกหนักมากทำให้ไม่สามารถวัดปริมาณน้ำฝนได้ ถัดพื้นที่ปากกระบอกลงครึ่งหนึ่ง จะทำให้วัดอัตราการตกของฝนได้สูงขึ้นเป็น 2 เท่าของพื้นที่เดิม และจากการทดสอบโดยการปล่อย น้ำด้วยอัตราไหลคงที่ ค่าสูงสุดที่สามารถวัดได้คือ 140 พัลส์ต่อ 10 วินาที หรือเท่ากับ 840 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ด้วยวิธีการนี้เมื่อนำมาคิดค่า เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมของอัตราการตกของฝนแล้วจะได้ค่าที่สูงกว่าที่ได้จากเครื่องวัดแบบ Tipping Bucket ความแตกต่างระหว่างอัตราการตกของฝนราย นาที และราย 10 วินาที แสดงไว้ในรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอัตราการตกของฝนราย 10 วินาที และ 1 นาที

จากรูปที่ 3.33 ค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลอัตราการตกของฝนราย 10 วินาที และข้อมูลอัตราการตกของฝนรายนาที ในกรณีที่อัตราการตกของฝนสูงกว่า 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างมากอย่างเห็นได้ชัด เมื่อนำข้อมูลอัตราการตกของฝนที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบ RD เทียบกับข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบ Tipping Bucket จะได้ดังรูปที่ 3.34 จะเห็นว่าค่าอัตราการตกของฝนที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบ Tipping Bucket ต่ำกว่า อัตราการตกของฝนที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบ RD

จากรูป สามารถที่จะพูดได้ว่าควรใช้ข้อมูลอัตราการตกของฝนที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบ RD ในการหาค่าการกระจายเวลาสะสมของอัตราการตกของฝนที่มีความจำเป็นในการออกแบบระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมในความถี่ย่านนี้



รูปที่ 3.34 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบ RD และ TP

จากรูปที่ 3.33 และ 3.34 จะเห็นว่านอกจากประเภทของเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแล้ว ระยะเวลาที่ใช้ในการสุ่มข้อมูลก็ยังมีผลเป็นอย่างมากต่อค่าอัตราการตกของฝนที่วัดได้ จะเห็นว่าอัตราการตกของฝนที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบ RD ที่ทำการสุ่มข้อมูลด้วยระยะเวลา 10 วินาที จะให้ค่าอัตราการตกของฝนที่สูงกว่าการสุ่มข้อมูลด้วยระยะเวลา 1 นาที ประมาณ 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และสูงกว่าอัตราการตกของฝนที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบ TP ประมาณ 150 ถึง 200 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งผลที่ได้นี้เป็นประโยชน์ในการศึกษาคุณลักษณะของฝนในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรต่อไป

3.3 แบบจำลองการลดทอนเนื่องจากฝนของ ITU-R และ Crane

การประมาณค่าผลกระทบจากฝนในการออกแบบระบบความถี่ความต้องการข้อมูลทางสถิติของการลดทอนสำหรับแต่ละบริเวณของสถานีภาคพื้นดิน การวัดการลดทอนเนื่องจากฝนระยะยาวโดยตรงทุกๆ สถานีภาคพื้นดินของเครือข่ายที่ใช้งานนั้นไม่สามารถทำได้ ดังนั้นแบบจำลองและวิธีการทำนายจึงถูกใช้เพื่อเป็นการประมาณค่าลดทอนแต่ละสถานี มีการพยายามพัฒนาปรับปรุงเทคนิคสำหรับทำนายการลดทอนเนื่องจากฝนในแนวการแพร่คลื่นที่สถานีและความถี่ที่ต้องการเทคนิคที่ใช้ในการทำนายต่างใช้อัตราการตกของฝนที่บริเวณผิวดินเป็นตัวแปรทางสถิติเหมือนกัน และสมมุติให้ aR^b เป็นความสัมพันธ์ของฝนที่ทำให้เกิดการลดทอน ตามปกติ แบบจำลองการทำนายสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$A(\text{dB}) = aR^b L(R)$$

เมื่อ R คืออัตราการตกของฝน a และ b คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับความถี่ และ $L(R)$ คือความยาวของแนวแพร่คลื่นประสิทธิผล ในการพัฒนาแบบจำลองการลดทอนเนื่องจากฝนในช่วงแรกมุ่งไปยังวิธีการเชิงปฏิบัติที่อธิบายการกระจายของอัตราการตกของฝนในรูปแบบที่ขึ้นกับบริเวณ หนึ่งในแบบจำลองแรกๆ ที่พยายามสรุปรวมเทคนิคการทำนายการลดทอนเนื่องจากฝนเกิดจากการประชุมของ International Radio Consultation Committee, CCIR ในเดือน เมษายน 1972 ซึ่ง CCIR ใช้วิธีการประมาณค่าการกระจายตัวสะสมของฝนโดยใช้หลักการแบ่งฝนออกเป็นเขตๆ เทคนิคนี้มีการประมาณค่าหยาบ เพราะว่าการแบ่งเขตมีจำนวนจำกัดและข้อมูลสัญญาณนำร่องมีน้อย

3.3.1 แบบจำลองการลดทอนเนื่องจากฝนของ Crane

แบบจำลองการลดทอนเนื่องจากฝนของ Crane เป็นแบบจำลองแรกๆ ที่มีการตีพิมพ์อย่างแพร่หลาย เป็นแบบจำลองที่ทำนายการลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝนได้ทั่วโลก ถูกพัฒนาโดย R.K.Crane [1] แบบจำลองของ Crane นี้อยู่บนพื้นฐานการใช้ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ในการพิจารณาอัตราการตกของฝนระดับผิวดินที่จุดนั้นๆ หรือฝนแบบจุด (point rain rate) การเปลี่ยนแปลงของอัตราการตกของฝนจากแบบจุดให้เป็นอัตราการตกของฝนในแนวการแพร่คลื่น

ในการคำนวณแบบจำลองของ Crane มีตัวแปรที่ต้องทราบคือ ความถี่ (f) มีหน่วยเป็น GHz, มุมเงยงานสายอากาศ (θ) มีหน่วยเป็นองศา, ความสูงของสถานีภาคพื้นดินเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง (G) มีหน่วยเป็นกิโลเมตร และเส้นรุ้งของสถานีภาคพื้นดิน (ϕ) มีหน่วยเป็นองศา

ค่าเฉลี่ยการกระจายการลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝน เฉลี่ยต่อปีหาได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 หาค่าการกระจายของอัตราการตกของฝนทั้งปี, R_p , ที่ค่าความน่าจะเป็น p , จาก 2% ถึง 0.001% ของค่าเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ที่สนใจ ค่า R_p นี้ควรเป็นค่าของพื้นที่นั้น แต่ถ้าไม่มีข้อมูลของพื้นที่นั้น ก็สามารถใช้ค่า R_p ที่เหมาะสมจากตารางที่ได้จากการแบ่งเขตของ Crane [1]

ขั้นที่ 2 หาค่าความสูงของ 0° , H_p , ของแต่ละเปอร์เซ็นต์ของค่าความน่าจะเป็น p เฉลี่ยต่อปี จากกราฟใน [1] ค่าความสูงสำหรับค่า $p=0.001\%$, 0.01% , 0.1% และ 1% สามารถอ่านได้โดยตรงจากกราฟ และค่าความสูงที่ค่าความน่าจะเป็น p อื่นๆ สามารถหาได้โดยการทำการประมาณค่าในช่วง ระหว่างเส้นกราฟ p เหล่านั้น

ขั้นที่ 3 คำนวณเส้นทางการแพร่คลื่นในแนวระนาบ D สำหรับ แต่ละความน่าจะเป็นที่เปอร์เซ็นต์ p ของปี จากสมการต่อไปนี้ สำหรับ $\theta \geq 10^\circ$

$$D = \frac{H(p) - G}{\tan \theta}$$

เมื่อ $H(p)$ คือ ระดับความสูงที่ 0° ที่ได้จากขั้นที่ 2 G คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางของสถานีรับ และ θ คือมุมเงยของงานสายอากาศ

ที่มุมเงยน้อยกว่า 10° ต้องคิดผลของความโค้งของโลกด้วย นั่นคือ สำหรับ $\theta < 10^\circ$

$$D = R \sin^{-1} \left[\frac{\cos \theta}{H(p) + R} \left(\sqrt{(G + R)^2 \sin^2 \theta + 2R(H(p) - G) + H^2(p) - G^2} - (G + R) \sin \theta \right) \right]$$

เมื่อ R คือรัศมีประสิทธิผลของโลก สมมติให้เท่ากับ 8500 กิโลเมตร

ขั้นที่ 4 หาค่าสัมประสิทธิ์เฉพาะของการลดทอน a และ b ที่ความถี่และโพลาไรซ์ที่ต้องการ [25]

ขั้นที่ 5 หาค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง 4 ตัวต่อไปนี้ จากค่า R_p สำหรับแต่ละค่า p ที่สนใจ

$$d = 3.8 - 0.6 \ln R_p$$

$$x = 2.3 R_p - 0.17$$

$$y = 0.026 - 0.03 \ln R_p$$

$$U = \frac{\ln(xe^{Yd})}{d}$$

ขั้นที่ 6 ค่าเฉลี่ยของการลดทอนเนื่องจากฝนตามแนวการแพร่คลื่นที่แต่ละความน่าจะเป็นของการเกิด p ได้จากสมการ

a) ถ้า $0 < D \leq d$

$$A(p) = \frac{aR_p^b}{\cos \theta} \left[\frac{e^{U_b D} - 1}{U_b} \right]$$

b) ถ้า $d < D \leq 22.5$

$$A(p) = \frac{aR_p^b}{\cos \theta} \left[\frac{e^{U_b D} - 1}{U_b} - \frac{x e^{Y_b d}}{Y_b} + \frac{x^b e^{Y_b D}}{Y_b} \right]$$

c) ถ้า $D > 22.5$ การคำนวณค่า $A(p)$ ด้วยค่า $D=22.5$ แต่ใช้ค่าอัตราการตกของฝนใช้ R_p' แทน R_p ซึ่งได้จาก

$$p' = p \left[\frac{22.5}{D} \right]$$

ขั้นที่ 7 ประมาณขอบเขตด้านบนและด้านล่างของค่าเฉลี่ยการลดทอนเนื่องจากฝนในแนวการแพร่คลื่น ดังนี้

เปอร์เซ็นต์ต่อปี	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1.0	± 39
0.1	32
0.01	32
0.001	39

เช่นที่ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทำนายคือ 12 dB ที่ 0.01% ต่อปี จะได้ขอบเขตด้านบนและด้านล่างเป็น $\pm 32\%$ หรือ ± 3.84 dB

3.3.2 แบบจำลองการลดทอนเนื่องจากฝนของ ITU-R

International Telecommunication Union, ITU เป็นองค์กรที่ให้คำปรึกษา แนะนำ กำหนดมาตรฐาน ต่างๆ ในการสื่อสารระบบต่างๆ และกลุ่มศึกษาของ ITU ได้เสนอและปรับปรุงวิธีการทำนายการลดทอนเนื่องจากฝนและมีการปรับปรุงมาเรื่อยๆ จะขอกกล่าวถึงแบบจำลองของ ITU-R 2 ฉบับ คือ ITU-R P.618-4 และ ITU-R P.618-7 วิธีการคำนวณของทั้งสองฉบับนี้ต่างกัน

3.3.2.1 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลอง ITU-R P.618-4

การคำนวณค่าทางสถิติระยะยาวของการลดทอนเนื่องจากฝน จากอัตราการตกของฝนแบบจุด ในการคำนวณมีตัวแปรที่ต้องทราบดังนี้คือ $R_{0.01}$ (mm/hr) คือ อัตราการตกของฝนแบบจุดที่ 0.01% ของค่าเฉลี่ยต่อปีในแต่ละบริเวณ h_s (เมตร)คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางของสถานีรับ θ (องศา) คือ มุมเงยของงานสายอากาศ ρ (องศา) คือ เส้นรุ้งของสถานีภาคพื้นดิน f (GHz) คือความถี่รับ ลำดับการคำนวณคือ

ขั้นที่ 1 หาระดับความสูงของฝนจาก

$$hr = \begin{cases} 3.0 + 0.0028\Psi & 0 \leq \Psi < 36 \\ 4.0 - 0.075(\Psi - 36) & \Psi \geq 36 \end{cases}$$

ขั้นที่ 2 หาระยะทางของแนวการแพร่คลื่น L_s (km) จาก

$$\theta \geq 5^\circ \quad L_s = \frac{(hr - h_s)}{\sin \theta}$$

$$\theta < 5^\circ \quad L_s = \frac{2(hr - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(hr - h_s)}{Re} \right)^{1/2} + \sin \theta}$$

เมื่อ Re สมมุติให้เท่ากับ 8500 กิโลเมตร

ขั้นที่ 3 หาระยะทางในแนวระดับ, L_G (km), จาก ระยะ L_s

$$L_G = L_s \cos \theta$$

ขั้นที่ 4 คำนวณค่า reduction factor $r_{0.01}$ จาก

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + L_G / L_0}$$

$$L_0 = 35 \exp(-0.015 R_{0.01})$$

ขั้นที่ 5 หาค่าการลดทอนเฉพาะ, γ_R (dB/km), จาก

$$\gamma_R = \alpha(R0.01)^\beta$$

α และ β หาได้จาก ITU-R P.838

ขั้นที่ 6 ระยะทางประสิทธิผล, L_e (km), จาก

$$L_e = L_s r_{0.01}$$

ขั้นที่ 7 ค่าการลดทอนที่ได้จากการทำนายที่สูงกว่าค่า 0.01% ของเวลาเฉลี่ยต่อปี ได้จาก

$$A_{0.01} = \gamma_R L_e$$

ขั้นที่ 8 หาค่าการลดทอนที่เปอร์เซ็นต์อื่น, A_p (dB), จากค่า $A_{0.01}$ (ในช่วง $0.001 \leq p \leq 1$)

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = 0.12 p^{-(0.546 + 0.0431 \log_{10} p)}$$

3.3.2.2 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลอง ITU-R P.618-7

การคำนวณค่าทางสถิติระยะยาวของการลดทอนเนื่องจากฝน จากอัตราการตกของฝนแบบจุด กระบวนการต่อไปนี้เป็น การประมาณค่าทางสถิติระยะยาวของการลดทอนเนื่องจากฝนตามแนวการแพร่คลื่นที่บริเวณที่ต้องการที่ความถี่ไม่เกิน 55 GHz ในการคำนวณต้องทราบตัวแปรต่อไปนี้คือ

$R_{0.01}$ คือ อัตราการตกของฝนแบบจุดที่ 0.01% ของค่าเฉลี่ยต่อปีในแต่ละบริเวณ (mm/hr)

H_s คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางของสถานีรับ (km)

θ คือ มุมเงยงานสายอากาศ (องศา)

f คือ ความถี่ (GHz)

Re คือ รัศมีประสิทธิผลของโลก (8500 km)

ขั้นที่ 1 หาความสูงของฝน, h_r , จาก ITU-R P.839

ขั้นที่ 2 หาค่าความยาวของแนวการแพร่คลื่น, L_s , ที่ต่ำกว่าความสูงของฝน

$$\text{สำหรับ } \theta \geq 5^\circ \quad L_s = \frac{(h_r - h_s)}{\sin \theta}$$

$$\text{สำหรับ } \theta < 5^\circ \quad L_s = \frac{2(h_r - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_r - h_s)}{Re} \right)^{1/2} + \sin \theta}$$

ขั้นที่ 3 คำนวณระยะในแนวระนาบ, L_G , ของความยาวในแนวแพร์คลื่นจาก

$$L_G = L_s \cos \theta$$

ขั้นที่ 4 ค่าอัตราการตกของฝน, $R_{0.01}$, ที่ 0.01% ของเวลาเฉลี่ยทั้งปี (ข้อมูลรายนาทีก่อน) ถ้าข้อมูลทางสถิติระยะยาวนี้ไม่สามารถหาได้ในบริเวณที่ต้องการ สามารถที่จะประมาณค่าได้จากแผนที่อัตราการตกของฝนที่ได้จาก ITU-R P.837

ขั้นที่ 5 หาค่าการลดทอนเฉพาะ, γ_R , โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความถี่ที่เข้ามาใน ITU-R P.838 และอัตราการตกของฝน $R_{0.01}$, ที่ได้จากขั้นตอนที่ 4

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha \quad \text{dB/km}$$

ขั้นที่ 6 คำนวณค่า reduction factor ในแนวระนาบ, $r_{0.01}$, ที่ 0.01% ของเวลา

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})}$$

ขั้นที่ 7 คำนวณเฟดเดอร์ปรับค่าแนวตั้ง, $V_{0.01}$, ที่ 0.01% ของเวลา

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{hr - hs}{L_G r_{0.01}} \right) \quad \text{องศา}$$

$$\text{สำหรับ } \zeta > \theta \quad L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \quad \text{km}$$

$$\text{สำหรับ } \zeta \leq \theta \quad L_R = \frac{(hr - hs)}{\sin \theta} \quad \text{km}$$

$$\text{ถ้า } |\varphi| < 36^\circ \quad \chi = 36 - |\varphi| \quad \text{องศา}$$

$$\text{ถ้า นอกจากนี้} \quad \chi = 0 \quad \text{องศา}$$

$$V_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left[31 \left(-e^{-(\theta/(1+\chi))} \right) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2}} - 0.45 \right]}$$

ขั้นที่ 8 เส้นทางประสิทธิผลคือ

$$L_E = L_R V_{0.01} \quad \text{km}$$

ขั้นที่ 9 ค่าการลดทอนที่ได้จากการทำนายที่ 0.01% ของเวลาเฉลี่ยต่อปี ได้จาก

$$A_{0.01} = \gamma R L_E \quad \text{dB}$$

ขั้นที่ 10 ค่าประมาณการลดทอนที่ค่าเปอร์เซ็นต์เวลาอื่นๆ ของเวลาเฉลี่ยต่อปีในช่วง 0.001% ถึง 5% คำนวณจากค่าการลดทอนที่ค่า 0.01% ของเวลาเฉลี่ยทั้งปี

$$\text{กรณี } p \geq 1\% \text{ หรือ } |\varphi| \geq 36^\circ \quad \beta = 0$$

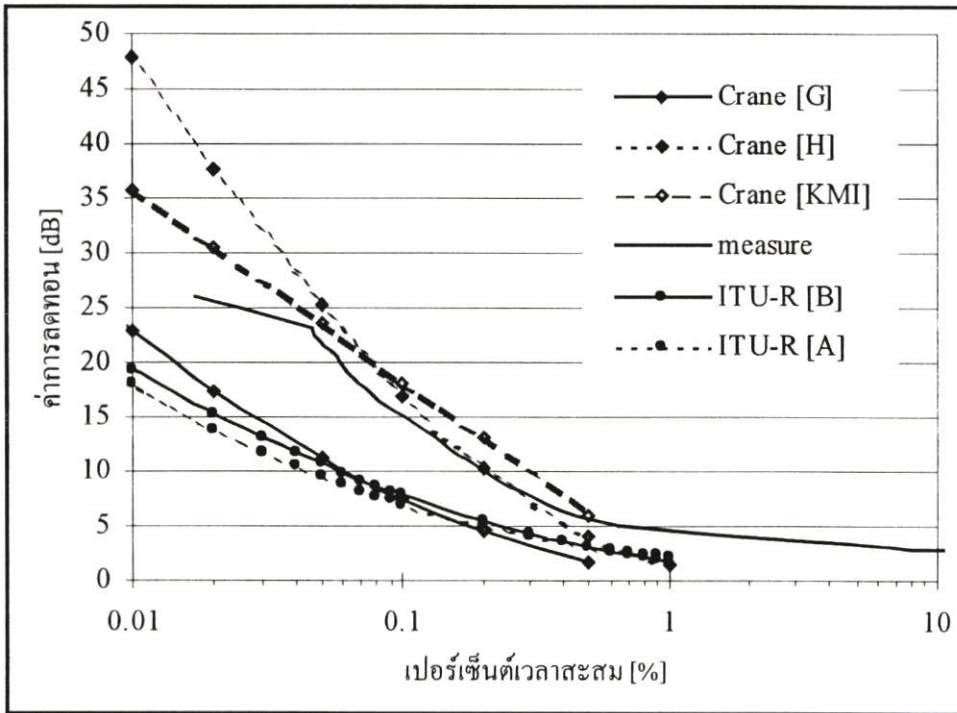
$$\text{กรณี } p < 1\% \text{ และ } |\varphi| < 36^\circ \text{ และ } \theta \geq 25^\circ \quad \beta = -0.005(|\varphi| - 36)$$

$$\text{นอกเหนือจากนี้} \quad \beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta$$

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \quad \text{dB}$$

3.3.3 เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของ ITU-R และ Crane

การลดทอนเนื่องจากฝนที่ได้จากการทดลอง และที่ได้จากแบบจำลองของ ITU-R และแบบจำลองของ Crane ดังในรูปที่ 3.35 ผลที่ได้จากการทดลองระยะเวลา 12 เดือน จากเดือนกุมภาพันธ์ 2543 ถึง เดือน มกราคม 2544 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองของ ITU-R และแบบจำลองของ Crane มีดังนี้ ความถี่ที่ใช้เท่ากับ 12.7475 GHz มุมเงยงานสายอากาศเท่ากับ 32 องศา ความสูงของสถานีภาคพื้นดินเท่ากับ 0.05 กิโลเมตรเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง เส้นรุ้งและเส้นแวงของสถานีรับเท่ากับ 13.7 องศา และ 100.8 องศา ตามลำดับ และค่าอัตราการตกของฝนที่แต่ละเปอร์เซ็นต์เวลาสะสม หาได้จากรูปที่ 3.16 ค่า R0.01 สำหรับการคำนวณของ ITU-R ที่ได้จากแบบจำลองฝนของ ITU-R และค่าที่ได้จากการวัด มีค่า 97 mm/h และ 100 mm/h ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงใช้ค่า R0.01 = 100 mm/h ในการคำนวณในแบบจำลองการลดทอนเนื่องจากฝน ในส่วนของแบบจำลองของ Crane นั้นแบ่งการกระจายการตกของฝนออกเป็นเขต ซึ่งประเทศไทย อยู่ในเขต G และ H ผลการคำนวณของแบบจำลองของ ITU-R และแบบจำลองของ Crane แสดงในรูปที่ 3.35 แบบจำลองของ ITU-R ใช้แบบจำลอง P.618-4 (ITU-R [A]) และ P.618-7 (ITU-R [B]) แบบจำลอง ITU-R [B] เป็นฉบับปรับปรุงของ ITU-R [A] ที่มีการปรับปรุงวิธีการคำนวณไปอย่างมาก และแบบจำลองของ Crane ในเขต G และ H และผลที่ได้จากการใช้ข้อมูลฝนที่ได้ที่ลาดกระบัง จากรูปจะเห็นได้ว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองของ ITU-R ทั้งสองฉบับมีค่าแตกต่างกับผลที่ได้จากการทดลองมาก แต่ให้ผลใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Crane ในเขต G ส่วนในเขต H และที่ใช้ข้อมูลฝนที่ลาดกระบังนั้น ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 3.35 เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของ ITU-R และ Crane

3.4 สรุปผล

ในบทนี้กล่าวถึงการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนและคุณลักษณะบางประการของฝนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 20 เดือน ผลจากการวิเคราะห์จะเห็นว่าในประเทศไทย อัตราการลดทอนของสัญญาณในย่านความถี่ Ku มีค่าสูงกว่า 25 dB และในเดือนที่มีปริมาณน้ำฝนสูงก็ไม่ใช่อัตราการตกของฝนจะสูงตามไปด้วยและจะตกชุกในช่วงเวลา 18:00-21:00 น. เช่นเดียวกับการลดทอนของสัญญาณที่เกิดขึ้นบ่อยในช่วงนี้ด้วย ระยะเวลาที่เกิดการลดทอนมากกว่า 10 dB มีระยะเวลายาวนานติดต่อกันสูงสุดประมาณ 60 นาที และบริเวณการตกของฝนเปลี่ยนแปลงได้มาก ผลที่ได้จากการวัดปริมาณน้ำฝน 2 จุด แสดงค่าที่สูงกว่าจุดเดียว และระยะเวลาที่ฝนเคลื่อนที่ในระยะประมาณ 2 กม. อยู่ที่ประมาณ 10 นาที นอกจากนี้ผลกระทบจากอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนยังมีมากอีกด้วย เมื่อทำการปรับปรุงอุปกรณ์ให้ดีขึ้น สามารถที่จะวัดอัตราการตกของฝนสูงๆ ได้ ซึ่งที่เคยวัดได้สูงสุดประมาณ 330 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ในขณะที่อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสามารถวัดได้ประมาณ 170 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จึงเป็นการดีกว่าที่จะใช้อุปกรณ์ที่ปรับปรุงแล้วในการศึกษาการลดทอนเนื่องจากฝนมากกว่าอุปกรณ์ที่ใช้อยู่ปัจจุบัน เมื่อเปรียบเทียบการลดทอนเนื่องจากฝนที่ได้กับแบบจำลองของ Crane และ ITU-R ผลที่ได้จากแบบจำลองของ Crane ในเขต H ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง ในขณะที่ผลที่ได้จากแบบจำลองของ ITU-R ให้ผลที่ต่ำกว่ามาก การลดทอนของสัญญาณนี้ส่งผลกระทบต่อระบบซึ่งในบทต่อไปจะกล่าวถึงความสัมพันธ์และผลกระทบของการลดทอนนี้ต่อระบบการสื่อสารแบบดิจิทัล

บทที่ 4

อัตราส่วนคลื่นพากับสัญญาณรบกวน

ในบทนี้จะกล่าวถึงอัตราส่วนคลื่นพากับสัญญาณรบกวน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบได้ ในระบบเดียวกันที่สถานีภาคพื้นดินต่างกัน ค่าอัตราส่วนของคลื่นพากับสัญญาณรบกวน อาจจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับภูมิประเทศรอบๆ ของแต่ละสถานีภาคพื้นดินเหล่านั้นว่ามีแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนอยู่ใกล้กับสถานีมากเพียงใด อัตราส่วนคลื่นพากับสัญญาณรบกวน (C/N) เป็นอัตราส่วนกำลังงานเฉลี่ยของคลื่นพามีแถบความถี่กว้าง (C) ต่อกำลังงานของสัญญาณรบกวนที่มีแถบความถี่เท่ากัน (N) ค่า C/N นี้เป็นพารามิเตอร์ตัวแรกที่น่าสนใจในการจะกำหนดค่าประสิทธิภาพของระบบในระบบการสื่อสาร ซึ่งสามารถกำหนดได้ที่ทุกๆ จุดภายในโครงข่าย เช่นที่งานสายอากาศส่ง (C/N)_T หรือที่งานสายอากาศรับ (C/N)_D อัตราส่วนนี้บางครั้งถูกกำหนดให้เป็นค่า อัตราส่วนคลื่นพากับความหนาแน่นสัญญาณรบกวน (C/N_0) เมื่อ $N_0 = kT_b$ สำหรับระบบสื่อสารที่เป็นแบบ ดิจิตอลค่าพลังงานต่อบิต (E_b) เป็นที่นิยมใช้กันมากกว่าค่ากำลังงานคลื่นพากับ ในการบอกถึงประสิทธิภาพของโครงข่าย ค่าพลังงานต่อบิตหาได้จาก $E_b = CT_b$ เมื่อ C คือ กำลังงานคลื่นพากับ และ T_b คือระยะเวลาของแต่ละบิต และพารามิเตอร์ที่ใช้กันมากที่สุดในการบอกถึงประสิทธิภาพของโครงข่ายการสื่อสารแบบดิจิตอลคือ อัตราส่วนพลังงานต่อบิตต่อความหนาแน่นสัญญาณรบกวน E_b/N_0 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า C/N_0 ดังนี้ $\frac{E_b}{N_0} = T_b \frac{C}{N_0}$ ความสัมพันธ์นี้ทำให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายที่ใช้เทคนิคการมอดูเลตทั้งแบบ แอนะล็อกและดิจิตอล หรือ ที่อัตราการส่งข้อมูลต่างๆ ของโครงข่ายที่มีพารามิเตอร์ของระบบเหมือนกันสามารถทำได้

4.1 อัตราส่วนคลื่นพากับสัญญาณรบกวนทาง

ในการทดลองทำการวัดระดับสัญญาณคลื่นพากับและระดับสัญญาณรบกวนได้จากช่องสัญญาณสื่อสารด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เพื่อที่จะได้ค่าระดับสัญญาณคลื่นพากับต่อระดับสัญญาณรบกวนในสภาวะปกติ อัตราส่วนที่ได้นี้จะเป็นกำลังงานส่วนเนื้อของระบบ ซึ่งในบทที่ 5 จะเป็นการทดลองระหว่างอัตราการผิดพลาดของข้อมูลที่ค่า C/N ต่างๆ ซึ่งค่า C/N นี้จะถูกลดทอนลงไปเป็นอัตราส่วนที่เท่ากันกับการลดทอนของสัญญาณนำร่อง สมการของค่า (C/N)_D เป็นดังสมการข้างล่างนี้

$$(C/N)_D = (EIRP)_{sat} - L + G_r - L_{fr} - 10 \log(kT_{sys} B)$$

เมื่อ	EIRP คือ กำลังส่งประสิทธิภาพ (dBw)
L	คือ ความสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบ (dB)
G_r	คือ อัตราขยายของงานสายอากาศรับ (dB)
L_{fr}	คือ ความสูญเสียของระบบสายส่งทางด้านรับ (dB)
k	คือ Boltzmann's constant (J/K)
Tsys	คือ equivalent noise temperature power (K)
B	คือ ความกว้างของแถบความถี่ (Hz)

ในการทดลองนี้ทำการวัดระดับสัญญาณรบกวนของดาวเทียมตลอดเวลาแต่ไม่ได้วัดระดับสัญญาณคลื่นพาห้ตลอดเวลา ซึ่งในสมการนั้นมีตัวแปรที่ต่างกันคือ EIRP และ ค่า B ซึ่งตัวแปรทั้งสองนี้จะมีผลโดยตรงต่อค่า C/N ที่ทำให้ค่า C/N ของสัญญาณรบกวน และสัญญาณคลื่นพาห้มีค่าไม่เท่ากัน แต่ทั้ง EIRP และ B จะมีค่าคงที่ในแต่ละระบบ รวมทั้ง G_r และ L_{fr} เป็นค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยและไม่ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม ส่วนค่า k เป็นตัวแปรคงที่ ดังนั้นตัวแปรที่ทำให้ค่า C/N มีการเปลี่ยนแปลงได้มากคือ L และเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของ L นี้ส่งผลกระทบต่อระบบโดยรวม ช่องสัญญาณสื่อสารหรือสัญญาณรบกวนก็จะได้รับผลกระทบที่เหมือนกัน นั่นก็คือการลดทอนที่เกิดขึ้นกับสัญญาณรบกวนก็จะทำให้ช่องสัญญาณสื่อสารเกิดการลดทอนเท่ากันกับช่องสัญญาณรบกวน และในย่านความถี่ Ku ตัวแปรหลักที่ทำให้ L เพิ่มขึ้นอย่างมากคือ ฝน เมื่อการลดทอนในเส้นทางการแพร่คลื่นสูงกว่าค่าส่วนเนื้อของระบบที่ตั้งไว้ ซึ่งสามารถเกิดได้ง่ายในย่านความถี่ Ku และ Ka ดังนั้นจึงต้องพิจารณาวิธีการที่ใช้ในการแก้ไขในกรณีที่เกิดการลดทอนอย่างรุนแรงเพื่อให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

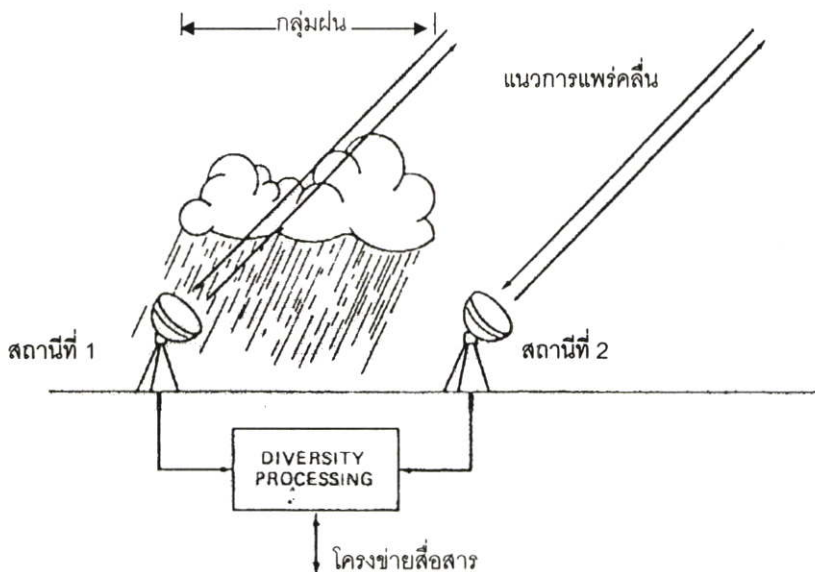
4.2 เทคนิคในการแก้ไขปัญหาการเกิดการลดทอนอย่างรุนแรง

มีหลายๆเทคนิคที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาการลดทอนอย่างรุนแรงในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม เทคนิคเหล่านี้ประกอบด้วย site diversity, power control, orbital diversity, spot beams, frequency diversity และ adaptive forward error correction. หลายๆเทคนิคเหล่านี้ถูกใช้ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมและบางเทคนิคได้ให้ประสิทธิภาพของระบบที่ดีขึ้นในโครงข่ายต่อการลดทอนเนื่องจากฝนอย่างรุนแรง และจากสาเหตุอื่น

4.2.1 SITE DIVERSITY

Site diversity เป็นเกณฑ์ทั่วไปที่ใช้ในการอธิบายการใช้ประโยชน์ของสถานีภาคพื้นดิน 2 สถานีหรือมากกว่า ที่แยกจากกัน ในโครงข่ายการสื่อสารผ่านดาวเทียมต่อผลกระทบอย่างรุนแรง

ของการลดทอนในแนวแพร่คลื่นในช่วงเวลาที่ฝนตกหนัก, site diversity อาจเรียกได้อีกอย่างว่า path diversity หรือ space diversity ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของระบบโดยการใช้ประโยชน์จากขนาดและบริเวณของฝนที่ตกหนักๆ ด้วยระยะห่างทางกายภาพระหว่างสถานีภาคพื้นดินที่เหมาะสมจะทำให้ความน่าจะเป็นของระดับการลดทอนเนื่องจากฝนของทั้งสองสถานีมีค่าน้อยกว่าค่าความน่าจะเป็นของระดับการลดทอนเนื่องจากฝนที่เกิดขึ้นที่สถานีเดียว รูปที่ 4.1 แสดงหลักการของ site diversity ในกรณีของสถานีภาคพื้นดิน 2 สถานี ฝนที่มีอัตราการตกของฝนสูงโดยปกติจะเกิดขึ้นเป็นกลุ่มๆ ที่มีเนื้อที่ในแนวระนาบและแนวตั้งที่ไม่กว้างนัก กลุ่มฝนนี้มีเนื้อที่ในแนวระนาบและแนวตั้งไม่กี่กิโลเมตร และมีแนวโน้มที่จะมีเนื้อที่เล็กลงตามความแรงของฝนที่เพิ่มขึ้น ถ้าสถานีภาคพื้นดินทั้งสองอยู่ห่างกันอย่างน้อยเท่ากับค่าเฉลี่ยในแนวระนาบของกลุ่มฝนแล้วกลุ่มฝนจะไม่ผ่านแนวการแพร่คลื่นของสถานีภาคพื้นดินทั้งสองพร้อมกัน ดังในรูป กลุ่มฝนอยู่ในแนวแพร่คลื่นของสถานี 1 ในขณะที่สถานี 2 ไม่มีฝนตก กลุ่มฝนมีการเคลื่อนที่และอาจจะเคลื่อนที่เข้ามาในแนวแพร่คลื่นของสถานี 2 แต่ในตอนนั้นแนวแพร่คลื่นของสถานี 1 จะปราศจากฝน



รูปที่ 4.1 หลักการของ Site Diversity

สัญญาณขาลงที่รับได้จากทั้งสองสถานีถูกนำมาซึ่งที่เดียวกันซึ่งอาจจะเป็นสถานีใดสถานีหนึ่ง ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบและเลือกสัญญาณที่ดีที่สุดมาใช้งานในระบบการสื่อสาร ข้อมูลข่าวสารที่จะส่งก็เช่นเดียวกัน สามารถเลือกได้ระหว่างสถานีทั้งสองโดยใช้กระบวนการเลือกที่ขึ้นอยู่กับสัญญาณขาลงที่รับเข้ามา หรือวิธีการพิจารณาอย่างอื่น

4.2.2 การควบคุมกำลังส่ง (Power Control)

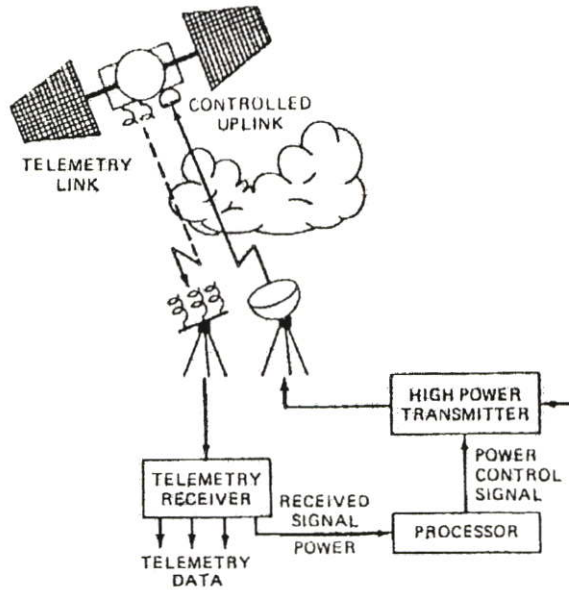
การควบคุมกำลังส่งเป็นกระบวนการในการปรับเปลี่ยนค่ากำลังส่งในการสื่อสารดาวเทียม ในช่วงที่มีฝนตก เพื่อให้ระดับกำลังงานที่เครื่องรับมีค่าตามที่ต้องการ การควบคุมกำลังส่งจะพยายามคงการเชื่อมต่อไว้โดยการเพิ่มกำลังส่งในขณะที่เกิดการลดทอนเนื่องจากฝน และจะลดกำลังส่งหลังจากกลับสู่สภาวะปกติ โดยปกติค่ากำลังส่งจะปรับให้อยู่ที่ค่าต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ในขณะที่เกิดการลดทอนเนื่องจากฝน เพื่อป้องกันการรบกวนต่อดาวเทียมดวงอื่น (ในกรณีของการควบคุมกำลังส่งด้านขาขึ้น) หรือ ต่อสถานีภาคพื้นดินอื่น (กรณีของการควบคุมกำลังส่งด้านขาลง)

การควบคุมกำลังส่งต้องการข้อมูลของการลดทอนในแนวการแพร่คลื่นของข่ายเชื่อมโยงที่จะควบคุม รายละเอียดของวิธีการที่จะได้มาถึงข้อมูลการลดทอนในแนวแพร่คลื่นนั้นขึ้นกับเป็นการควบคุมกำลังส่งทางด้านขาขึ้นหรือขาลงและรายละเอียดของของระบบสื่อสารนั้นๆ โดยทั่วไป การควบคุมกำลังส่งจะใช้กับการสื่อสารด้านเดียว หรือการเชื่อมโยงผู้ใช้คนเดียว ด้วยเหตุที่การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณคลื่นพาห้หลายๆในระบบ หลายๆ คลื่นพาห้ หรือ ในระบบหลายๆ ผู้ใช้ ซึ่งสามารถทำให้เกิดการรบกวนกันระหว่างแต่ละคลื่นพาห้ในทรานสปอนเดอร์เดียวกัน

4.2.2.1 การควบคุมกำลังส่งด้านขาขึ้น

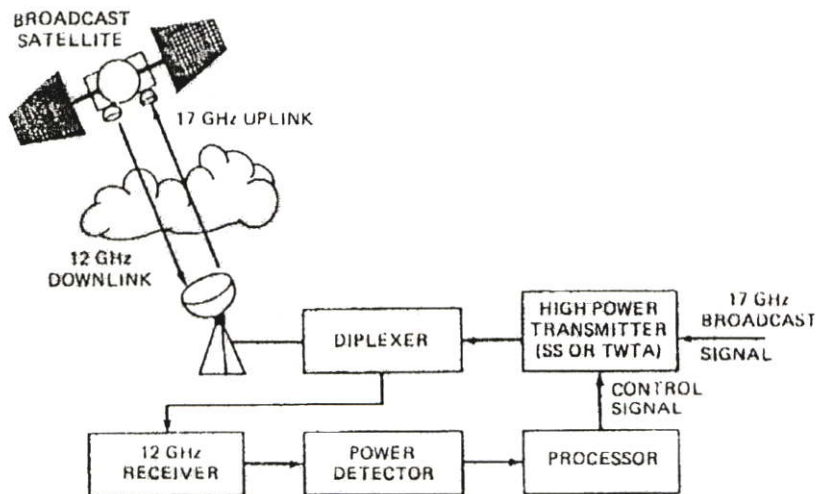
การควบคุมกำลังส่งด้านขาขึ้นให้ความหมายของการแก้ไขการสูญเสียของสัญญาณขาขึ้นในขณะที่เกิดการลดทอนเนื่องจากฝน ซึ่งเป็นประโยชน์ในการให้บริการแบบ fix satellite และ บริการแพร่กระจายข่าวสารผ่านดาวเทียม การควบคุมกำลังส่ง 2 ประเภทที่ใช้ คือ ระบบควบคุมแบบ ลูปปิด และ แบบ ลูปเปิด ในระบบลูปปิด ระดับกำลังจะถูกปรับโดยตรงจากข้อมูลระดับสัญญาณที่รับได้ที่ดาวเทียมที่ถูกส่งกลับมายังสถานีภาคพื้นดินทางช่องสัญญาณควบคุม (telemetry) ขอบเขตการควบคุมที่เป็นไปได้อาจสูงถึง 20 dB และช่วงเวลาตอบสนองสามารถที่จะเป็นแบบต่อเนื่องได้ถ้าสัญญาณควบคุมของดาวเทียมเป็นแบบต่อเนื่อง รูปที่ 4.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมคร่าวๆ ของระบบควบคุมกำลังส่งขาขึ้นแบบลูปปิด

ในระบบควบคุมกำลังส่งแบบลูปเปิด ระดับกำลังส่งถูกปรับโดยสัญญาณควบคุมของคลื่นที่เกิดการลดทอนเนื่องจากฝนเช่นเดียวกัน สัญญาณควบคุมเหล่านี้อาจจะเป็น สัญญาณขาลง สัญญาณนำร่องความถี่เดียวกับสัญญาณขาขึ้นหรือใกล้เคียง หรือ สัญญาณจาก Radio meter หรือ radar ก็ได้ รูปที่ 4.3(ก-ค) แสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับเทคนิคการควบคุมลูปเปิดทั้งสามเทคนิคนี้ ที่ใช้ความถี่ของบริการการกระจายข่าวสารผ่านดาวเทียมที่ความถี่ขาขึ้น 17GHz และความถี่ขาลง 12GHz มาเป็นตัวอย่าง ในรูปที่ 4.3(ก)เป็นระบบของสัญญาณควบคุมที่ได้จากสัญญาณขาลง ระดับสัญญาณขาลงความถี่ 12GHz จะถูกตรวจสอบอย่างต่อเนื่องและใช้ในการควบคุมเครื่องส่งกำลังสูง เครื่องส่งนี้อาจจะเป็นอุปกรณ์ขยายแบบ Solid State (SS) หรือ แบบหลอดสูญญากาศ



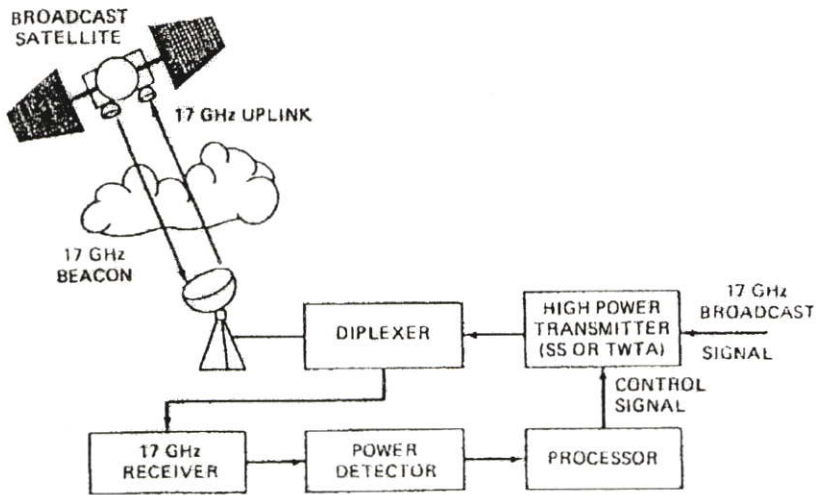
รูปที่ 4.2 การควบคุมกำลังส่งด้านขาขึ้นแบบรูปปิด

Travelling Wave Tube (TWT) ระดับสัญญาณควบคุมจะถูกพิจารณาในกระบวนการควบคุมที่ได้จากแบบจำลองการลดทอนเนื่องจากฝน ซึ่งจะคำนวณค่าลดทอนที่ความถี่ขาขึ้น 17GHz จากการวัดการลดทอนที่สัญญาณขาหลง 12GHz ซึ่งวิธีการนี้จะต้องคำนึงถึงอัตราการลดทอนระหว่างความถี่ขาขึ้นและความถี่ขาหลง วิธีการของสัญญาณควบคุมที่ได้จากสัญญาณขาหลงนี้เป็นวิธีการที่แพร่หลายในการควบคุมกำลังส่งขาขึ้นเพราะว่าที่แต่ละสถานีภาคพื้นดินสามารถที่จะวัดระดับของสัญญาณขาหลงได้

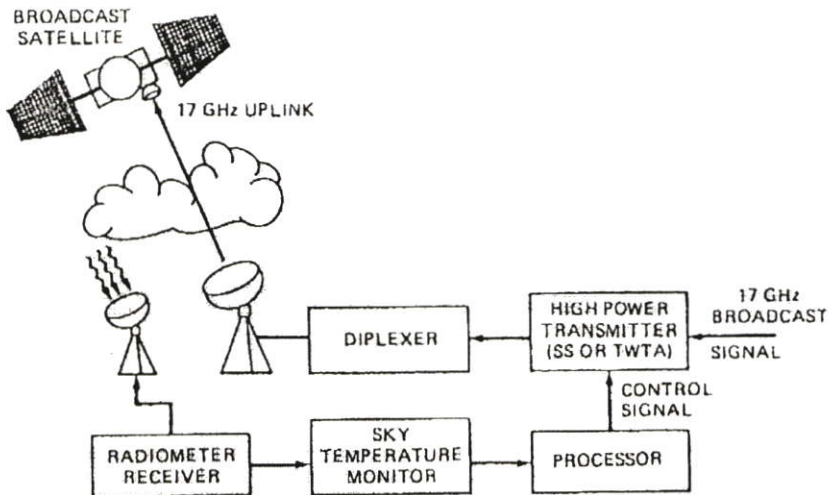


(ก) สัญญาณควบคุมที่ได้จากสัญญาณขาหลง

รูปที่ 4.3 เทคนิคการควบคุมกำลังส่งด้านขาขึ้นแบบรูปเปิด



(ข) สัญญาณควบคุมที่ได้จากสัญญาณนำร่อง



รูปที่ 4.3 (ค) สัญญาณควบคุมที่ได้จากระบบ Radiometer

รูปที่ 4.3 (ต่อ)

รูปที่ 4.3 (ข) เป็นระบบของสัญญาณควบคุมที่ได้จากสัญญาณนำร่อง โดยที่สัญญาณนำร่องจากดาวเทียมที่อยู่ในความถี่เดียวกับความถี่ขาขึ้นถูกใช้ในการตรวจสอบการลดทอนเนื่องจากฝนในโครงข่ายการเชื่อมโยง ระดับสัญญาณนำร่องที่วัดได้จะถูกใช้เป็นสัญญาณควบคุม เนื่องจากการวัดสัญญาณลดทอนที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกันมากๆ กับสัญญาณที่จะควบคุมนี้ ไม่ต้องการการประมาณใดๆ จากหน่วยประมวลผล วิธีนี้จะให้ค่าที่แม่นยำที่สุดของวิธีการควบคุมทั้งสามนี้ รูปที่ 4.3 (ค) แสดงวิธีที่สามที่ใช้ในการประมาณการลดทอนเนื่องจากฝนด้านขาขึ้นจากการวัด

อุณหภูมิท้องฟ้า (Sky temperature) ด้วยอุปกรณ์ Radio meter ที่มีทิศทางเดียวกันกับแนวแพร่คลื่น การลดทอนเนื่องจากฝนสามารถประมาณได้จากอุณหภูมิสัญญาณรบกวน (Noise temperature) T_s การลดทอน A(dB) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$A(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left[\frac{T_m}{T_m - T_s} \right]$$

เมื่อ T_s คืออุณหภูมิเฉลี่ยในแนวแพร่คลื่น °K การเปลี่ยนแปลงของการลดทอนต่ออุณหภูมิในแนวแพร่คลื่นมีการผิดพลาดประมาณ 1 dB ในกรณีที่มีการลดทอนสูงๆ วิธีการควบคุมกำลังส่งนี้มีความถูกต้องน้อยที่สุดของทั้งสามวิธีนี้ และจะใช้ก็ต่อเมื่อวิธีพิจารณาการลดทอนด้วยวิธีอื่นไม่สามารถทำได้

4.2.2.2 การควบคุมกำลังส่งด้านขาลง

การควบคุมกำลังส่งขาลงบนตัวดาวเทียมถูกจำกัดโดยโหมคการทำงานบนตัวดาวเทียมซึ่งอาจจะมีเพียงหนึ่งหรือสองโหมคการทำงานที่เหมาะสมต่อการลดทอนเนื่องจากฝน ตัวอย่างเช่น ดาวเทียมของ NASA ที่ชื่อ ACTS (Advance Communications Technology Satellite) ที่ใช้งานความถี่อยู่ในย่าน 30/20GHz มีโหมคการส่งกำลังด้านขาลงอยู่สองโหมค คือ โหมคกำลังงานต่ำ มีกำลังส่ง 8 วัตต์ และโหมคกำลังงานสูง มีกำลังส่ง 40 วัตต์ โดยใช้หลอด TWTA แบบ มัลติโหมคที่โหมคกำลังงานสูงมีส่วนเผื่อกำลังงานอีก 7 dB เพื่อชดเชยการลดทอนเนื่องจากฝน การควบคุมกำลังส่งด้านขาลงนี้ไม่สามารถเพิ่มกำลังส่งไปยังสถานีที่มีการลดทอนเนื่องจากฝนเพียงสถานีเดียวได้ เนื่องจากกำลังที่เพิ่มเข้าไปนั้นจะเพิ่มขึ้นทุกสถานีที่อยู่ในพื้นที่ครอบคลุม

4.2.3 ORBITAL DIVERSITY

Orbital Diversity เป็นวิธีที่ใช้ดาวเทียมสองดวงที่อยู่ห่างกันมากๆ เพื่อให้แนวการแพร่คลื่นไม่ทับซ้อนกัน ที่สถานีภาคพื้นดินที่เดียวกัน หลักการจะคล้ายกับวิธี Site Diversity คือจะเลือกใช้ดาวเทียมที่มีการลดทอนในแนวแพร่คลื่นน้อยที่สุด ด้วยเหตุที่วิธี Orbital Diversity นั้นต้องการดาวเทียมสองดวงที่อยู่ห่างกันมากๆ จึงทำให้การใช้วิธีนี้อยู่ในวงจำกัด และวิธีนี้ยังต้องการระบบจันตาสายอากาศสองระบบที่สถานีภาคพื้นดินอีกด้วย วิธีการนี้ไม่ได้ปรับปรุงประสิทธิภาพการเชื่อมโยงโดยหลักการการหลีกเลี่ยงทางโครงสร้างของกลุ่มฝนเหมือนการวิธี Site Diversity แต่มีบางส่วนของผลทางสถิติที่ไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างแนวการแพร่คลื่นทั้งสองต่อเหตุการณ์ฝน มุมของแนวการแพร่คลื่นของวิธี Orbital Diversity ที่สถานีภาคพื้นดินที่เดียวไม่ได้เฉพาะเจาะจงว่าทำอะไรซึ่งต่างกับวิธี Site Diversity และวิธีนี้ให้ผลดีน้อยกว่าวิธี Site Diversity เพราะว่าเขตครอบคลุมของ

แนวแพร่คลื่นทั้งสองเป็นจุดบนพื้นผิวโลกเดียวกัน ซึ่งการลดทอนเนื่องจากฝนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ที่ระดับต่ำกว่า 4 กิโลเมตรจึงทำให้มีความแตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างเขตครอบคลุมของแนวการแพร่คลื่นทั้งสอง

4.2.4 ลำคลื่นแบบจุด (Spot Beams)

ระดับสัญญาณที่รับได้จากสัญญาณขาลงของดาวเทียมสามารถเพิ่มขึ้นได้ในช่วงที่มีการลดทอนเกิดขึ้นในแนวแพร่คลื่น โดยการเปลี่ยนไปใช้งานสายอากาศของดาวเทียมที่มีอัตราขยายสูงขึ้น อัตราขยายของงานสายอากาศที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากลำบีมของงานสายอากาศนั้นแคบลง ทำให้มีกำลังงานสูงขึ้นในบริเวณที่เล็กลงบนพื้นผิวโลก เป็นผลให้ได้ค่า EIRP ที่สูงขึ้นที่สถานีภาคพื้นดินที่เกิดการลดทอน การให้บริการของดาวเทียมนั้นให้บริการแก่สถานีภาคพื้นดินหลายๆ ที่ซึ่งอาจทำให้สถานีใดสถานีหนึ่งหรือมากกว่านั้นสามารถใช้ลำคลื่นแบบจุดได้ในกรณีที่เกิดการลดทอนเนื่องจากฝน ลำคลื่นแบบจุดนี้สามารถชี้ไปยังสถานีภาคพื้นดินที่ต้องการได้ โดยการเคลื่อนที่ทางกลไกของงานสะท้อนคลื่น หรือ โดยการเปลี่ยนการป้อนสัญญาณให้งานสายอากาศทางอิเล็กทรอนิกส์ รูปที่ 4.4 เป็นตัวอย่างของลำคลื่นแบบจุด



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างลำคลื่นแบบจุด และลำคลื่นแบบโซน ของดาวเทียม IP-Star

4.2.5 เทคนิคการแก้ไขโดยกระบวนการประมวลผลสัญญาณ

วิธีการทั้งหลายที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นไม่ได้แก้ไขรูปแบบของสัญญาณ Site Diversity และ Orbital Diversity เป็นการเลือกกระหว่างโครงข่ายเชื่อมโคงสองโครงข่ายหรือมากกว่าที่มีข้อมูลข่าวสารเหมือนกัน การควบคุมกำลังส่ง และ ตำแหน่งแบบจุด เป็นการเพิ่มกำลังสัญญาณหรือ EIRP เพื่อส่งในช่วงที่มีการลดทอนอย่างรุนแรง แต่ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของการส่งข้อมูลข่าวสาร

อย่างไรก็ตามนั่นคือเทคนิคการแก้ไขที่สามารถใช้ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะพื้นฐานของสัญญาณ คุณลักษณะพื้นฐานเหล่านี้ประกอบด้วย ความถี่ ความกว้างของแถบความถี่ อัตราการส่งข้อมูล และวิธีการเข้ารหัส ซึ่งยังคงใช้เพื่อแก้ไขปัญหาการลดทอนรุนแรง

FREQUENCY DIVERSITY

เทคนิคนี้โครงข่ายเชื่อมโคงที่ใช้งานอยู่ในย่านความถี่ที่มีผลกระทบจากการลดทอนเนื่องจากฝน เช่น 14/12 GHz หรือ 30/20 GHz จะเปลี่ยนมาใช้ย่านความถี่ที่ต่ำลง เช่น 6/4 GHz เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงผลกระทบของการลดทอนเนื่องจากฝน และเปลี่ยนกลับไปใช้ย่านความถี่เดิมเมื่อกลับสู่สภาวะปกติ ดังนั้นสถานีภาคพื้นดินและดาวเทียมที่ใช้วิธีนี้ต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้ทั้งสองความถี่นี้ ความต้องการจำนวนทรานสปอร์ตันเตอร์ย่านความถี่ต่ำที่ใช้ขึ้นอยู่กับจำนวนของโครงข่ายเชื่อมโคงที่ต้องให้บริการพร้อมๆกัน และความน่าจะเป็นของการลดทอนเนื่องจากฝนที่จะสูงกว่าส่วนเผื่อที่ด้งไว้ ตัวอย่างเช่น สมมุติให้ระบบมีหนึ่งโครงข่ายเชื่อมโคงต่อทรานสปอร์ตันเตอร์ และมีความน่าจะเป็นที่การลดทอนเนื่องจากฝนจะสูงกว่าค่าส่วนเผื่อที่ด้งไว้เป็น 10% ในแต่ละโครงข่ายเชื่อมโคง จำนวนทรานสปอร์ตันเตอร์ความถี่ต่ำที่ต้องการเพื่อจะให้มีมีความน่าเชื่อถือของระบบเป็น 99.99% ดาวเทียมที่มีทรานสปอร์ตันเตอร์ 48 ทรานสปอร์ตันเตอร์ ควรเป็น 10 ในขณะที่ดาวเทียมที่มี 24 ทรานสปอร์ตันเตอร์ ควรเป็น 8 [1] ถ้าความน่าจะเป็นของการลดทอนเนื่องจากฝนลดลงมาเป็น 1% จำนวนของทรานสปอร์ตันเตอร์จะลดลงเป็น 3 และ 2 ตามลำดับ

การลดความกว้างของแถบความถี่ (Bandwidth Reduction)

การลดความกว้างของแถบความถี่ของสัญญาณข้อมูลข่าวสารขาขึ้นหรือขาลงในขณะที่มีการลดทอนสูง ผลที่ได้ก็คือค่าอัตราส่วนของสัญญาณคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการลดแถบความถี่ลงครึ่งหนึ่งสามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนของสัญญาณคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนได้ 3 dB ในการลดแถบความถี่ข้อมูลข่าวสารนี้ทำโดยการเปลี่ยนอัตราการส่งข้อมูล ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงได้ง่ายในระบบที่เป็นดิจิทัล

การหน่วงการส่ง (Transmission Delay)

เทคนิคการแก้ไขอย่างอื่นที่ใช้บ่อยที่สามารถใช้ได้ ในกรณีที่ไม่ได้มีการส่งตลอดเวลา เช่น การส่งข้อมูลจำนวนมากๆ หรือการส่งจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ ใช้วิธีการเก็บข้อมูลไว้และรอจนกว่าการลดทอนเนื่องจากฝนนั้นผ่านไปจึงค่อยทำการส่งข้อมูลเหล่านั้นไปยังปลายทาง ช่วงเวลาของการเก็บข้อมูลไว้จะเป็นหลายๆ นาที หรือหลายๆ ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ และเหตุการณ์ฝนที่เกิดขึ้นที่สถานีภาคพื้นดิน

Adaptive Forward Error Correction

การเข้ารหัสข้อมูลเป็นเทคนิคที่ใช้ได้ดีในการลดอัตราการผิดพลาดของข้อมูล BER ในระบบการสื่อสารดิจิทัล โดยทั่วไปใช้โครงสร้างการเข้าถึงข้อมูลตามเวลา Time division multiple access (TDMA) การเข้ารหัสสามารถเพิ่มอัตราขยายได้ถึง 8 dB โดยการใช้ forward error correction (FEC) บางตัว ในโครงข่าย TDMA ต่อการลดทอนเนื่องจากฝนหรือเนื่องจากสาเหตุอื่น Adaptive FEC สามารถแก้ไขความน่าเชื่อถือของโครงข่ายได้ในช่วงที่เกิดการลดทอนขึ้น

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/N กับขนาดของงานสายอากาศรับและแบนด์วิธของเครื่องรับ

นอกจากเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาลดทอนของสัญญาณอย่างรุนแรงอย่างที่ได้กล่าวมาแล้ว ขนาดของงานสายอากาศรับ และแบนด์วิธก็เป็นตัวแปรสำคัญที่จะทำให้ได้ค่า C/N ที่สูงขึ้นหรือต่ำลงได้ ขนาดของงานสายอากาศรับที่เปลี่ยนไปจะทำให้ได้อัตราขยายของงานสายอากาศที่เปลี่ยนไปด้วยซึ่งเปลี่ยนแปลงโดยตรงกับขนาดของงานสายอากาศรับ คือ ขนาดของงานสายอากาศขนาดใหญ่จะให้ค่าอัตราการขยายงานสายอากาศสูงและทำให้ระดับสัญญาณคลื่นพาห์ที่รับได้สูงด้วย ส่วนแบนด์วิธของเครื่องรับเป็นตัวแปรที่ทำให้ระดับสัญญาณรบกวนเปลี่ยนแปลงโดยเปลี่ยนแปลงโดยตรงต่อกัน คือ ถ้าแบนด์วิธกว้างจะทำให้ระดับสัญญาณรบกวนสูง ซึ่งในระบบการสื่อสารนั้นต้องการระดับสัญญาณคลื่นพาห์สูง และระดับสัญญาณรบกวนต่ำ ในทางปฏิบัติขนาดของงานสายอากาศรับจะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งานว่าต้องการความน่าเชื่อถือของระบบมากเพียงใดและมีงบประมาณเท่าไร ขนาดของงานสายอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนของงานสายอากาศและการติดตั้งเพิ่มขึ้น แต่แบนด์วิธของเครื่องรับนั้นขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ว่ามีแบนด์วิธกว้างเพียงใด อัตราขยายของงานสายอากาศ และ ระดับสัญญาณรบกวนหาได้จากสมการต่อไปนี้

อัตราขยายของงานสายอากาศหาได้จาก

$$G(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \eta$$

ระดับสัญญาณรบกวนหาได้จาก

$$n = kTB$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางงานสายอากาศ

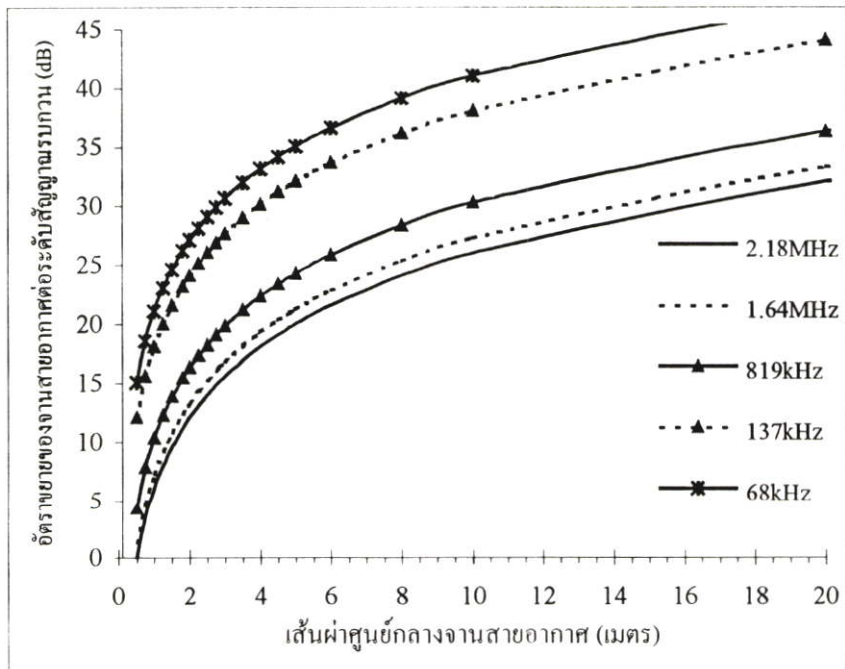
η คือ Antenna efficiency ของงานสายอากาศ

k คือ Boltzmann's constant = 1.38×10^{-23} J/K

T คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม °K

B คือ แบนด์วิธ (Hz)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายของงานสายอากาศกับกำลังของสัญญาณรบกวนที่มีแบนด์วิธต่างๆ ดังในรูป



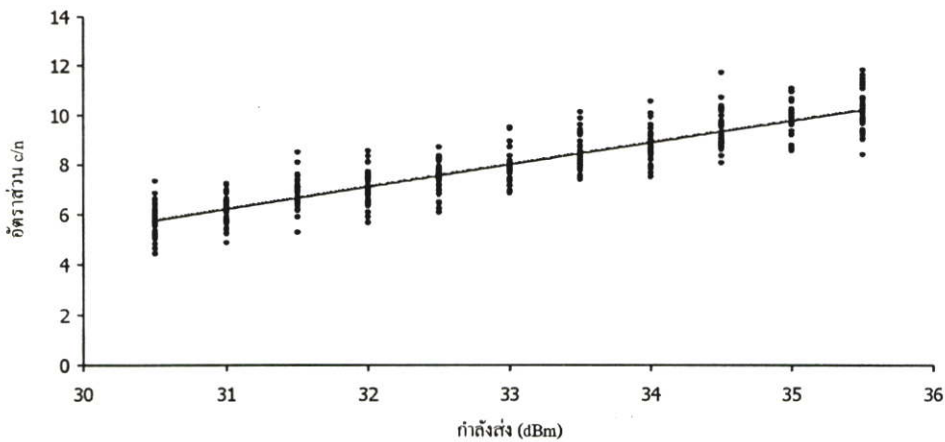
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายของงานสายอากาศกับกำลังของสัญญาณรบกวน

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายของงานสายอากาศที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางต่างๆ กับกำลังของสัญญาณรบกวนที่แบนด์วิธต่างๆ เทียบกับอัตราส่วนอัตราขยายของงานสายอากาศที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เมตร และ แบนด์วิธของสัญญาณรบกวน 2.18 MHz จากรูปจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของงานสายอากาศ และแบนด์วิธของสัญญาณรบกวน หรือแบนด์วิธของเครื่องรับ สามารถเพิ่มหรือลดส่วนเผื่อได้ ถ้าเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของงานสายอากาศที่มีขนาดเล็ก จะทำให้อัตราขยายของงานสายอากาศเปลี่ยนแปลงได้มากกว่าในกรณีที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ๆ จากรูปจะเห็นได้ว่าที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 5 เมตร จะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายของงานสายอากาศสูงเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เช่นถ้าเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจาก 50 เซนติเมตร เป็น 1, 1.5, 2 เมตร ก็จะได้ค่าส่วนเผื่อเพิ่มขึ้นเป็น 6, 9.5, และ 12 dB ตามลำดับ นอกจากการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของงานสายอากาศแล้ว ถ้าสามารถลดความกว้างแบนด์วิธของเครื่องรับลงได้ ก็สามารถที่จะเพิ่มค่าส่วนเผื่อได้เช่นกัน เช่นถ้าแบนด์วิธของเครื่องรับลดลงครึ่งหนึ่ง ก็จะได้ค่าส่วนเผื่อเพิ่มขึ้น 3 dB เมื่อค่าส่วนเผื่อของระบบเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ ค่าความน่าเชื่อถือของระบบเพิ่มขึ้นด้วย ตัวอย่างเช่นจากรูปที่ 3.18 ซึ่งเป็นกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมของการลดทอนเนื่องจากฝนที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นเวลา 12 เดือน (เส้นทึบ) สมมุติให้ระบบ ๆ หนึ่งใช้งานสายอากาศที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เมตร มีส่วนเผื่ออยู่ที่ 10dB จากกราฟจะเห็นว่าสัญญาณที่ถูกลดทอนประมาณ 10dB เกิดขึ้นเป็นเวลา 0.2 % ของเวลาสะสมทั้งปี หรือเป็นเวลา 17 ชั่วโมง 15 นาที ถ้าทำการเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางงานสายอากาศจาก 0.5 เมตรเป็น 1 เมตร หรือลดแบนด์วิธของเครื่องรับลง 1 ใน 4 ของแบนด์วิธเดิม จะทำให้ค่าส่วนเผื่อเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 6 dB นั่นก็คือ ค่าส่วนเผื่อใหม่ที่ได้จะอยู่ที่ 16 dB การลดทอนที่สูงกว่า 16 dB เกิดขึ้นที่ประมาณ 0.1 % ของเวลาสะสม หรือ 8 ชั่วโมง 45 นาที ซึ่งทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบเชื่อมโยงนี้สูงขึ้น

4.4 ผลการทดลอง

การทดลองทำโดยเปลี่ยนค่ากำลังส่งของเครื่องและทำการบันทึกค่าระดับสัญญาณคลื่นพาห์ต่อระดับสัญญาณรบกวนที่อ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม ในการทดลองนี้ทำการบันทึกค่า C/N ที่อัตราการส่งข้อมูล 1536 กิโลบิตต่อวินาที และเปลี่ยนค่ากำลังส่งในช่วง 30.5 dB ถึง 35.5 dB ผลการทดลองที่ได้แสดงดังในรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ทำการวัดที่เวลาต่างๆ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ค่า C/N ที่ได้มีการแกว่งตัวอยู่ประมาณ 4 dB ซึ่งเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของดาวเทียม, การเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายพลังงาน หรือการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังส่งหรืออัตราขยายของงานสายอากาศ [2] ทำให้ระดับสัญญาณที่รับได้เกิดการเปลี่ยนแปลงไป และเกิดขึ้นได้เนื่องจากระดับของสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้นจากสภาพของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ แต่การเปลี่ยนแปลง

ของระดับสัญญาณรบกวนนี้จะมีค่าไม่มากนัก สาเหตุเนื่องจากอุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการก่อตัวของเมฆฝนหรือในขณะที่ฝนตก จากกราฟจะเห็นได้ว่า ค่า C/N จะอยู่ที่ประมาณ 10 dB ที่ค่ากำลังส่ง 35.5 dBm และแอมพลิจูดอยู่ในช่วง 8 dB ถึง 12 dB หรือ ค่า C/N เท่ากับ 8 dB ที่ค่ากำลังส่ง 33 dBm แอมพลิจูดอยู่ในช่วง 6.5 dB ถึง 9.5 dB การแอมพลิจูดของค่า C/N อยู่ที่ 3 dB ถึง 4 dB ที่ทุกๆ ค่ากำลังส่ง กำลังส่งที่ใช้ในการสื่อสารปกติคือ 38.2 dB ซึ่งจะได้ค่า C/N สูงสุดประมาณ 16dB เพราะฉะนั้นในระบบที่ใช้ในการทดลองนี้ถ้าทำการวัดระดับสัญญาณคลื่นพาห้ของช่องสัญญาณสื่อสารแล้วจะได้ค่าลดทอนสูงสุดประมาณ 16dB



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งและค่า C/N

จากผลทางสถิติของการลดทอนของสัญญาณนำร่องเนื่องจากฝนที่ได้ในรูปที่ 3.18 การลดทอนที่สูงกว่า 16 dB จะเกิดขึ้น 0.1% ของเวลาสะสมทั้งปี หรือเป็นเวลา 8 ชั่วโมง 45 นาที ที่การติดต่อสื่อสารไม่สามารถรับสัญญาณได้ และในระบบการสื่อสารดิจิทัลเมื่อค่าอัตราส่วน C/N ลดลงที่ค่าๆ หนึ่ง ข้อมูลจะเกิดการผิดพลาดขึ้น เช่นเดียวกับระบบแอนะล็อกที่คุณภาพของสัญญาณจะลดลง ซึ่งแน่นอนว่าเวลาที่เกิดการผิดพลาดของข้อมูลนั้นย่อมยาวนานกว่า 8 ชั่วโมง 45 นาที

4.5 สรุปผล

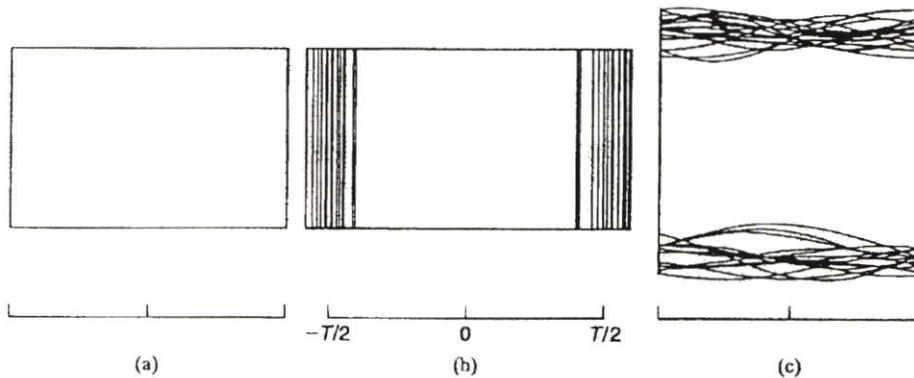
ในบทนี้ได้กล่าวถึงอัตราส่วนสัญญาณคลื่นพาห้ต่อสัญญาณรบกวนของระบบสื่อสารและเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการเพิ่มความน่าเชื่อถือของโครงข่ายเชื่อมโยง เทคนิคบางเทคนิคสามารถใช้ได้ทั้งสองระบบ แต่บางเทคนิคสามารถใช้ได้เฉพาะระบบดิจิทัลเท่านั้น และสุดท้ายพิจารณาถึงค่า C/N ของระบบที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีค่าสูงสุดประมาณ 16 dB นอกจากนี้ระบบสื่อสารแบบดิจิทัลสามารถพิจารณาคุณภาพของสัญญาณได้จากค่า อัตราการผิดพลาดของข้อมูล (BER) ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 5

อัตราการผิดพลาดของข้อมูล

5.1 บทนำ

การวัดความน่าจะเป็นของข้อมูลบิตที่ถูกส่งออกไปที่จะเกิดการผิดพลาดหลังจากรับเข้ามา เป็นวิธีวัดพื้นฐานของคุณสมบัติของระบบการส่งแบบดิจิทัล พารามิเตอร์หลาย ตัวของระบบอาจทำให้เกิดการผิดพลาดได้ เช่น ระดับสัญญาณ ระดับสัญญาณรบกวน และ การคลาดเคลื่อนของเวลา แต่เกณฑ์ที่สำคัญส่วนใหญ่ของแต่ละระบบคือ คุณสมบัติของการผิดพลาด และผลกระทบของการผิดพลาดเหล่านั้นต่อข้อมูลข่าวสารที่ส่งไป [9]

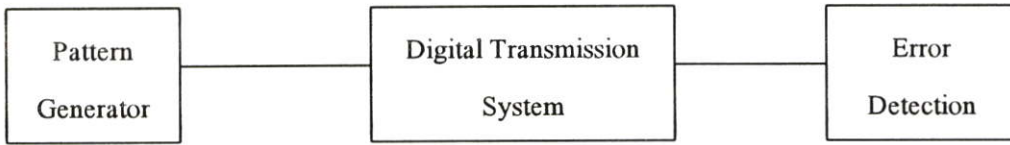


รูปที่ 5.1 พัลส์ดิจิทัลและ ผลกระทบที่เกิดขึ้น (a)สัญญาณดิจิทัลในอุดมคติ (b)สัญญาณดิจิทัลที่มีความคลาดเคลื่อนทางเวลา (c)สัญญาณดิจิทัลที่ถูกรบกวนทางแอมพลิจูด

5.1.1 วิธีการวัดทดสอบ

วิธีที่ใช้ในการวัดการผิดพลาดมีอยู่ 2 วิธี [7] คือ การวัดโดยการหยุดให้บริการ และการวัดในขณะที่ให้บริการ

การวัดโดยการหยุดให้บริการ โดยการส่งข้อมูลทดสอบให้แก่เครื่องส่ง โดยปกติจะใช้ ขบวนการข้อมูลไบนารีแบบสุ่ม (Pseudo-random Binary Sequence: PRBS) ในการจำลองการสื่อสาร และ เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้ บิตต่อบิตกับข้อมูลอ้างอิงที่ส่งไป การทดสอบแบบนี้ต้องทำการหยุด การให้บริการออกไป ซึ่งเป็นการสูญเสียผลประโยชน์จากการให้บริการ ดังรูปที่ 5.2



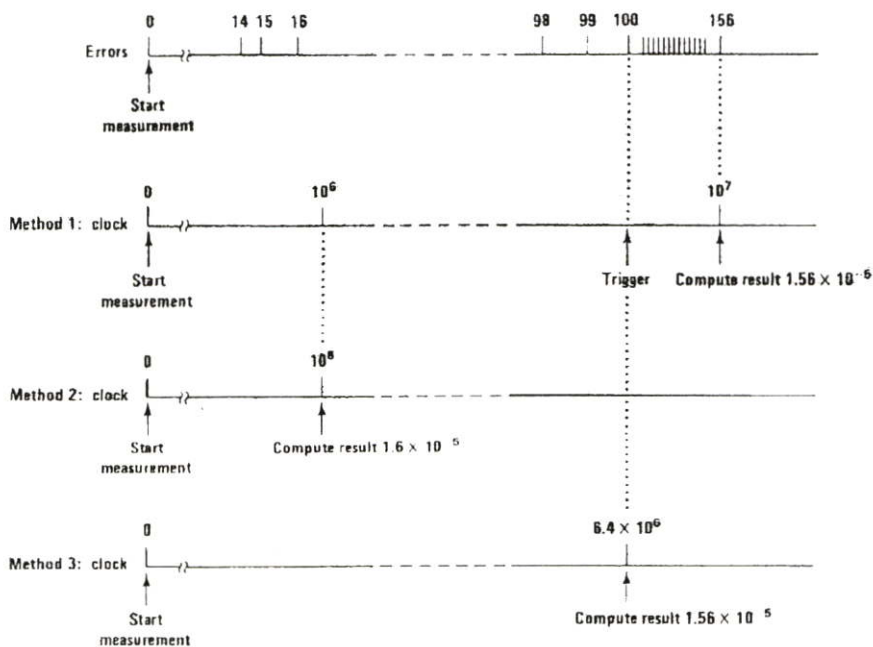
รูปที่ 5.2 วิธีการทดสอบแบบหยุดให้บริการ

2 วัดในขณะที่ให้บริการ ในการส่งข้อมูลข่าวสารจริงได้มีการใช้การเข้ารหัสข้อมูลที่ส่งไป หรือ มีรูปแบบข้อมูลบางรูปแบบถูกเพิ่มเข้าไปในข้อมูลเพื่อใช้ในการตรวจสอบค่าการผิดพลาดแบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถทำให้ตรวจสอบสภาวะของเครือข่ายได้ตลอดเวลา

ความน่าจะเป็นของการเกิดการผิดพลาดในแต่ละบิตที่ถูกส่งไปเป็นคุณสมบัติทางสถิติ การวัดการผิดพลาดในช่วงเวลาที่กำหนด สามารถแสดงได้ในหลายรูปแบบ แบบที่นิยมคือ

$$\text{อัตราการผิดพลาดของข้อมูล (BER)} = \frac{\text{จำนวนบิตที่ผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระยะเวลาที่กำหนด}}{\text{จำนวนบิตทั้งหมดที่ส่งไปในระยะเวลาที่กำหนด}}$$

ผลลัพธ์ที่ได้จะมีข้อมูลทางสถิติที่แตกออกไปจากค่าอัตราการผิดพลาดเฉลี่ยระยะยาว ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของข้อมูลที่ทำการวัด ในกรณีนี้เป็นการนับจำนวนบิตที่ผิดพลาด วิธีที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการผิดพลาดที่ใช้ทุกๆ ไป 3 วิธี แสดงไว้ในรูปที่ 5.3

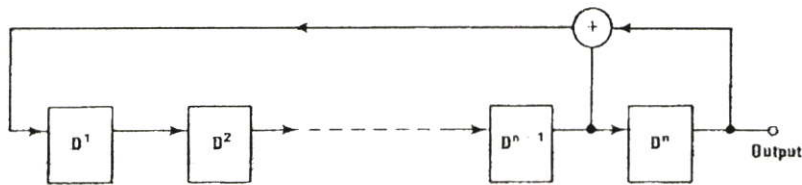


รูปที่ 5.3 วิธีการคำนวณค่าอัตราการผิดพลาด

วิธีที่ใช้กันส่วนใหญ่คือวิธีที่ 2 โดยการนับจำนวนบิตผิดพลาดในช่วงเวลาที่กำหนด วิธีทั้งสามจะให้ผลลัพธ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และโดยทั่วไปจะมีสัญญาณเตือนถ้าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้

5.1.2 การทดสอบแบบหยุดให้บริการ

รูปแบบข้อมูลทดสอบโดยปกติจะเลือกใช้ระหว่าง ขบวนการข้อมูลแบบสุ่ม เพื่อจำลองการส่งข้อมูล หรือ ขบวนการข้อมูลที่มีรูปแบบแน่นอน เพื่อทดสอบระบบการส่งสำหรับคุณลักษณะของเวลาที่เลื่อนไปของข้อมูล



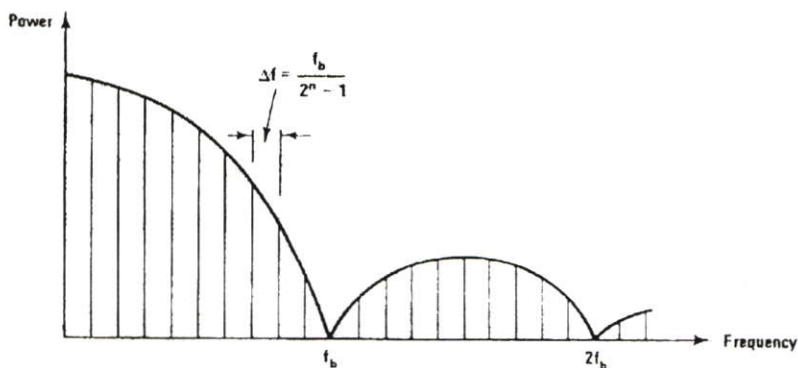
รูปที่ 5.4 วงจรกำเนิดขบวนการสัญญาณแบบสุ่ม

สิ่งสำคัญของขบวนการสัญญาณที่ได้คือ ตัวเลือกของขบวนการสัญญาณไบนารี แถบความถี่ที่ใช้ และคุณสมบัติการทำงานภายใต้การทดสอบ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้อาจสรุปได้ดังนี้

ความยาวของขบวนการสัญญาณ (บิต)

โครงสร้างของ Shift register

ช่องว่างของแถบความถี่ที่ใช้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราการส่งข้อมูลที่ใช้



รูปที่ 5.5 แถบความถี่ของขบวนการสัญญาณไบนารีแบบสุ่ม ของสัญญาณแบบ NRZ

รูปแบบของขบวนการสัญญาณแบบสุ่มนี้ ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานไว้ 2 รูปแบบ โดย International Telegraph and Telephone Consultative Committee, CCITT สำหรับทดสอบระบบการส่งแบบดิจิทัล มีโครงสร้างของ shift register แบบ 15 และ 23 ลำดับ และสรุปได้ตามตารางที่ 5.1 [7]

ตารางที่ 5.1 รูปแบบขบวนการสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ

Bit rate (f_b)	Sequence length (n)	Shift register configuration (polynomial)	Spectral line spacing ($\Delta f=f_b/n$)
1544 kbps	$2^{15}-1$ bits	$D^{15}+D^{-14}+1=0$	47.1 Hz
2048 kbps	$2^{15}-1$ bits	$D^{15}+D^{-14}+1=0$	62.5 Hz
6312 kbps	$2^{15}-1$ bits	$D^{15}+D^{-14}+1=0$	192.6 Hz
8448 kbps	$2^{15}-1$ bits	$D^{15}+D^{-14}+1=0$	257.8 Hz
32064 kbps	$2^{15}-1$ bits	$D^{15}+D^{-14}+1=0$	978.6 Hz
34368 kbps	$2^{23}-1$ bits	$D^{23}+D^{-18}+1=0$	4.1 Hz
44736 kbps	$2^{15}-1$ bits	$D^{15}+D^{-14}+1=0$	1365.3 Hz
139264 kbps	$2^{23}-1$ bits	$D^{23}+D^{-18}+1=0$	16.6 Hz

5.1.3 การทดสอบในขณะที่ให้บริการ

วิธีการส่วนใหญ่ที่ใช้ทดสอบในขณะที่ให้บริการอยู่นั้นคือ การตรวจสอบการผิดพลาดของไค้ดข้อมูล เครื่องมือที่ใช้นี้ใช้มาตรฐานของ CCITT ซึ่งมีอัตราการส่งข้อมูลต่ำและใช้การเข้ารหัสข้อมูลแบบ AMI, HDB3, B6ZS และ B8ZS การตรวจสอบการผิดพลาดแบบนี้ใช้ได้กับระบบที่ไม่มีกระบวนการเปลี่ยนไค้ดที่ทำการส่ง มีบางระบบพยายามที่จะแก้ปัญหานี้โดยการตรวจสอบไค้ดและแก้ไขไค้ด หลังกระบวนการเปลี่ยนไค้ด

ในการหาความสัมพันธ์ของอัตราการผิดพลาดของไค้ดกับ อัตราการผิดพลาดของข้อมูลไบนารี ต้องคำนึงถึง การผิดพลาดจากการถอดรหัสไค้ด ความสัมพันธ์ของอัตราการผิดพลาดของไค้ดจริงๆ โดยการเปรียบเทียบ บิต ต่อ บิต และอัตราการผิดพลาดของข้อมูลไบนารี ขึ้นอยู่กับการผิดพลาดของไค้ดและวิธีการถอดรหัสที่ใช้ด้วย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการทดสอบอัตราการผิดพลาดแบบหยุดการให้บริการ เนื่องจากโครงข่ายดาวเทียมที่ใช้เป็นโครงข่ายส่วนบุคคลซึ่งไม่มีการให้บริการส่งข้อมูลใดๆ จึงไม่มีปัญหาเรื่องความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการหยุดให้บริการ

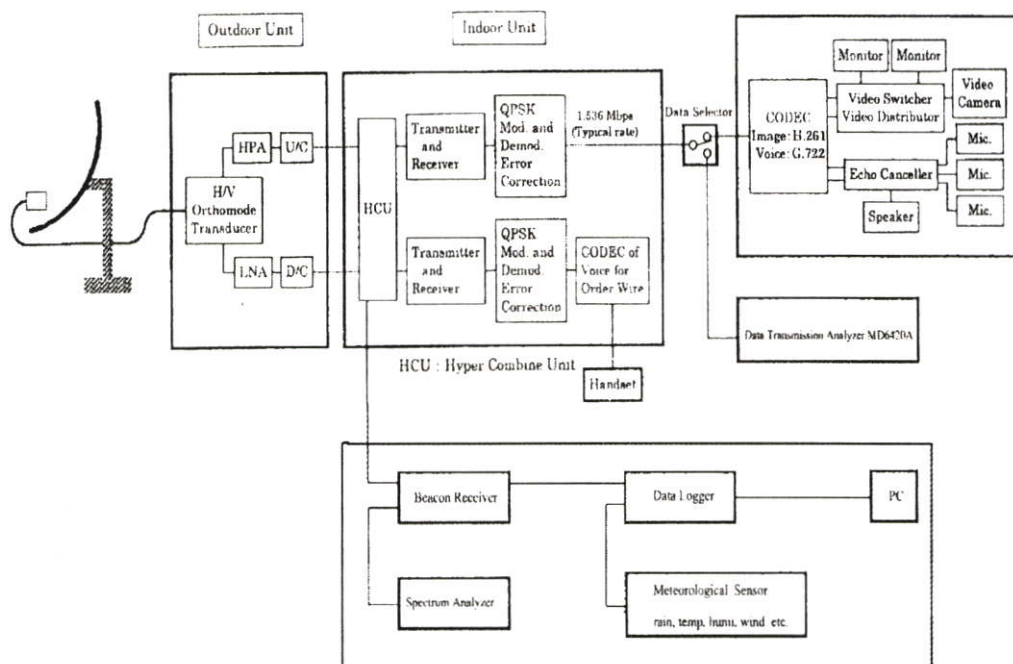
5.2 อุปกรณ์และวิธีที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบวัดอัตราการผิดพลาดของข้อมูลทำการทดสอบระหว่างสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย กับ Communication Research Laboratory ประเทศญี่ปุ่น ภายใต้โครงการ Post-PARTNERS ระหว่างวันที่ 28 ถึง 31 สิงหาคม พ.ศ. 2544 ระบบการวัดทดสอบอัตราการผิดพลาดของข้อมูลแสดงดังในรูปที่ 5.6 โดยการส่งรูปแบบสัญญาณตรวจสอบที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ข้อมูล ของ Anritsu รุ่น MD6420A ไปยังอุปกรณ์ติดต่อสื่อสารภาคพื้นดินภายในอาคาร หรือ Indoor Unit: IDU ซึ่งจะทำการเพิ่มรหัสตรวจสอบการผิดพลาด หรือ Forward Error Correction: FEC ข้อมูลเพิ่มเติม และมอดูเลทข้อมูลแบบ Quadrature Phase Shift Keying: QPSK แล้วส่งไปยังอุปกรณ์ภายนอกอาคาร หรือ Outdoor Unit: ODU เพื่อทำการย้ายแถบความถี่ไปยังช่วงความถี่ที่ต้องการ ทำการขยายสัญญาณ และส่งออกอากาศผ่านจานสายอากาศขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.8 เมตร โดยอุปกรณ์ติดตั้งที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่หนึ่ง และที่ Communication Research Laboratory ประเทศญี่ปุ่นอีกที่หนึ่ง สามารถส่งข้อมูลในอัตราต่างๆ กัน ตั้งแต่ 64kbps ถึง 2048kbps แต่ในการสื่อสารปกติจะอยู่ที่ 1536kbps เครื่องวิเคราะห์สัญญาณจะส่งข้อมูลแบบสุ่มที่รู้ค่าแน่นอนออกไป และอุปกรณ์ทดสอบจะนับจำนวนข้อมูลผิดพลาดที่เกิดขึ้นในข้อมูลที่รับเข้ามา ค่าอัตราการผิดพลาดที่ได้จะขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาในการวัด ในวิทยานิพนธ์นี้มีช่วงเวลาการวัด 5 นาที ในการทดสอบนี้ทำการทดสอบ 2 รูปแบบ คือ ทดสอบอัตราการผิดพลาดของข้อมูลโดยการวนกลับสัญญาณกลับที่ดาวเทียม และ การจำลองการวนสัญญาณกลับจากสถานีภาคพื้นดินอีกสถานีหนึ่ง

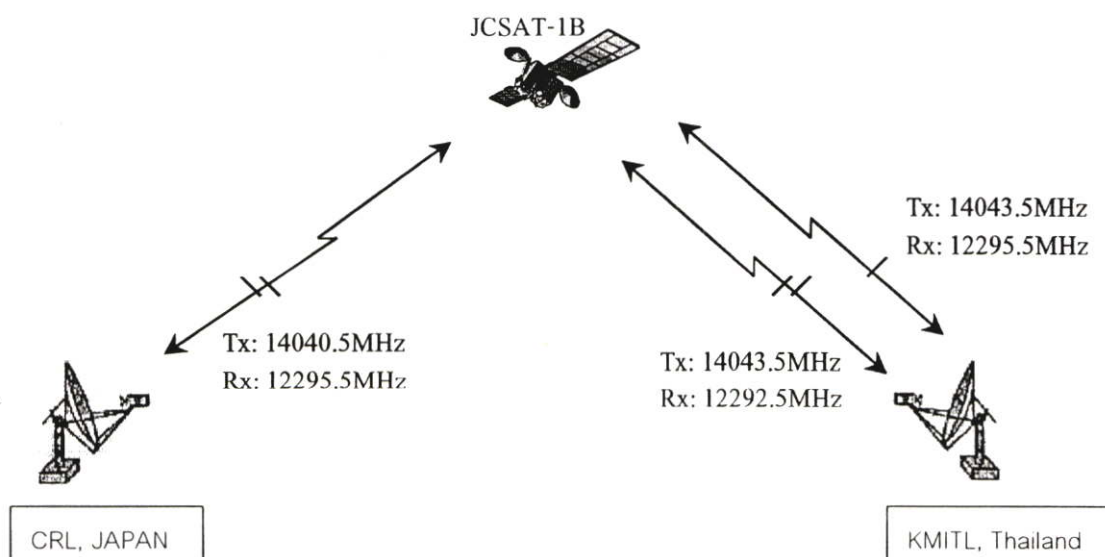
การทดสอบโดยการวนกลับสัญญาณที่ดาวเทียมทำโดยการ ส่งรูปแบบสัญญาณตรวจสอบไปยังดาวเทียม และรับรูปแบบสัญญาณตรวจสอบจากดาวเทียมโดยตรง โดยการตั้งความถี่รับที่ อุปกรณ์ภาคพื้นดินให้รับความถี่ข้างลงของตัวเอง ซึ่งการรับสัญญาณข้างลงของตัวเองนั่นคือ การวนกลับสัญญาณที่ดาวเทียมนั่นเอง สัญญาณที่รับได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับที่ เครื่องวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาการผิดพลาดของข้อมูล

การทดสอบโดยการจำลองการวนสัญญาณกลับจากสถานีภาคพื้นดินอีกสถานีหนึ่ง ทำโดยการใช้เครื่องวิเคราะห์ข้อมูลอีกชุดหนึ่งเป็นตัวส่งรูปแบบสัญญาณตรวจสอบมาจากอีกสถานีหนึ่ง ซึ่งเครื่องวิเคราะห์ข้อมูลทั้งสองตัวนี้ต้องตั้งพารามิเตอร์ ต่างๆ ให้เหมือนกัน ในการทดสอบจะเหมือนกับทั้งสองสถานีนี้ติดต่อกันตามปกติ กล่าวคือ ความถี่รับที่รับเข้ามาจะเป็นความถี่ข้างลงของอีกสถานีหนึ่ง การที่ต้องตั้งพารามิเตอร์ ต่างๆ ของเครื่องวิเคราะห์ข้อมูลให้เหมือนกัน เพราะต้องการให้เหมือนกับการวนกลับสัญญาณที่อีกสถานีหนึ่ง ซึ่งก็คือ รูปแบบสัญญาณตรวจสอบของเครื่องวิเคราะห์ข้อมูลที่ถูกส่งจากสถานีที่ 1 จะถูกรับและทำการเปรียบเทียบโดยเครื่องวิเคราะห์

ข้อมูลที่สถานีที่ 2 และในทำนองเดียวกัน รูปแบบสัญญาณที่ส่งจาก สถานีที่ 2 ก็จะถูกตรวจสอบที่ สถานีที่ 1 จึงมีความจำเป็นที่พารามิเตอร์ของเครื่องวิเคราะห์ข้อมูลทั้งสอง ต้องเหมือนกัน



รูปที่ 5.6 โครงร่างของอุปกรณ์ภาคพื้นดิน



รูปที่ 5.7 โครงร่างของวิธีการทดสอบ

5.3 การวิเคราะห์อัตราการผลิตของข้อมูล

ผลที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าอัตราส่วนของคลื่นพาห์ต่อ สัญญาณรบกวน (Carrier-to-Noise Ratio; C/N) ค่าอัตราการผลิตของข้อมูล โดยปกติการเปรียบเทียบระหว่างค่าอัตราการผลิตของข้อมูลกับค่าความต่างของคลื่นพาห์กับสัญญาณรบกวน จะให้ความหมายได้ไม่ดีเท่าที่ควร เพราะ ค่าระดับสัญญาณรบกวนที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับความกว้างของแถบความถี่ของเครื่องรับด้วย และเครื่องรับแต่ละเครื่องอาจใช้ความกว้างไม่เท่ากันได้ ดังนั้นจึงเป็นการดีกว่าที่จะทำให้ค่าระดับสัญญาณรบกวนเป็นค่าที่เทียบกับความกว้างของแถบความถี่รับเพียง 1 เฮิร์ตซ์ หรือ Noise power spectral density; N_0 ส่วนค่าระดับสัญญาณคลื่นพาห์ก็เปลี่ยนเป็นค่าพลังงานเฉลี่ยต่อบิตที่ถูกมอดูเลท หรือ Average energy of modulated bit; E_b ซึ่ง การเปลี่ยนค่า C/N เป็น E_b/N_0 ทำได้โดย

$$E_b = C \cdot T_b = C \left(\frac{1}{f_b} \right)$$

$$N_0 = \frac{N}{B_w}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C T_b}{N/B_w} = \frac{C/f_b}{N/B_w} = \frac{C B_w}{N f_b}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} \cdot \frac{B_w}{f_b} \quad [\text{dB}]$$

(5.1)

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่า E_b/N_0 เท่ากับผลคูณของ ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของ C/N กับค่าความกว้างของสัญญาณรบกวนต่ออัตราการผลิตข้อมูล B_w/f_b จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง E_b/N_0 และ C/N ขึ้นอยู่กับ B_w/f_b สำหรับระบบที่ใช้ในการทดสอบมีค่าพารามิเตอร์ ดังตาราง 5.2

จากตารางค่าแบนด์วิธและค่าอัตราการผลิตข้อมูลที่ใช้ในการแปลงค่า คือ PPS และ Transmission Rate with Overhead bit ตัวอย่างเช่น ที่อัตราการผลิตข้อมูล (Information Rate) 2048 kbps ต้องการแปลงค่า C/N= 10.1dB เป็นค่า E_b/N_0 ได้ดังนี้ [26]

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} \cdot \frac{B_w}{f_b} = 10.1 + 10 \log \frac{2184.5}{4369.1} = 7.1 \text{ dB}$$

ระบบที่ใช้ในการทดสอบใช้การมอดูเลทแบบ QPSK และมีการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Codes) ซึ่งมีขอบเขตด้านบนของความน่าจะเป็นการเกิดการผิดพลาดของข้อมูล (Upper bound on symbol error probability: P_s) [28] ดังสมการต่อไปนี้

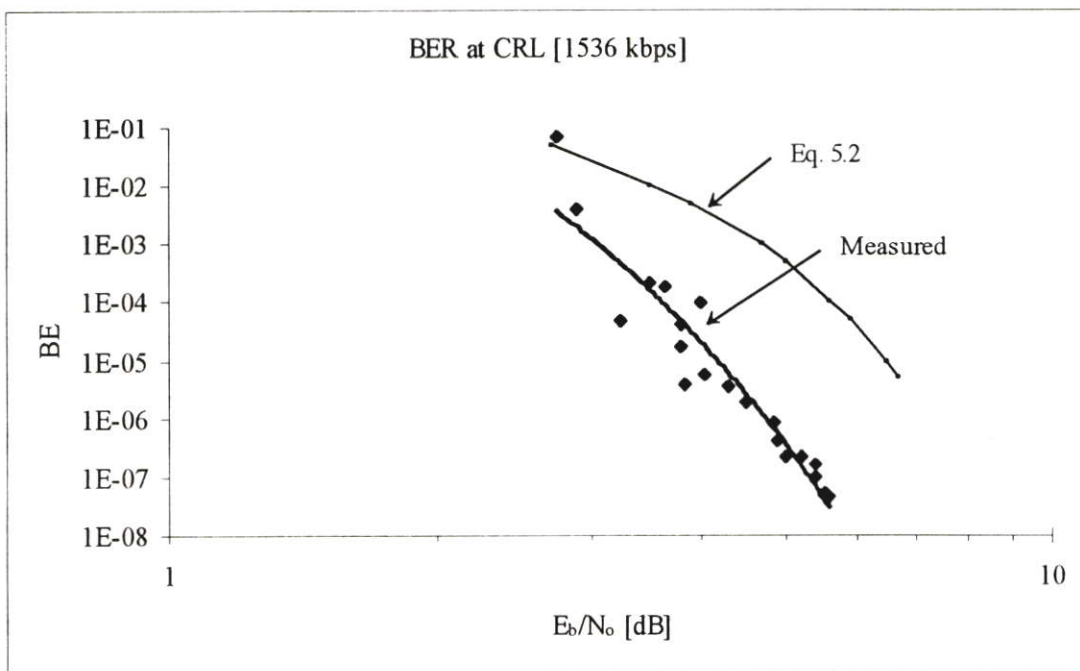
$$P_s < \frac{1}{2k} \frac{\partial T(W, I)}{\partial I} \Big|_{I=1, W=c^{-R_{Eb}/N_0}} \quad (5.2)$$

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับเทียบค่า C/N ให้เป็น E_b/N_0

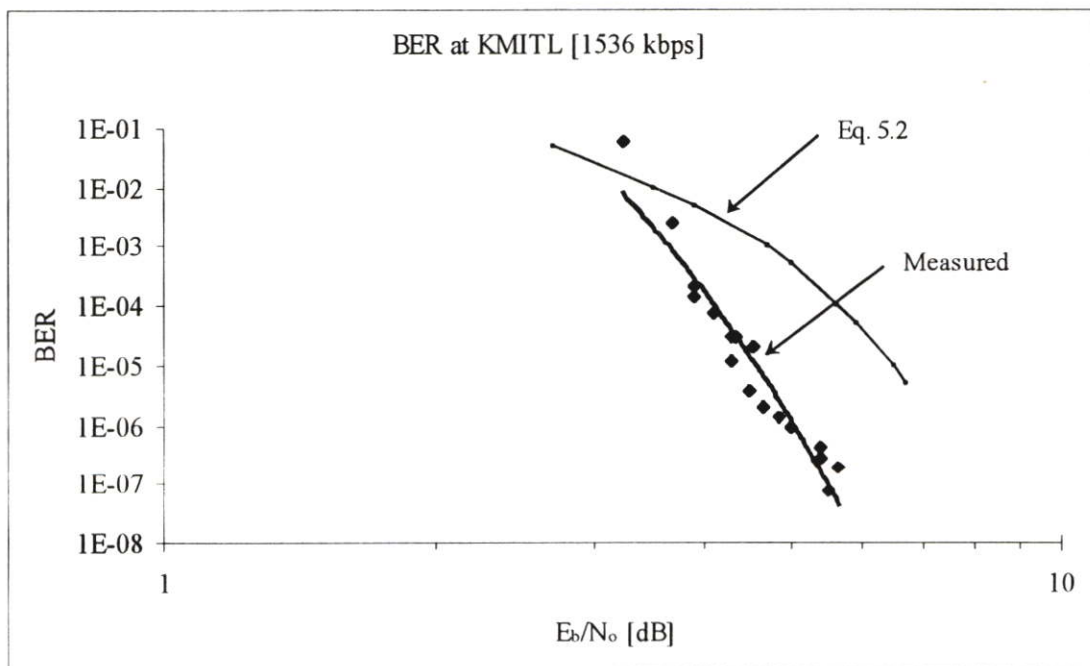
Information Rate (kbps)	Transmission Rate with Overhead bit (kbps)	PPS (Pulse repetition) kHz	Occupied Bandwidth (kHz)	FEC Rate	Additional bit (Overhead bit)	BW/ f_c (dB)
2048	4369.1	2184.5	2896.7	1/2	16/15	-3.01
1544	3293.9	1646.9	2183.8	1/2	16/15	-3.01
1536	3276.8	1638.4	2172.5	1/2	16/15	-3.01
768	1638.4	819.2	1086.3	1/2	16/15	-3.01
512	1092.3	546.1	724.2	1/2	16/15	-3.01
384	819.2	409.6	543.1	1/2	16/15	-3.01
256	546.1	273.1	362.1	1/2	16/15	-3.01
224	477.9	238.9	316.8	1/2	16/15	-3.01
192	409.6	204.8	271.6	1/2	16/15	-3.01
128	273.1	136.5	181.0	1/2	16/15	-3.01
112	238.9	119.5	158.4	1/2	16/15	-3.01
64	136.5	68.3	90.5	1/2	16/15	-3.01

5.4 ผลการทดสอบอัตราการผลิตของข้อมูล

การทดสอบทำโดยการวัดอัตราการผลิตของข้อมูลในช่วงเวลา 5 นาทีต่อการวัดแต่ละครั้ง แล้วทำการเปลี่ยนค่ากำลังส่งในแต่ละอัตราส่งข้อมูล ที่ 1536 kbps 768 kbps และ 512 kbps ดังแสดงในรูปที่ 5.8

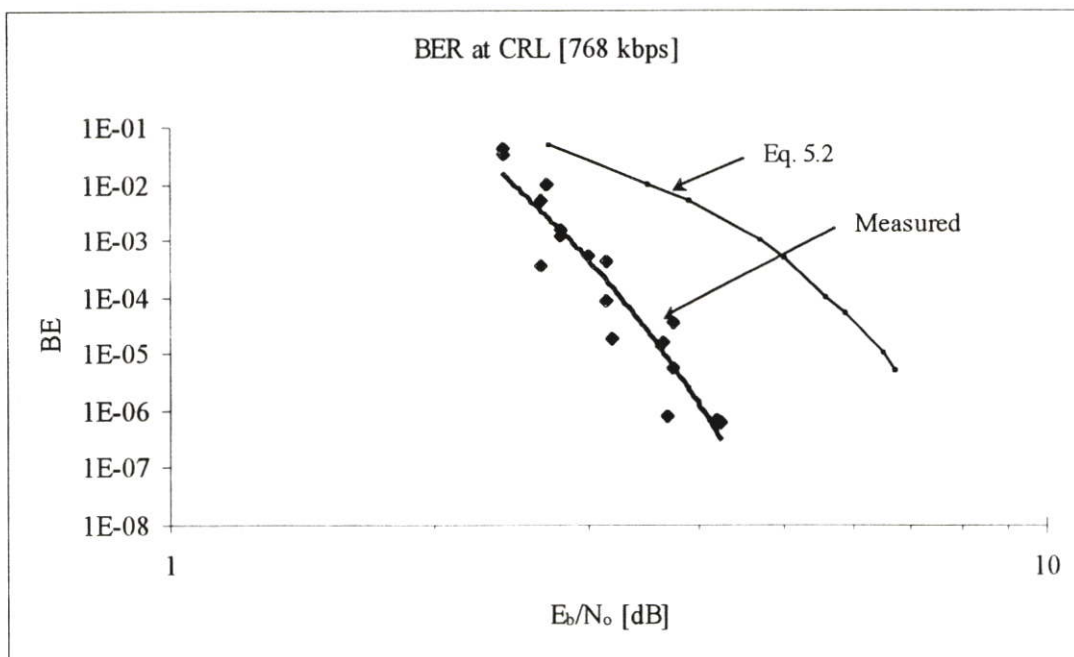


(ก) ค่า BER ที่วัดได้ที่ CRL

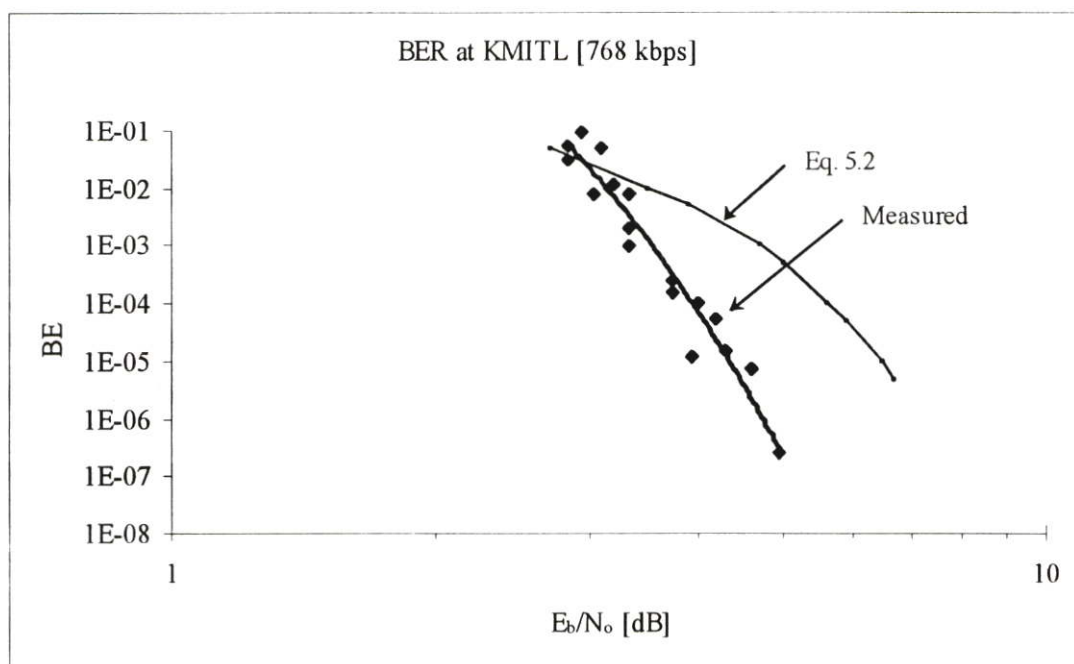


(ข) ค่า BER ที่วัดได้ที่ KMITL

รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า E_b/N_0 กับค่า BER ที่อัตราส่งข้อมูลต่างๆ

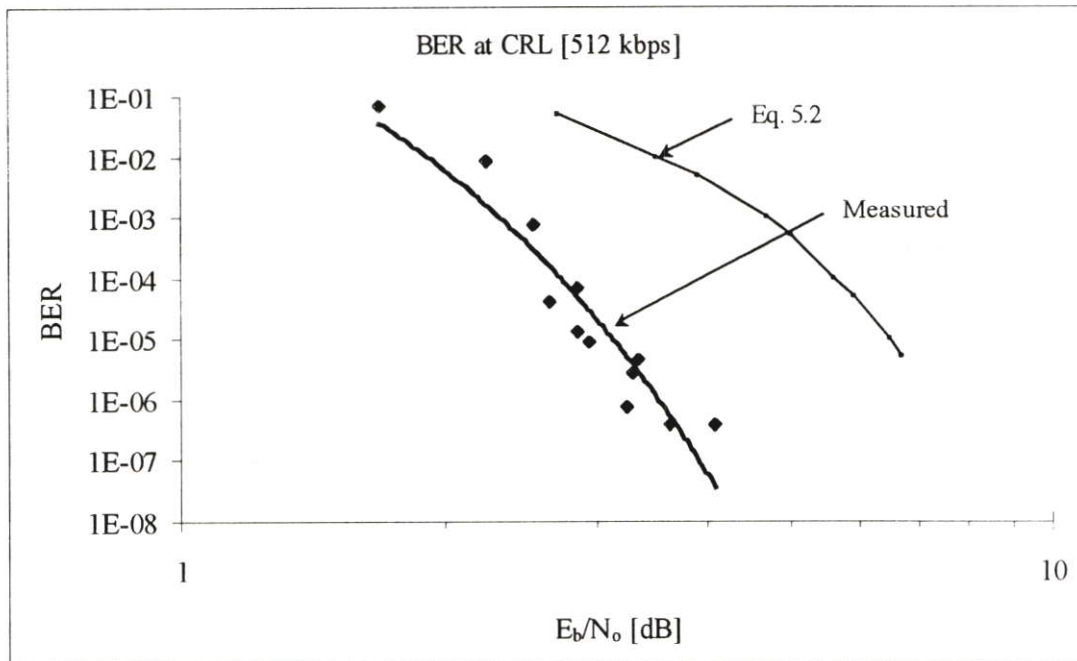


(ค) ค่า BER ที่วัดได้ที่ CRL

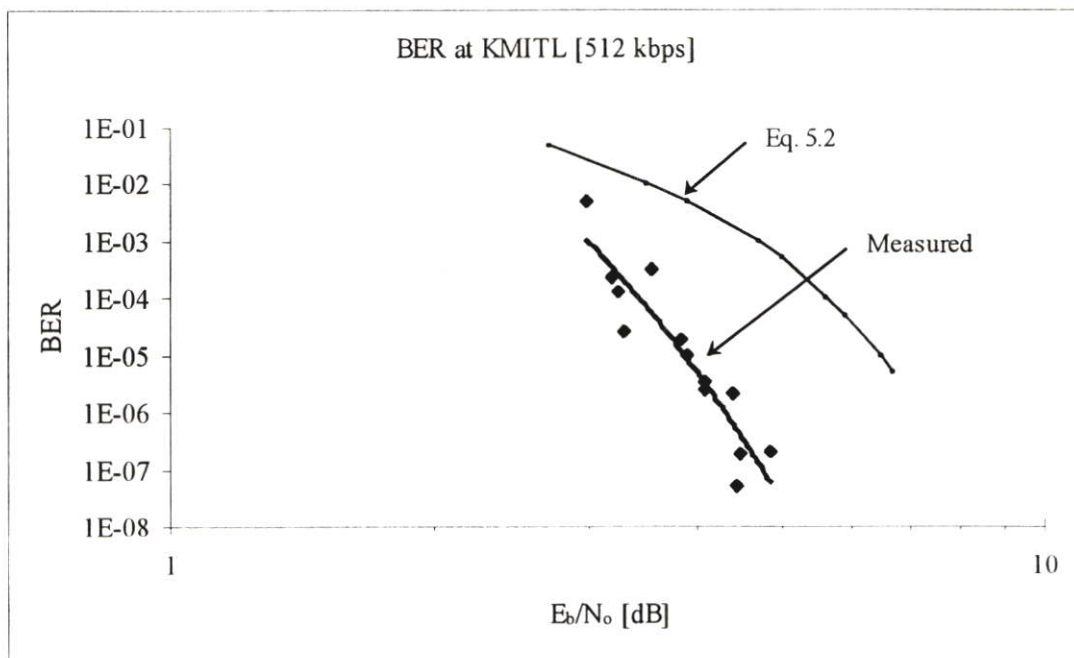


(ง) ค่า BER ที่วัดได้ที่ KMITL

รูปที่ 5.8 (ต่อ)

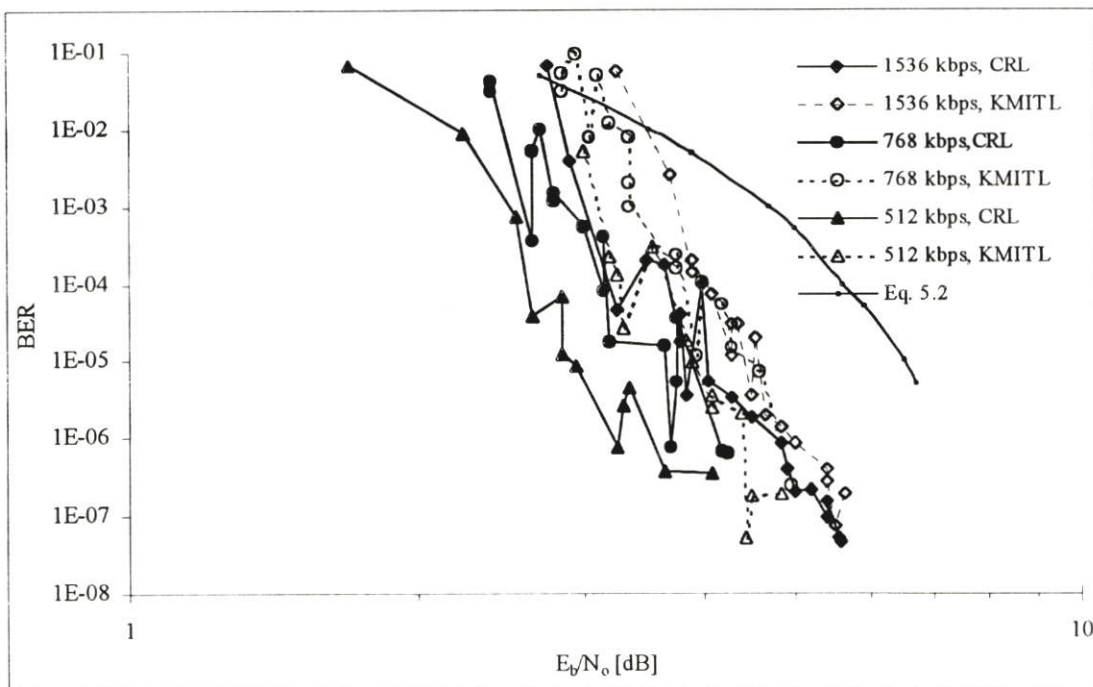


(จ) ค่า BER ที่วัดได้ที่ CRL



(ฉ) ค่า BER ที่วัดได้ที่ KMITL

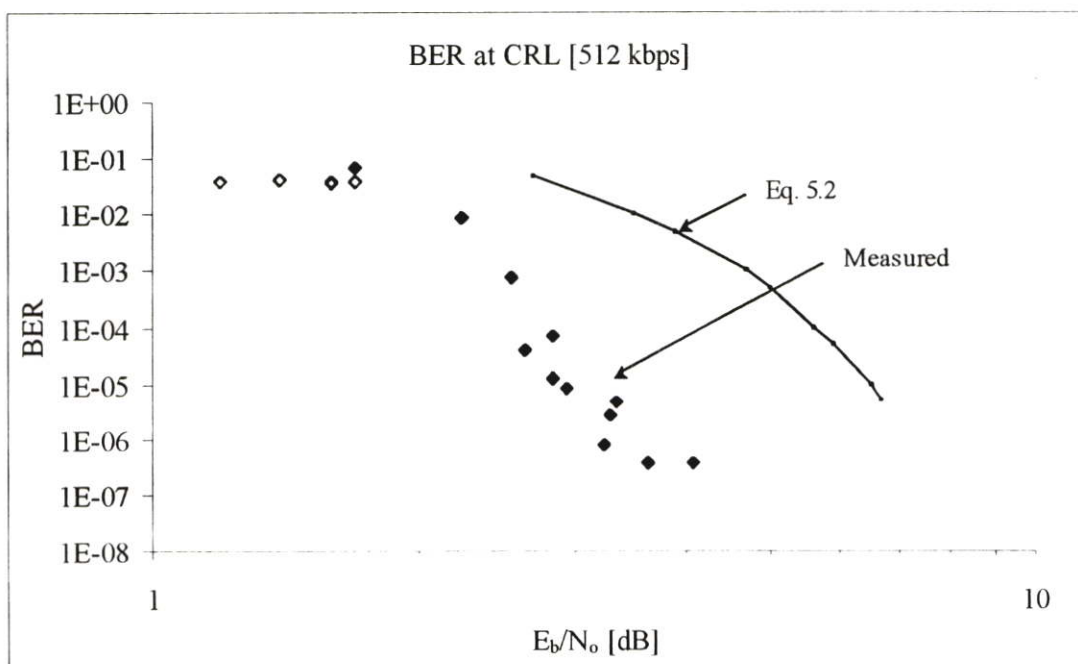
รูปที่ 5.8 (ต่อ)



(ข) ค่า BER ที่วัดได้ที่ KMITL และ CRL

รูปที่ 5.8 (ต่อ)

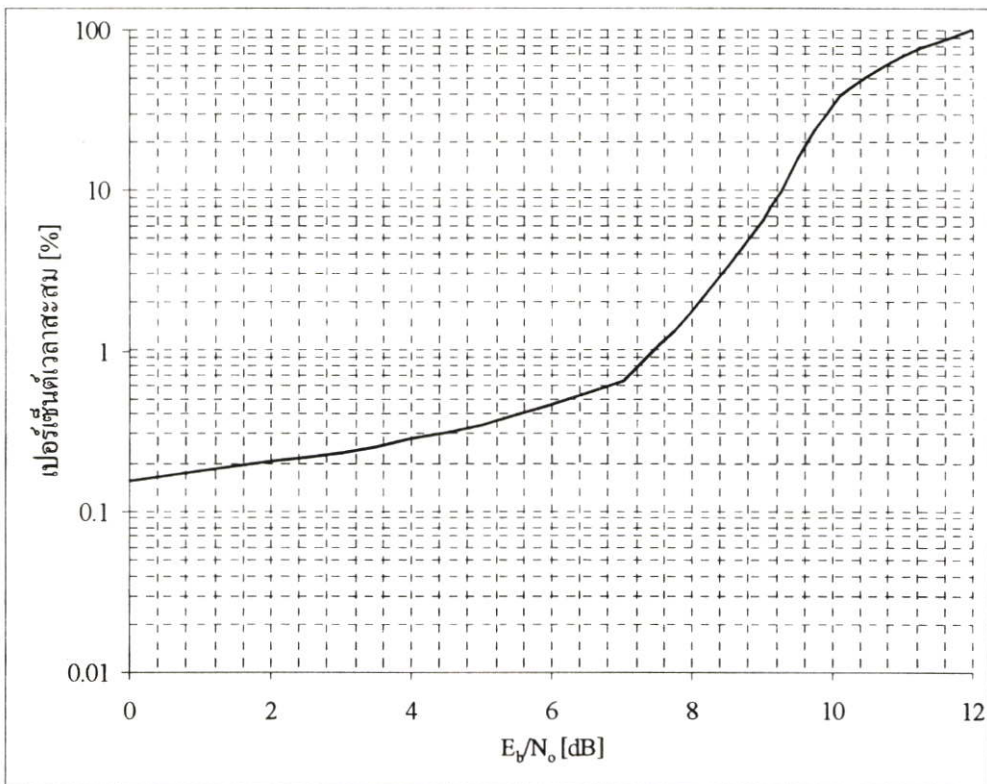
ในรูปที่ 5.8 เป็นค่า BER ที่ได้จากการเปลี่ยนค่ากำลังส่งแล้วทำการวัดค่า BER ขณะทำการลดทอนได้เกิดเหตุการณ์ฝนที่ลาดกระบัง จึงทำการวัดค่า BER ที่ค่ากำลังส่งสูงสุด ของอัตราการส่งข้อมูล 512 kbps ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ค่า BER ที่อัตราการส่งข้อมูล 512 kbps

จะเห็นได้ว่าค่า BER จะเริ่มเกิดขึ้นที่ค่า E_b/N_0 ประมาณ 5 dB และค่า BER จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนค่า E_b/N_0 อยู่ที่ประมาณ 2 dB หรือ BER ประมาณ $5 \cdot 10^{-2}$ และค่า BER จะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อ E_b/N_0 ลดลงไปกว่านี้ ในกราฟนี้ประกอบด้วยข้อมูลสองเหตุการณ์ คือ ค่า BER ที่ได้จากการเปลี่ยนค่ากำลังส่ง และค่าที่ได้จากเหตุการณ์ฝน ด้วยค่ากำลังส่งสูงสุด

จากตารางที่ 2 ค่า BW/f_c ที่อัตราการส่งข้อมูลต่างๆ คือ -3.01 dB และจากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง E_b/N_0 และ C/N จะขึ้นอยู่กับค่า BW/f_c นี้ และจากบทที่ 3 ค่า C/N ของช่องสัญญาณสื่อสารประมาณ 15 dB หรือ E_b/N_0 ประมาณ 12 dB และจากบทที่ 3 การลดทอนที่เกิดขึ้นกับสัญญาณนำร่อง จะเกิดขึ้นเท่ากับกับช่องสัญญาณสื่อสาร เมื่อทำการเปลี่ยนค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นในรูปที่ 3.18 ให้เป็นค่าอัตราส่วน E_b/N_0 จะได้ดังในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 เปอร์เซ็นต์เวลาสะสมของอัตราส่วน E_b/N_0 ที่ได้จากการลดทอน

จากรูปที่ 5.10 เมื่อเปลี่ยนค่าลดทอนของสัญญาณนำร่องให้เป็นค่า E_b/N_0 ช่วงเวลาที่ไม่สามารถทำการติดต่อได้ก็จะอยู่ที่ 0.15% ของเวลาสะสมทั้งปี หรือ ประมาณ 13 ชั่วโมง และจากรูปที่ 5.8(ข) ระบบที่ใช้ในการทดลองจะเริ่มเกิดข้อมูลผิดพลาดที่ E_b/N_0 ประมาณ 6 dB หรือจะเกิดเป็นเวลาประมาณ 0.45% ของเวลาทั้งปี หรือประมาณ 39 ชั่วโมง

บทที่ 6

สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอผลกระทบของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ต่อระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมในย่านความถี่ Ku ที่มีผลกระทบจากการลดทอนเนื่องจากฝน ซึ่งเป็นผลกระทบหลักของความถี่ย่านนี้ และ ชินทิลเลชัน ที่เกิดจากดัชนีหักเหในชั้นบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงตาม อุณหภูมิ ความชื้น และ ความกดอากาศ ในวิทยานิพนธ์นี้เน้นการลดทอนเนื่องจากฝนเป็นหลัก หลักการ แนวทางวิเคราะห์ ขอบเขตในการวิจัยได้อธิบายไว้ในบทที่ 1 ในบทที่ 2 กล่าวถึงโครงสร้างของบรรยากาศ ผลกระทบต่างๆ ที่เกิดในย่านความถี่ Ku กลไกตามธรรมชาติที่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ ปัจจัยหลักของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ย่านความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารต่างๆ ในบทที่ 3 นำเสนอผลการทดลอง การลดทอนเนื่องจากฝน ที่ทำการทดลองในช่วง เดือน ก.พ. 2543 ถึง ก.ย. 2544 จากการทดลอง ค่าการลดทอนเนื่องจากฝนและในประเทศไทย ที่ 0.01%ของเวลาทั้งปี มีค่าสูงกว่า 25 dB อันเนื่องมาจากย่านการวัดของระบบสามารถวัดได้ประมาณ 23 ถึง 25 dB ขึ้นอยู่กับค่าระดับสัญญาณรบกวนและระดับคลื่นพาห์ปกติ และอัตราการตกของฝน ที่ระดับเดียวกัน อยู่ที่ 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าที่เท่ากับอัตราการตกของฝนที่ได้จาก แบบจำลองของ ITU-R ที่มีค่า เท่ากับ 97 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เดือน ต.ค. 2543 และ พ.ค. 2544 เป็นเดือนที่มีอัตราการตกของฝนสูง และช่วงเวลาที่เกิดการลดทอนและฝนตกบ่อยคือช่วงเวลา 18:00 – 21:00 น. เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาเหตุการณ์ที่ตกต่อเนื่องกันที่อัตราการตกของฝนสูงกว่า 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงมีระยะเวลานานที่สุดประมาณ 30 นาที และเมื่ออัตราการตกของฝนเพิ่มขึ้นระยะเวลาก็จะสั้นลงเช่นเดียวกับการลดทอนของสัญญาณดาวเทียม เช่นการลดทอนที่มีค่ามากกว่า 10 dB และ 20 dB มีระยะเวลานานที่สุดประมาณ 60 นาที และ ประมาณ 35 นาที ตามลำดับ ที่การลดทอนสูงกว่า 10 dB เป็นค่าที่ทำให้เริ่มเกิดอัตราการผิดพลาดของข้อมูลขึ้น และที่การลดทอนสูงกว่า 20 dB เป็นค่าที่ระบบที่ใช้ในการทดลองไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้เลย ความกว้างของกลุ่มฝนในแนวนอนนั้นมีแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการตกของฝน กล่าวคือ ที่อัตราการตกของฝนสูงๆ ความกว้างของกลุ่มฝนจะไม่กว้างนัก และที่อัตราการตกของฝนต่ำกว่าจะมีขนาดของกลุ่มฝนที่กว้างกว่าด้วย และจากการทดลอง การเคลื่อนที่ของกลุ่มฝนส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ในระยะประมาณ 2 กิโลเมตร ใช้เวลาประมาณ 10 นาที นอกจากผลต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น ผลกระทบของเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนที่ใช้มีผลมาก ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการปรับปรุงให้เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนให้สามารถวัดอัตราการตกของฝนสูงๆ ได้ และจากผลที่เคยวัดได้สูงสุดถึง 330 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ค่าที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนที่ไม่ได้ปรับปรุงสามารถวัดได้ ประมาณ 170 มิลลิเมตร

ต่อชั่วโมง และในการเปรียบเทียบค่าการลดทอนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองของ Crane และ ITU-R ค่าที่ได้จากแบบจำลองของ Crane ในเขต H ให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้มากกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองของ ITU-R ในบทที่ 4 เสนอความสัมพันธ์ของระดับสัญญาณนำร่องและระดับสัญญาณของช่องสื่อสารจริง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นกับสัญญาณนำร่องเพื่อหาผลที่จะเกิดขึ้นกับระดับสัญญาณของช่องสัญญาณสื่อสาร ซึ่งระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมที่ใช้ในการทดลองมีค่า C/N ของช่องสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารด้วยความเร็ว 1536 kbps ในสภาพอากาศปกติ ประมาณ 15 dB หรืออีกนัยหนึ่งคือระบบนี้จะเกิดการลดทอนได้สูงสุดประมาณ 15 dB แต่การลดทอนที่ทำให้คุณภาพของโครงข่ายเชื่อมโยงนี้ลดลงในระดับที่ข้อมูลเกิดการผิดพลาดแต่ยังสามารถติดต่อสื่อสารด้วยภาพและเสียงได้นั้นมีค่าน้อยกว่า 15 dB ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 5 นอกจากนี้ยังนำเสนอเทคนิคต่างๆ ที่สามารถใช้ในการเพิ่มค่าความน่าเชื่อถือของระบบให้สูงขึ้น ทั้งเทคนิคที่ใช้ได้ทั้งระบบแอนะล็อก และ ดิจิตอล หรือเทคนิคที่ใช้ได้เฉพาะระบบที่เป็นแบบดิจิตอลเท่านั้น ในกรณีที่ต้องการแก้ปัญหาการลดทอนอย่างรุนแรง มีวิธีแก้ได้หลายวิธี เช่น โดยการเพิ่มขนาดจานสายอากาศ หรือการเพิ่มจำนวนสถานีรับ (Site Diversity) ซึ่งเป็นการแก้ไขทางกายภาพ หรือโดยการใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณ ซึ่งใช้ได้กับระบบที่ดิจิตอล โดยการลดอัตราการส่งข้อมูลให้ต่ำลง การลดอัตราการส่งข้อมูลทำให้แบนด์วิธของข้อมูลลดลงซึ่งจะทำให้ได้ค่าระดับสัญญาณคลื่นพาห้ที่สูงขึ้นที่ค่ากำลังส่งเดียวกัน แต่การลดอัตราการส่งข้อมูลลงทำให้อัตราเร็วในการส่งข้อมูลช้าลง ในกรณีที่ต้องรักษาอัตราเร็วในการส่งข้อมูลให้คงที่ ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณ เช่น ถ้าลดอัตราการส่งข้อมูลลงครึ่งหนึ่ง ก็เพิ่มช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูลอีกหนึ่งช่อง อัตราการส่งข้อมูลรวมจะยังคงที่ ในขณะที่ระดับสัญญาณคลื่นพาห้มีค่าเพิ่มขึ้น และความน่าเชื่อถือของระบบเพิ่มขึ้นด้วย แต่แบนด์วิธรวมที่ใช้ในการส่งข้อมูลก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอาจทำให้เกิดการรบกวนข้ามช่องกันได้ ในกรณีที่มีการแบนด์วิธอย่างหนาแน่น หรือในกรณีที่การส่งข้อมูลนั้นไม่จำเป็นต้องเป็นแบบ เวลาจริง (Real Time) เช่นการส่งจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ สามารถที่จะหลีกเลี่ยงช่วงที่เกิดการลดทอนอย่างรุนแรงได้โดยการหยุดส่งข้อมูลในช่วงที่เกิดการลดทอนขึ้น และเก็บข้อมูลในช่วงนั้นไว้ในหน่วยความจำ เพื่อทำการส่งใหม่หลังจากการลดทอนนั้นผ่านพ้นไปแล้ว ในบทที่ 5 นำเสนอผลการทดลองอัตราการผิดพลาดของข้อมูลที่ค่า E_b/N_0 ต่างๆ ค่า E_b/N_0 แปรผันโดยตรงกับค่า C/N ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมที่ใช้ในการทดลองใช้เทคนิคการประมวลผลทางสัญญาณเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากทฤษฎี จึงได้ค่าที่ดีกว่า แต่การเพิ่มขึ้นของอัตราการผิดพลาดของข้อมูลเพิ่มขึ้นเร็วกว่าผลที่ได้ในทางทฤษฎี ซึ่งค่าอัตราการผิดพลาดของข้อมูลจะเกิดขึ้นเมื่อค่า E_b/N_0 มีค่าประมาณ 6 dBHz จากค่าปกติที่อยู่ประมาณ 12 dBHz หรือเริ่มเกิดการผิดพลาดของข้อมูลขึ้นเมื่อสัญญาณดาวเทียมเกิดการลดทอนประมาณ 6 dB และจากค่าทางสถิติของการลดทอนเนื่องจากฝน การลดทอนของสัญญาณดาวเทียมที่มีค่ามากกว่า 6 dB เกิดขึ้นประมาณ 0.45%

ของเวลาทั้งปี หรือ ประมาณ 39 ชั่วโมง และเป็นเวลาประมาณ 0.15 % ของเวลาทั้งปี หรือ ประมาณ 13 ชั่วโมงที่ระบบไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้

จากการเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนทั้งสองชนิดคือแบบ Tipping Bucket ซึ่งสามารถวัดอัตราการตกของฝนสูงได้ และ แบบ Rain Drop ซึ่งสามารถวัดอัตราการตกของฝนได้สูงสุดประมาณ 110 mm/hr แต่ให้ความละเอียดในการวัดมากกว่า Tipping Bucket ที่ระยะเวลาการเก็บข้อมูลรายนาที อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Rain Drop มีความละเอียด 0.5 mm/hr ในขณะที่อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Tipping Bucket มีความละเอียด 30 mm/hr จะเห็นว่าอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Rain Drop ให้ค่าความละเอียดที่ดีกว่าแบบ Tipping Bucket แต่ไม่สามารถที่จะวัดอัตราการตกของฝนสูงได้ หลังจากการปรับปรุงวิธีการเก็บข้อมูลและลดขนาดของอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Rain Drop โดยการลดระยะเวลาในการเก็บข้อมูลจากรายนาที มาเป็นราย 10 วินาที และลดพื้นที่ช่องรับน้ำฝนลงครึ่งหนึ่ง ทำให้ความละเอียดในการวัดลดลง จาก 0.5 mm/hr เป็น 6 mm/hr แต่สามารถวัดอัตราการตกของฝนสูงได้ จากการคำนวณ สามารถวัดได้สูงสุดที่ประมาณ 840 mm/hr

อย่างไรก็ตาม ผลกระทบหลักต่อการสื่อสารผ่านดาวเทียมในย่านความถี่ Ku ไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารระบบแอนะล็อกหรือดิจิทัลคือการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝน การศึกษาการลดทอนสัญญาณดาวเทียมเนื่องจากฝนในย่านความถี่ Ku และลักษณะของฝน ในบริเวณแถบเส้นศูนย์สูตรอย่างเช่น ประเทศไทย ยังต้องมีการศึกษาในรายละเอียดต่อไป เพื่อให้สามารถตอบคำถามได้ว่า ในประเทศแถบนี้มีฝนตกหนักเท่าไร และเกิดการลดทอนเท่าไร

เอกสารอ้างอิง

- [1] Louis J. Ippolito Jr. **Radiowave Propagation in Satellite Communications**. New York: Van nostrand reinhold. 1986.
- [2] Robert K. Crane. **Electomagnetic Wave Propagation Through Rain**. New York: John willey &sons. 1996.
- [3] JE Allnutt. **Satellite-to-Ground radiowave propagation**. London: Peter Peregrinus. 1989.
- [4] Martin PM Hall. **Effects of the troposphere on radio communication**. London: Peter Pergrinus.1979.
- [5] ณรงค์ เหมกรณ์. การสื่อสารดาวเทียม. กรุงเทพฯ: ม.ป.ท. ม.ป.ป.
- [6] วิวัฒน์ กิรานนท์. วิศวกรรมการสื่อสาร. กรุงเทพฯ: อักษรสยามการพิมพ์. 2540
- [7] Kamilo Feher. **Telecommunications Measurements, Analysis, and Instrumentation**. New Jersey: Prentice-Hall. 1987.
- [8] Kamilo Feher Ian. **Digital Communications: Satellite/ Earth station engineering**. New Jersey: Prentice Hall. 1983
- [9] John B. Anderson. **Digital Transmission Engineering**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineering. 1999
- [10] Marvin K. Simon. **Digital Communication over Fading Channels**. New York: John willey & sons. 2000
- [11] Brent B. Welch. **Practical Programming in Tcl and Tk**. New Jersey: Prentice Hall. 1997
- [12] Matsuichi Yamada and Yuka Miura. "Rain attenuation characteristics at 12 GHz on an earth-space path" International Conference on Microwave Millimeter Wave Technology. Aug 1998
- [13] J.D. Kanellopoulos and V.A. Houdzoumis. "A model for the prediction of differential rain attenuation on adjacent Earth-space propagation paths" Radio Science, Vol. 25, Sep 1990, pp 853-864
- [14] Matsuichi Yamada et. al. "Measurement of rain attenuation at 12 GHz by using VSAT". 2000 International Symposium on Antenna and Propagation. Aug 2000
- [15] M. Yamada and Y. Karasawa. "Increase of reliability for satellite communication circuit by use of long-distance site diversity" 24th European Microwave Conference. Sep 1994

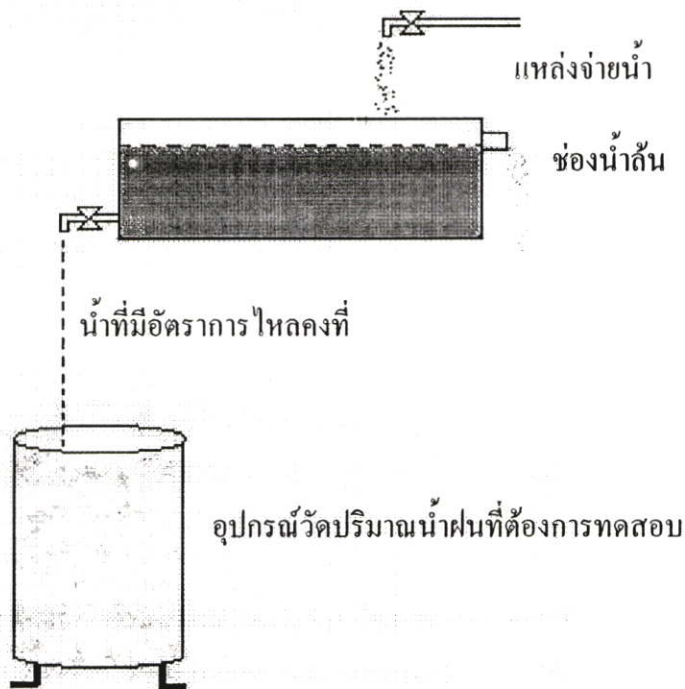
- [16] Z. X. Zhou et. al. "Cumulative distributions of rainfall rate and microwave attenuation in Singapore's tropical region". *Radio Science*, Vol. 35 May-June 2000, pp. 751-756
- [17] J. Goldhirsh et. al. "Rain Rate Statistics and Fade Distributions at 20 and 30 GHz Derived from a Network of Rain Gauges in the Mid-Atlantic Coast over a Five Year Period". *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*. Vol. 40. Nov 1992
- [18] Xuyen T. Vuong and Son T. Vuong. "Satellite Link Margin and Availability Issues". *IEEE Transactions on Broadcasting*. Vol. 43, June 1997, pp. 213-220
- [19] Jennifer Pinder et. al. "Four Years of Experimental Results from the New Mexico ACTS Propagation Terminal at 20.185 and 27.505 GHz". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Vol. 17, February 1999, pp. 153-163
- [20] B.C. Gremont et. al "Evaluation of CNR statistics satellite link with multiple countermeasures". *IEEE Electronics Letters*, May 2000, pp. 977-978
- [21] Q.W. Pan and J.E. Allnutt. "Seasonal and Diurnal Effects on Ku-Band Site-Diversity Performance Measured in a Rainy Tropical Region". *IEEE International Symposium*. Vol.3. 2001. Pp. 113-116
- [22] Recommendation ITU-R P.618-7. "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunications systems". 2001
- [23] Recommendation ITU-R P.839-3. "Rain height model for prediction methods". 2001
- [24] Recommendation ITU-R P.837-3. "Characteristics of precipitation for propagation modelling". 2001
- [25] Recommendation ITU-R P.838. "Specific Attenuation Model for Rain for use in Prediction Methods". 1999
- [26] "Technical Specification for JCSAT-1B". Japan Satellite System. 1998
- [27] "Report of Experiments in 1999 Fiscal Year" Ministry of Post and Telecommunications, Association of Radio Industries and Businesses. 2000
- [28] Stephen G. Wilson. **Digital Modulation and Coding**. London: Prentice-Hall International. 1996
- [29] Y. Karasawa et. al. "Tropospheric Scintillation in the 14/11-GHz Bands on Earth-Space Paths with Low Elevation Angles" *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Vol.36, April 1988, pp. 563-569

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน

อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน 2 ชนิด คือ แบบ Tipping Bucket และ Rain Drop อุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิด มีความละเอียดในการวัดต่างกัน จึงจำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบหาคุณลักษณะของอุปกรณ์ทั้งสอง ในการเปรียบเทียบทำการถ่ายน้ำที่ถูกลควบคุมอัตราการไหลของน้ำ ผ่านอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนที่ต้องการทดสอบ วิธีการที่ใช้ในการเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแสดงดังในรูปที่ ก.1

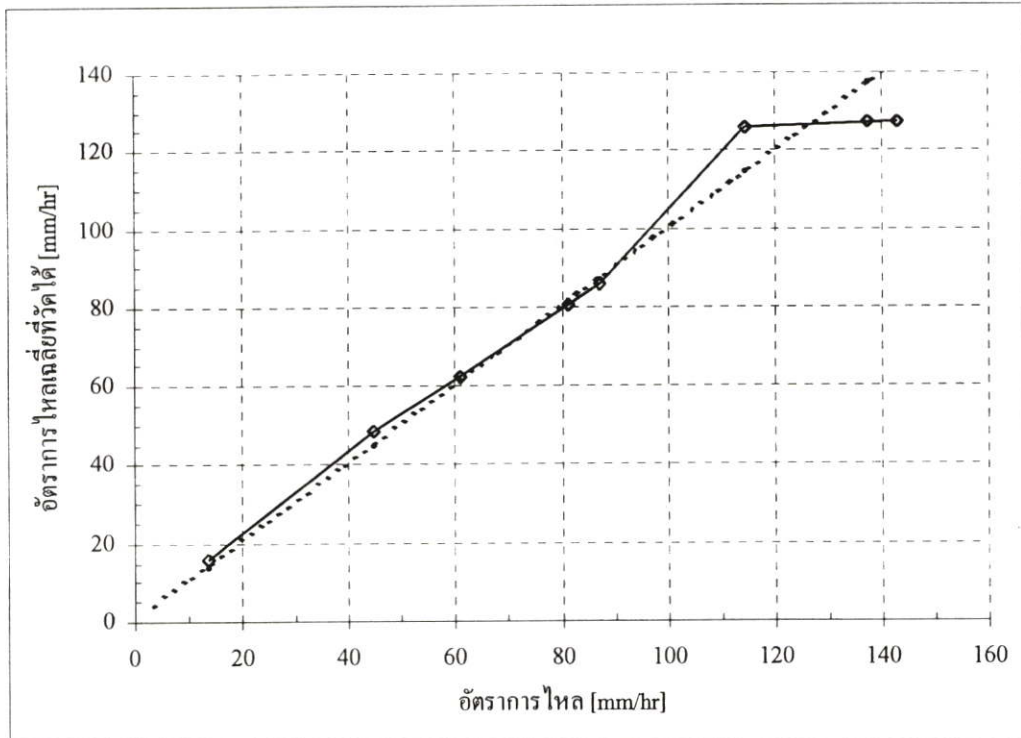


รูปที่ ก.1 วิธีการที่ใช้ในการเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน

วิธีการเปรียบเทียบทำการป้อนน้ำที่มีการควบคุมอัตราการไหล เข้าสู่ช่องรับน้ำของอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนโดยตรงดังในรูป ก.1 และด้วยการปรับวาล์ว ทำให้สามารถเพิ่มหรือลดอัตราการไหลของน้ำให้ได้อัตราการไหลของน้ำที่มีค่าเทียบเท่ากับค่าอัตราการตกของฝนที่ต้องการได้ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำ(ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที) กับอัตราการตกของฝน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) เป็นดังนี้

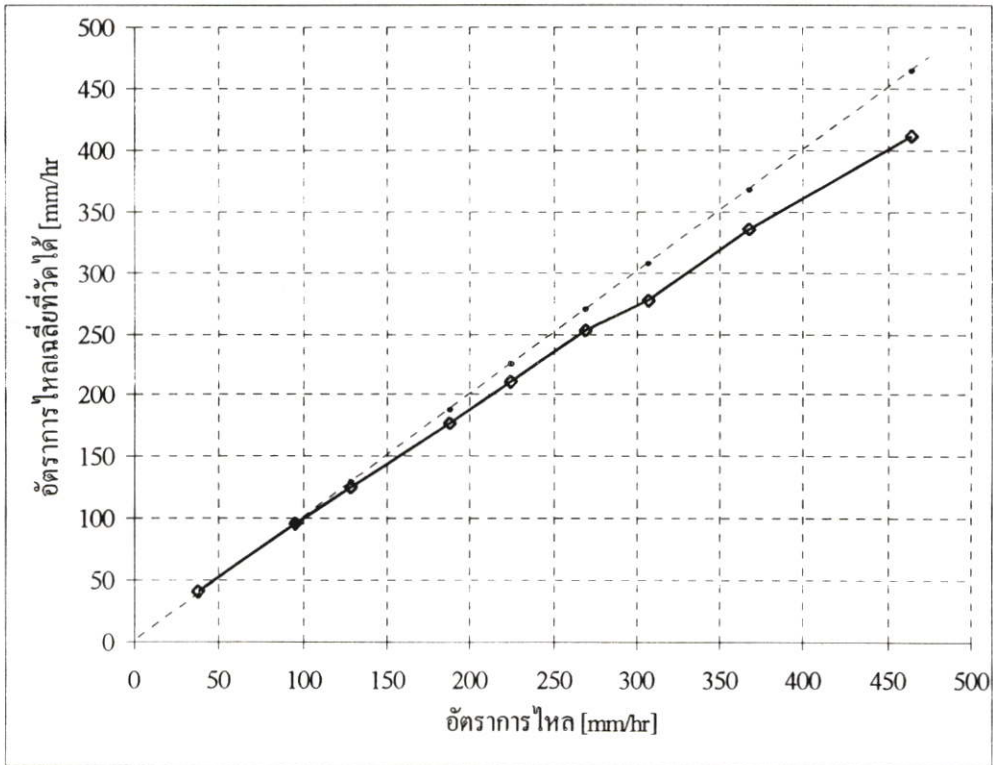
$$\text{อัตราการไหลของน้ำ (cc / min)} = \frac{\text{พ.ท.ช่องรับน้ำ (cm}^2\text{)} \times \text{อัตราการตกของฝน (mm / hr)}}{600} \quad (\text{ก.1})$$

จากสมการ ก.1 ทำให้ทราบค่าอัตราการไหลของน้ำที่มีค่าเท่ากับอัตราการตกของฝนที่ต้องการ และในการวัดอัตราการไหลของน้ำ ทำโดยใช้กระบอกตวงวัดปริมาณน้ำในช่วงเวลา 1 นาที ซึ่งทำให้ทราบอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการเปรียบเทียบได้



รูปที่ ก.2 ผลการเปรียบเทียบของอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Rain Drop

รูปที่ ก.2 แสดงผลการเปรียบเทียบของอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Rain Drop เปรียบเทียบกับเครื่องวัดในอุดมคติ (เส้นประ) ที่ให้ค่าอัตราการไหลที่วัดได้เท่ากับค่าอัตราการไหลจริง จากกราฟจะเห็นว่า ย่านการวัดของเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบหยดเมื่อใช้กับอุปกรณ์แปลงจำนวนหยดที่นับได้ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าของ Ogasawara Keiki ย่านการวัดที่วัดได้จริงกับที่ระบุไว้ในคู่มือ (0-100 mm/hr) มีค่าใกล้เคียงกัน และอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนนี้สามารถวัดได้สูงสุดประมาณ 110mm/hr และสามารถวัดอัตราการไหลต่ำได้ ค่าอัตราการไหลต่ำสุดที่สามารถวัดได้คือ 0.5mm/hr ที่ระยะเวลาการเก็บข้อมูล (Integration Time) ระยะเวลาการเก็บข้อมูลที่ต่างกันไม่มีต่อผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ แต่จะมีผลอย่างมากในการวัดจริง เนื่องจากกรณีที่อัตราการไหลสูงๆ อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Rain Drop นี้จะไม่สามารถนับหยดน้ำได้ และจากการทดสอบพบว่า จำนวนหยดน้ำที่นับได้สูงสุดที่นับได้อยู่ที่ประมาณ 14 หยดต่อวินาที หรือ 840 หยดต่อนาที หรือ 420 mm/hr แต่เมื่อนำมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ จะสามารถวัดได้สูงสุดประมาณ 110 mm/hr



รูปที่ ก.3 ผลการเปรียบเทียบของอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Tipping Bucket

รูปที่ ก.3 แสดงผลการเปรียบเทียบของอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Tipping Bucket เปรียบเทียบกับเครื่องวัดในอุดมคติ (เส้นประ) จากกราฟจะเห็นว่าย่านการวัดของเครื่องวัดนี้สามารถวัดได้จาก 30 mm/hr จนถึงประมาณ 450 mm/hr ที่อัตราการไหลประมาณ 300 mm/hr ความผิดพลาดจากการวัดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่ 250 mm/hr และ 450 mm/hr มีค่าประมาณ -7% และ -13% ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการเก็บข้อมูลรายนาที อัตราการไหลต่ำสุดที่สามารถวัดได้คือ 30 mm/hr และจะเพิ่มขึ้นทุกๆ 30 mm/hr ค่าที่วัดได้ด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบนี้จึงเป็นค่าที่หยاب กว่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Rain Drop

ประวัติผู้เขียน

ผู้เขียน นายทิมมพร บุญชุก
 วันเดือนปีเกิด 15 สิงหาคม 2517
 สถานที่เกิด จังหวัดนครศรีธรรมราช
 ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 สถานศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 พ.ศ. 2540

งานวิจัยที่สนใจ

ผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่นในชั้นบรรยากาศ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ตีพิมพ์

1. Thikumporn Boonchuk, Prakit Tangtisanon, Narong Hemmakorn, Yoshiaki Moriya, Ken Takagi. "Scintillation Characteristics of Ku-band Small-Aperture Antenna used in Thailand". Proc. Of 2000 Asia-Pacific Symposium on Broadcasting and Communications" December 2000, pp. 223-226
2. Thikumporn Boonchuk et. al. "Ku-band Satellite Signal Propagation Experiments of Post-PARTNERS Project "Proc. of 2000 International Symposium on Antennas and Propagation" August 2000, Fukuoka, Japan
3. Thikumporn Boonchuk et. al. "Result of Ku-band Satellite Signal Propagation Experiments under Post-PARTNERS Project" 2001 Asia-Pacific Radio Science Conference. August 2001, Tokyo, Japan. pp.154