

วิเคราะห์การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนในย่าน KU-BAND ด้วย
อุปกรณ์ RADIOMETER ที่มุม 90 องศา

ANALYSIS KU-BAND RAIN ATTENUATION BY RADIOMETER
EQUIPMENT AT ZENITH ANGLE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-462-1

วิเคราะห์การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนในย่าน KU-BAND ด้วย
อุปกรณ์ RADIOMETER ที่มุม 90 องศา

ANALYSIS KU-BAND RAIN ATTENUATION BY RADIOMETER
EQUIPMENT AT ZENITH ANGLE



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 41502
วัน, เดือน, ปี 19 ก.พ. 2545

b.....
.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-462-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYSIS KU-BAND RAIN ATTENUATION BY RADIOMETER
EQUIPMENT AT ZENITH ANGLE



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

2001

ISBN 974-648-462-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

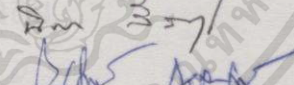
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วิเคราะห์การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนในย่าน KU-BAND ด้วยอุปกรณ์
RADIOMETER ที่มุม 90 องศา
ANALYSIS KU-BAND RAIN ATTENUATION BY RADIOMETER
EQUIPMENT AT ZENITH ANGLE

ชื่อนักศึกษา นายดุสิต โบศรี
รหัสประจำตัว 41061178
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ณรงค์ เหมกรณ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สมผล โทศลวิตร	
ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์	
รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์	
รศ.นิภา ลีลาธุจิ	
รศ.ณรงค์ เหมกรณ์	

วัน/เดือนปี ที่สอบ 25 ตุลาคม 2544 เวลา 13.30-15.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น 4 (ห้อง E12-402)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัครชู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 12 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2544

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วิเคราะห์การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนในย่าน Ku-band ด้วยอุปกรณ์ Radiometer ที่มุม 90 องศา
นักศึกษา	นายคูสิต โปศรี
รหัสประจำตัว	41061178
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ณรงค์ เหมกรรณ์

บทคัดย่อ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าการลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากฝนในย่านความถี่ Ku-Band ที่มุมเงย 90 และ 60 องศา ในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานคร ฯ โดยใช้เครื่องรับ Radiometer เป็นอุปกรณ์ในการวัดค่าการลดทอนของสัญญาณ รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วยข้อมูลทางสถิติที่มุมเงย 90 องศา รวมระยะเวลา 2 ปี และระยะเวลา 1 ปี สำหรับการวิเคราะห์ที่มุมเงย 60 องศา จากข้อมูลการวิเคราะห์ทั้งหมด 90 องศา และ 60 องศา ทำให้ทราบถึงค่าแจกแจงสะสมการตกของฝนและค่าแจกแจงสะสมการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ เช่น ในช่วงทุกๆ เวลาคาบราย 3 ชั่วโมง (00-03, 03-06, 06-09, 09-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-24), ทุกๆ เวลาคาบราย 6 ชั่วโมง (00-06, 06-12, 12-18, 18-24), ทุกๆ เวลาคาบราย 12 ชั่วโมง (00-12, 12-24), ทุกๆ เวลาคาบรายเดือน, คาบรายฤดู, คาบรายครึ่งปี, รายปี

สำหรับบุคคลที่จะทำการศึกษาหรือออกแบบระบบเกี่ยวกับเรื่องการลดทอนที่เกิดจากฝนมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่บุคคลเหล่านั้นจะต้องเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนกับการตกของฝนที่มุมเงย 90 องศาอย่างถ่องแท้เสียก่อนถึงจะทำให้การศึกษาและออกแบบระบบการลดทอนที่มุมอื่นๆ ได้อย่างถูกต้องและมีความแม่นยำสูง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่มุมเงย 60 องศาประกอบไปด้วยเพื่อจะได้เป็นข้อมูลให้การศึกษาในเรื่องนี้มีความลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น ส่วนหนึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าสมการรูปแบบการตกของฝนเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและการลดทอนเป็นแบบเลขยกกำลัง นอกจากนี้ยังพบว่า การลดทอนและการตกของฝนในแต่ละช่วงเวลาของมุมเงย 90 องศา มีความสัมพันธ์สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันมากกับมุมเงย 60 องศา

Thesis Title	Analysis Ku-band rain attenuation by radiometer equipment at zenith angle
Student	Mr. Dusit Bosri
Student ID.	41061178
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Narong Hemakon

ABSTRACT

This thesis concerns about that rain attenuation value analysis in the frequency Ku-band at zenith and 60 degree angle within Bangkok by using radiometer equipment to measure rain attenuation. The detail of data for analysis rain attenuation include statistic data which have zenith angle, collected 2 years and 60 degree, collected 1 year. The result at zenith and 60 degree is the cumulative distribution rain-intensity and cumulative distribution attenuation in every period times such as every 3 hours (00-03, 03-06, 06-09, 09-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-24), 6 hours (00-06, 06-12, 12-18, 18-24), 12 hours (00-12, 12-24), monthly, seasonal, half-annual and annual.

For rain attenuation study and design need to understand clearly of the relation between attenuation and rainfall at zenith angle very well before study and design another elevation angle. Thus, this thesis includes rain attenuation analysis at 60 degree in order to study deeply. From data analysis finds that the form of rainfall is exponential and attenuation is power equation; furthermore the attenuation and rainfall in every period time at zenith angle have relation with 60 degree.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจากท่าน
รศ.ณรงค์ เหมกรณ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกๆ ท่านที่ได้สั่งสอนให้ความรู้แก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ ดร.ราชนันท์ เหล็กกล้า เจ้าหน้าที่การสื่อสารแห่งประเทศไทย ที่กรุณาให้
คำแนะนำและให้ใช้อุปกรณ์เพื่อการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบุคคลในครอบครัวทุกท่านที่ให้แรงใจสนับสนุนมาโดยตลอดเวลา

ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาทุกท่านที่ช่วยเหลือในคำแนะนำต่าง ๆ มาโดยตลอด

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

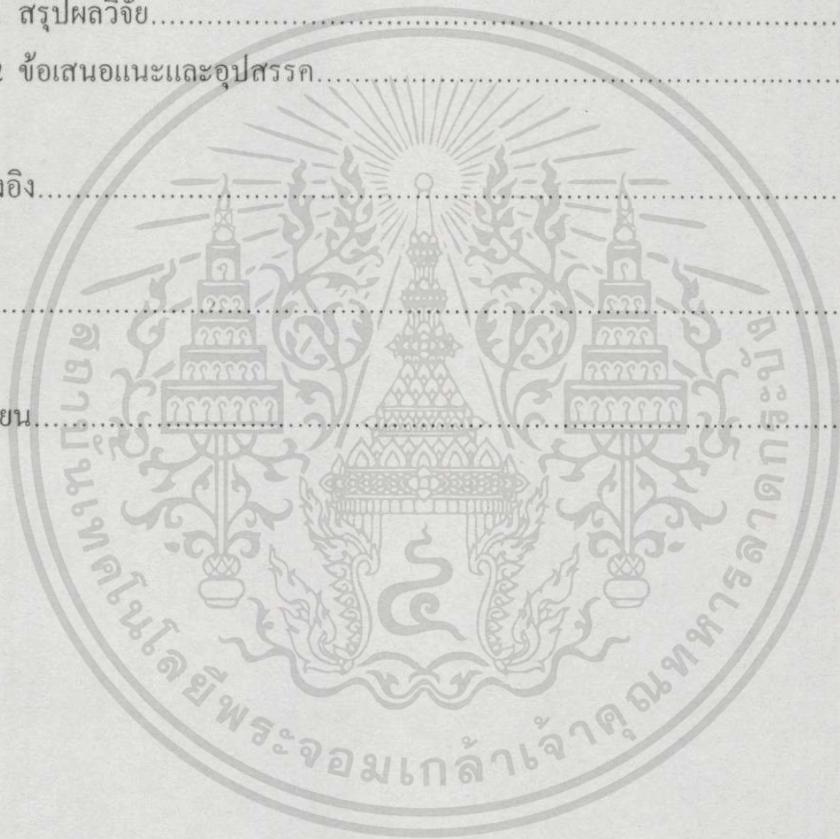
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
1.4 เปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 มาตรฐานการออกแบบระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม.....	4
1.7 ระยะเวลาในการวิจัย.....	6
บทที่ 2 ฝนกับการลดทอน.....	7
2.1 การเกิดฝน.....	7
2.1.1 ระยะเวลาการเกิดฝน.....	8
2.1.1.1 ระยะเวลาเริ่มก่อตัว (Cumulus Stage).....	8
2.1.1.2 ระยะเวลาเจริญเติบโตเต็มที่ (Mature Stage).....	8
2.1.1.3 ระยะเวลาสลายตัว (Dissipating Stage).....	9
2.1.2 ความลึกของเมฆ.....	11
2.1.3 ปริมาณน้ำฝน.....	11
2.1.4 ฤดูกาล.....	11
2.2 โครงสร้างของฝน.....	12
2.3 รูปทรงและขนาดของเม็ดฝน.....	13
2.4 ฝนกับการลดทอนในย่าน Ku-band.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ศึกษาการลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากฝนด้วยเครื่องรับ Radiometer.....	24
3.1 ทฤษฎีอุณหภูมิสัญญาณรบกวน (Sky Noise Temperature).....	24
3.2 เครื่องรับ Radiometer.....	26
3.2.1 เครื่องรับแบบ Active Radiometer.....	27
3.2.2 เครื่องรับแบบ Passive Radiometer.....	29
3.3 ความเที่ยงตรงในการวัดสัญญาณ.....	32
3.4 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของอุปกรณ์ Radiometer.....	35
3.4.1 ส่วนประกอบ.....	35
3.4.2 หลักการทำงาน.....	39
บทที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
4.1 วิเคราะห์หาค่าการลดทอน.....	41
4.2 วิเคราะห์อัตราการตกของฝน.....	44
4.3 การแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูล.....	46
4.4 วิเคราะห์ลักษณะรูปแบบของการลดทอนและการตกของฝน.....	47
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	53
5.1 ผลการทดลองที่มุม 90 องศา.....	53
5.1.1 การแจกแจงสะสมที่เกิดในทุกๆ คาบเวลา 3 ชั่วโมง.....	55
5.1.2 การแจกแจงสะสมที่เกิดในทุกๆ คาบเวลา 6 ชั่วโมงและ 12 ชั่วโมง.....	58
5.1.3 การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายฤดู.....	60
5.1.4 การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายเดือน.....	61
5.1.5 การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายครึ่งปีและรายปี.....	63
5.2 ผลการทดลองที่มุม 60 องศา.....	64
5.2.1 การแจกแจงสะสมที่เกิดในทุกๆ คาบเวลา 3 ชั่วโมง.....	64
5.2.2 การแจกแจงสะสมที่เกิดในทุกๆ คาบเวลา 6 ชั่วโมงและ 12 ชั่วโมง.....	66
5.2.3 การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายฤดู.....	68
5.2.4 การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายเดือน.....	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.5 การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายครึ่งปีและรายปี.....	71
5.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่มุม 60 องศา กับ 90 องศา.....	72
5.4 ลักษณะการทดลองที่มุม 60 องศา กับผลของ ITU-Model.....	72
บทที่ 6 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
6.1 สรุปผลวิจัย.....	75
6.2 ข้อเสนอแนะและอุปสรรค.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	79
ประวัติผู้เขียน.....	98



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณในแวนอนและแนวตั้ง.....	21
2.2 แสดงค่าอัตราการตกของฝนในแต่ละโซนที่เปอร์เซ็นต์สะสมต่างๆ.....	23
3.1 แสดงค่าคลาดผิดพลาดของสัญญาณที่รับได้เมื่อกำหนดค่า $T_m = 275 \text{ K}, 280 \text{ K},$ 285 K, 290 K ตามลำดับ.....	34
5.1 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในคาบเวลา 00-03, 03-06, 06-09, 09-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-24	57
5.2 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในคาบเวลา 00-06, 06-12, 12-18, 18-24.....	59
5.3 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในคาบเวลา 00-12, 12-24.....	59
5.4 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงฤดูฝน ฤดูร้อน ฤดูหนาว.....	60
5.5 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงรายเดือน มกราคม ถึง ธันวาคม.....	62
5.6 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงรายปี (มกราคม ถึง ธันวาคม), รายครึ่งปีแรก (มกราคม ถึง มิถุนายน) และ รายครึ่งปีหลัง (กรกฎาคม ถึง ธันวาคม).....	63
5.7 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในคาบเวลา 00-03, 03-06, 06-09, 09-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-24.....	65
5.8 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในคาบเวลา 00-06, 06-12, 12-18, 18-24.....	67
5.9 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในคาบเวลา 00-12, 12-24.....	67
5.10 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงฤดูฝน ฤดูร้อน ฤดูหนาว.....	68
5.11 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงรายเดือน มกราคม ถึง ธันวาคม.....	70
5.12 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงรายปี (มกราคม ถึง ธันวาคม), รายครึ่งปีแรก (มกราคม ถึง มิถุนายน) และ รายครึ่งปีหลัง (กรกฎาคม ถึง ธันวาคม).....	71
5.13 แสดงสมการเปอร์เซ็นต์สะสมการตกและการลดทอนที่เกิดในช่วงรายปี.....	74

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงการวางเครื่องวัดน้ำฝนไว้ตลอดเส้นทางของเครื่องรับสัญญาณ.....	3
1.2 แสดงตัวอย่างค่าแจกแจงสะสมการลดทอนของสัญญาณที่เปอร์เซ็นต์สะสมต่างๆ.....	6
2.1 ระยะเวลาเริ่มก่อตัวมีกระแสอากาศไหลขึ้นเพียงอย่างเดียว.....	9
2.2 ระยะเวลาเจริญเติบโตเต็มที่ มีทั้งกระแสอากาศไหลขึ้นและไหลลง.....	10
2.3 ระยะเวลาสลายตัวมีแต่กระแสไหลลงเพียงอย่างเดียว.....	10
2.4 แสดงโครงสร้างของฝนแบบกระจายและแบบพายุความร้อน.....	12
2.5 แสดงการตกของฝนที่เกิดจากการยกตัวของเมฆเนื่องจากความลาดเอียงของภูเขา.....	13
2.6 แสดงรูปทรงและขนาดของเม็ดฝน.....	14
2.7 แสดงการลดทอนที่เกิดจากเม็ดฝนทรงกลมกับเม็ดฝนรูปทรงไข่รี.....	15
2.8 แสดงถึงการลดทอนที่ต่างกันเมื่อขนาดของเม็ดฝนมีขนาดต่างกัน.....	15
2.9 แสดงโครงสร้างของการลดทอน	
ก. การสูญเสียของสัญญาณเนื่องจากการดูดกลืน (Absorption)	
ข. การสูญเสียของสัญญาณเนื่องจากการกระจาย (Scattering).....	17
2.10 การแบ่งโซนการแจกแจงสะสมอัตราตกของฝน.....	22
3.1 แสดงค่าอุณหภูมิที่แพร่ออกมาเนื่องจากค่า Fractional Transmissivity (σ) ที่เกิดในตัวกลาง M	25
3.2 พื้นฐานของการศึกษาด้วยอุปกรณ์เครื่องรับ Radiometer.....	27
3.3 แสดงเครื่องรับแบบ Active Radiometer เมื่อเครื่องรับอยู่ในทิศทางเดียวกับดวงอาทิตย์ อุณหภูมิที่รับได้เท่ากับ $T_s \times e^{-A/4.34} + T_m(1 - e^{-A/4.34})$ และเมื่อเครื่องรับอยู่ในทิศทางของกลุ่มฝนจะมีค่าเท่ากับ $T_m(1 - e^{-A/4.34})$	29
3.4 แสดงเครื่องรับแบบ Passive Radiometer.....	30
3.5 แสดงการสอบเทียบระหว่างเครื่องวัด Radiometer และเครื่องรับดาวเทียมนำร่อง.....	31
3.6 แสดงค่าการลดทอนในช่วงเวลาที่มีการลดทอนเกินกว่า 10 dB.....	34
3.7 แสดงอุปกรณ์ Outdoor unit.....	37
3.8 แสดงอุปกรณ์ Indoor unit.....	37
3.9 แสดงบล็อกไดอะแกรม ของอุปกรณ์ Indoor.....	38
3.10 แสดงเครื่องวัดน้ำฝนแบบคาน โยก (Tipping Bucket).....	39
3.11 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ Radiometer.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แสดงการวัดสัญญาณอุณหภูมิรบกวนด้วยเครื่องรับ Radiometer.....	42
4.2 แสดงอุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่งานสายอากาศรับได้ (T_u).....	44
4.3 แสดงค่าการลดทอนที่ได้จากการคำนวณ.....	45
4.4 แสดงวิธีการคำนวณหาค่าอัตราการตกของฝน.....	46
4.5 แสดงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากดวงอาทิตย์.....	47
4.6 แสดงช่วงเวลาของการเกิดการลดทอนและการตกของฝน.....	48
4.7 การลดทอนเกิดขึ้น โดยที่ฝนไม่ตกในตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณ.....	49
4.8 แสดงเหตุการณ์ของฝนและการลดทอนที่มุมเงย 10 องศา.....	51
4.9 แสดงระยะทาง L_g ที่มุม 60 องศา.....	51
4.10 แสดงสมมุติฐานลักษณะการลดทอนที่เกิดขึ้น โดยที่ฝนตกในเครื่องวัดน้ำฝนมีน้อย.....	52
4.11 แสดงลักษณะการลดทอนและการตกของฝนที่ได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์ Radiometer ที่มุม 60 องศา.....	52
5.1 แสดงตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการวัดรวบรวมข้อมูลที่มุม 90 องศา.....	54
5.2 แสดงค่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าการลดทอนกับอัตรา การตกของฝนที่มุม 90 องศา.....	55
5.3 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 00-03, 03-06, 06-09, 09-12.....	57
5.4 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 12-15, 15-18, 18-21, 21-24.....	58
5.5 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 00-06, 06-12, 12-18, 18-24.....	59
5.6 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 00-12, 12-24.....	60
5.7 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วง ฤดูฝน ฤดูร้อน ฤดูหนาว.....	61
5.8 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงเดือน มกราคม, กุมภาพันธ์, มีนาคม, เมษายน, พฤษภาคม, มิถุนายน.....	62
5.9 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงเดือน กรกฎาคม, สิงหาคม, กันยายน, ตุลาคม, พฤศจิกายน, ธันวาคม.....	63
5.10 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงรายปี (มกราคม ถึง ธันวาคม), รายครึ่งปีแรก (มกราคม ถึง มิถุนายน) และ รายครึ่งปีหลัง (กรกฎาคม ถึง ธันวาคม).....	64
5.11 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 00-03, 03-06, 06-09, 09-12.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 12-15, 15-18, 18-21, 21-24.....	66
5.13 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 00-06, 06-12, 12-18, 18-24.....	67
5.14 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 00-12, 12-24.....	68
5.15 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงฤดูฝน ฤดูร้อน ฤดูหนาว.....	69
5.16 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงเดือน มกราคม, กุมภาพันธ์, มีนาคม, เมษายน, พฤษภาคม, มิถุนายน.....	70
5.17 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงเดือน กรกฎาคม, สิงหาคม, กันยายน, ตุลาคม, พฤศจิกายน, ธันวาคม.....	71
5.18 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงรายปี (มกราคม ถึง ธันวาคม), รายครึ่งปีแรก (มกราคม ถึง มิถุนายน) และ รายครึ่งปีหลัง (กรกฎาคม ถึง ธันวาคม).....	72
5.19 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงรายปีที่อยู่ในช่วงเดือน มกราคม 2540 ถึงเดือนเมษายน 2543 และเดือนพฤษภาคม 2543 ถึง เดือนเมษายน 2544.....	73
5.20 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงรายปีที่มม 90 องศา (เดือนมกราคม 2540 ถึง เดือนเมษายน 2543) และมุม 60 องศา (เดือนพฤษภาคม 2543 ถึง เดือนเมษายน 2544)	73
5.21 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนที่มุม 60 องศา (เดือนพฤษภาคม 2543 ถึง เดือนเมษายน 2544) เปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ ITU-Model	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันนี้ปริมาณความต้องการในการติดต่อแลกเปลี่ยนข่าวสารมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นและมีการแข่งขันกันทางการให้บริการและราคาที่รุนแรงมากดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบเชื่อมโยงที่สามารถรองรับปริมาณความต้องการดังกล่าวได้อย่างมีคุณภาพตามมาตรฐานสากลยอมรับและมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ และระบบการติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียมก็เป็นส่วนหนึ่งในการให้บริการด้านสื่อสารที่ทั่วโลกให้การยอมรับโดยเฉพาะในย่านความถี่ C-band (6/4 GHz) ทั้งนี้เนื่องจากผลกระทบจากการลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากฝนมีน้อยเมื่อเทียบกับย่านความถี่ที่สูงขึ้น แต่ในปัจจุบันนี้ย่านความถี่ดังกล่าวไม่สามารถตอบสนองปริมาณความต้องการในการใช้งานช่องสัญญาณได้อย่างเพียงพอหลายประเทศจึงได้นำย่านความถี่ที่สูงขึ้นเช่นย่านความถี่ Ku-band (14/11 GHz) มาใช้งานเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณการใช้ช่องสัญญาณได้อย่างเพียงพอ สำหรับประเทศในภูมิภาคที่พัฒนาแล้วเช่นในภูมิภาคของกลุ่มประเทศยุโรปได้มีการศึกษาวิจัยผลการลดทอนของสัญญาณในย่านความถี่ Ku-band นี้จนสามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่สำหรับในประเทศไทยแล้วข้อมูลการศึกษาวิจัยในย่านความถี่ Ku-band มีน้อยมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นถึงปัญหาและอุปสรรคนี้จึงได้เป็นที่มาของการวิเคราะห์การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนในย่าน Ku-band

ที่ความถี่ตั้งแต่ 10 GHz ขึ้นไปฝนเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้สัญญาณหรือข้อมูลการติดต่อสื่อสารต้องสูญหายไป ในขณะที่ฝนตกดังจะสังเกตได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้ตามบ้านพักอาศัยความคมชัดของภาพจะลดลงตามอัตราการตกของฝนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นปัญหาอยู่ที่ว่าจะทราบได้อย่างไรว่าขณะที่เกิดฝนตกนั้นจะทำให้สัญญาณถูกลดทอนลงไปมากน้อยเท่าไร ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและวิจัยในเรื่องนี้อย่างจริงจัง เพื่อจะได้เป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณออกแบบระบบ (System Design) ให้สัมพันธ์ถูกต้องตรงกับค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อจะได้มีคุณภาพตามมาตรฐานสากลยอมรับโดยมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ

1.2 วัตถุประสงค์

ขณะนี้มีการใช้ดาวเทียมเพื่อการติดต่อสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลต่างๆ กันอย่างแพร่หลายรวมทั้งการรับส่งสัญญาณโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม แต่ในย่านความถี่ Ku-band แล้วสัญญาณจะมีการจางหายอย่างมากขณะที่มีฝนตก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเรื่องการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมต่ออัตราการตกของฝนที่อัตราการตกต่างๆ อย่างจริงจังและเนื่องจากการลดทอนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสัญญาณย่านความถี่ Ku-band จะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ มากมายเช่น อัตราการตกของฝน ความถี่ ขนาดของเม็ดฝน มุมของงานสายอากาศรับสัญญาณ ฯลฯ และมีตัวแปรบางตัวที่มีลักษณะค่อนข้างไม่แน่นอน (Random) ขึ้นอยู่กับภูมิอากาศของภูมิภาคนั้นๆ ทำให้การประมาณค่าตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ได้ยากยิ่งกว่าทำได้ยุ่งยากพอสมควร ดังนั้นการศึกษาลักษณะการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนในลักษณะแบบจำลอง (Simulation) จึงไม่ค่อยได้รับความนิยม การศึกษาโดยการวัดค่าการลดทอนอย่างต่อเนื่องในเวลาหลายๆ ปีแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาสถิติการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากตัวแปรต่างๆ เหล่านั้น เช่น มุมของงานสายอากาศกับอัตราการตกของฝนที่มีความถี่ต่างๆ กันไป ซึ่งวิธีแบบนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและมีความน่าเชื่อถือมากกว่า อีกทั้งในปัจจุบันสภาพภูมิประเทศดินฟ้าอากาศของโลกได้เปลี่ยนแปลงไปมากจึงจำเป็นต้องได้รับการศึกษาวิจัยเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องกับสภาพกาลในปัจจุบัน

ด้วยเหตุนี้วัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อวิเคราะห์การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนในพื้นที่เขตภาคกลางของประเทศไทยที่อัตราการตกต่างๆ ที่มุม 90 องศาและ 60 องศา ในย่านความถี่ Ku-band โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์ Radiometer มาทำการวิเคราะห์

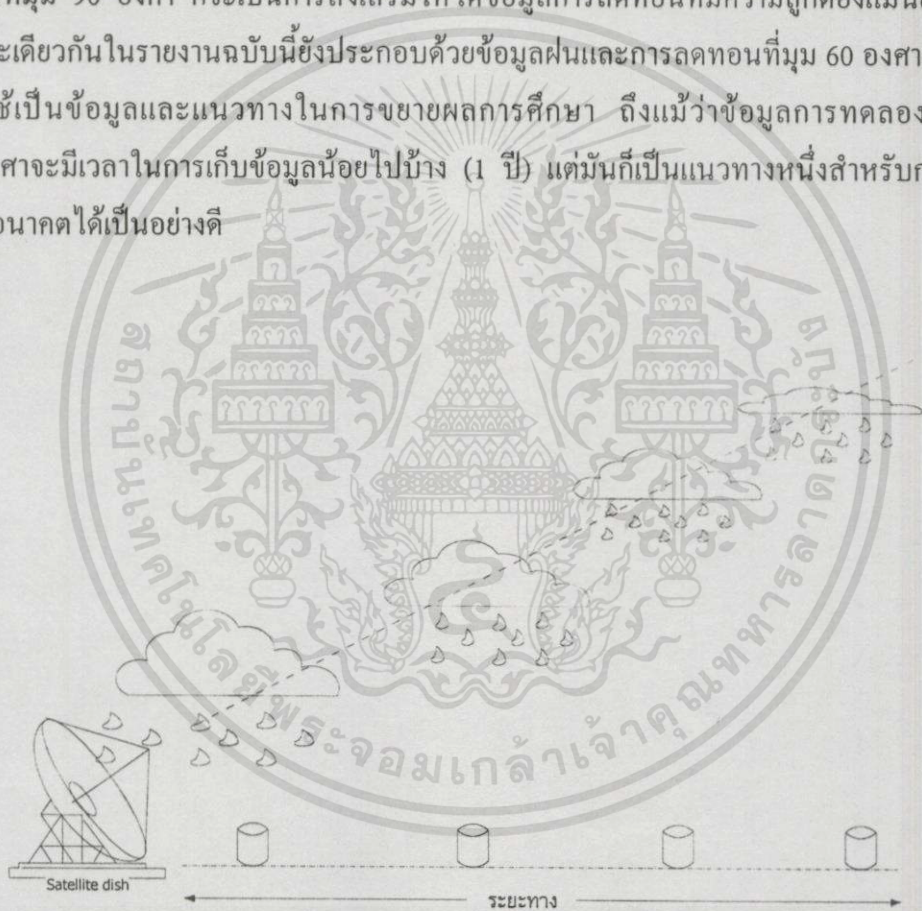
ข้อมูลที่ได้ในเชิงสถิติประกอบด้วยข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนกับอัตราการตกของฝนรวมถึงข้อมูลค่าแจกแจงสะสมการลดทอน (Cumulative distribution attenuation) และข้อมูลแจกแจงสะสมอัตราการตกของฝน (Cumulative distribution rain-intensity) ที่เกิดขึ้นในคาบเวลาต่างๆ ดังนี้

1. คาบเวลาราย 3 ชั่วโมง
2. คาบเวลาราย 6 ชั่วโมงและ 12 ชั่วโมง
3. คาบเวลารายฤดู
4. คาบเวลารายเดือน
5. คาบเวลารายครึ่งปีและรายปี

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

ในการศึกษาถึงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการลดทอนของสัญญาณกับอัตราการตกของฝน ให้ได้ความสัมพันธ์สอดคล้องด้วยกันตลอดเส้นทางการตกของฝนนั้นจำเป็นต้องมีการปรับทิศทางของงานรับสัญญาณให้ตั้งฉากกับพื้นมุม 90 องศาและวางเครื่องวัดน้ำฝน (Rainingauge) ไว้ในบริเวณเดียวกับงานรับสัญญาณ ด้วยวิธีการอย่างนี้จะเห็นว่าขณะที่ฝนตกที่หน้างานก็จะตกลงในเครื่องวัดน้ำฝนด้วยในทำนองกลับกันหากปรับทิศไว้ที่มุมน้อยกว่า 90 องศาตามรูปที่ 1.1 ก็จำเป็นจะต้องวางเครื่องวัดน้ำฝนไว้ตลอดเส้นทางที่มีการตกของฝนถึงจะได้ความสัมพันธ์ที่มีความสอดคล้องกันตลอด

วิธีหาค่าการลดทอนในลักษณะดังกล่าวที่มุม 90 องศา สำหรับในประเทศไทยแล้วยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อนอาจจะเนื่องมาจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองวิจัย (ตามรายละเอียดในหัวข้อ 1.4 เปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากมุม 90 องศาจะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการศึกษาลดทอนที่มุมอื่น ๆ เนื่องจากที่มุม 90 องศาคือโครงสร้างพื้นฐานที่มีองค์ประกอบหรือตัวแปรอื่นที่เราไม่สามารถคาดคะเนได้มีน้อยกว่าเหตุการณ์ของการลดทอนที่มุมอื่น ๆ หากผู้ที่ศึกษาหรือจะทำการออกแบบระบบไม่มีความเข้าใจในโครงสร้างที่มุมดังกล่าวจะทำให้การออกแบบระบบที่มุมอื่นมีความผิดพลาดขึ้นได้สูง ในภายภาคหน้าหากได้มีการทดลองวิจัยในรายละเอียดที่มุมอื่นๆ ประกอบด้วยแล้วนำมาทำการวิเคราะห์ร่วมกับการลดทอนที่มุม 90 องศา ก็จะเป็นการส่งเสริมให้ได้ข้อมูลการลดทอนที่มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น ขณะเดียวกันในรายงานฉบับนี้ยังประกอบด้วยข้อมูลฝนและการลดทอนที่มุม 60 องศาด้วย เพื่อจะได้ใช้เป็นข้อมูลและแนวทางในการขยายผลการศึกษา ถึงแม้ว่าข้อมูลการทดลองที่มุม 60 องศาจะมีเวลาในการเก็บข้อมูลน้อยไปบ้าง (1 ปี) แต่มันก็เป็นแนวทางหนึ่งสำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคตได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 1.1 แสดงการวางเครื่องวัดน้ำฝนไว้ตลอดเส้นทางของเครื่องรับสัญญาณ

1.4 เปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม

ตามหลักการที่มีอยู่เดิมนั้นส่วนมากจะเป็นการศึกษาหาค่าการลดทอนโดยการรับสัญญาณจากดาวเทียมนำร่อง (Satellite Beacon) ที่ส่งมาจากดาวเทียม กล่าวคือเมื่อกลุ่มฝนพาดผ่านแนวเส้นทางเดินของสัญญาณที่ส่งมาจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณก็จะทำให้ทราบได้ว่าสัญญาณ

ถูกลดทอนลงไปเท่าไร แต่หลักการแบบนี้จะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้เสมอเมื่ออัตราขยายของอุปกรณ์ที่อยู่บนตัวดาวเทียมเกิดการเปลี่ยนแปลง (Gain Variation) หรือกรณีที่ดาวเทียมเกิดเคลื่อนที่ออกไปจากตำแหน่งวงโคจรที่เคยอยู่เดิม และการศึกษาด้วยวิธีนี้จะศึกษาได้เฉพาะพื้นที่ที่สามารถมองเห็นดาวเทียมได้เท่านั้นรวมทั้งมุมการรับสัญญาณจะถูกจำกัดอยู่เฉพาะตำแหน่งที่ดาวเทียมลอยอยู่เทียบกับตำแหน่งสถานีรับเท่านั้นไม่สามารถที่จะทำการศึกษาที่มุมอื่นๆที่นอกเหนือไปจากนี้ได้ สำหรับการศึกษาค่าการลดทอนโดยใช้เรดาร์ (Radar) นั้นจะเป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้ค่าความแม่นยำค่อนข้างสูงแต่ราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ทำการศึกษาดังกล่าวนั้นมีราคาสูงมากจึงไม่ค่อยจะได้รับความนิยมมากนัก

ส่วนการทดลองวิจัยในครั้งนี้จะใช้อุปกรณ์ Radiometer ในการศึกษาค่าการลดทอนที่เกิดจากฝนโดยอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อตัวกลาง (กลุ่มฝน) มีการดูดกลืนกำลังงานตัวกลางนั้นจะต้องมีการคายหรือแผ่กำลังงานออกมาในรูปของพลังงานความร้อนรอบ ๆ ทิศทางของตัวกลางนั้น (Isotropic) เรียกพลังงานความร้อนที่แผ่ออกมานี้ว่าอุณหภูมิสัญญาณรบกวน (Noise Temperature) และเมื่อนำอุปกรณ์งานสายอากาศ (Radiometer) ไปรับอุณหภูมิดังกล่าวนี้แล้วใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เข้าช่วยก็จะทำให้สามารถทราบถึงค่าการลดทอนที่เกิดจากฝนได้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในการทดลองวิจัยในครั้งนี้จะเน้นหาค่าการลดทอนในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครฯ และพื้นที่ใกล้เคียงโดยรอบเพื่อต้องการแจกแจงให้เห็นถึงการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆที่มุม 90 องศา ซึ่งข้อมูลที่มุม 90 องศาจะเป็นข้อมูลที่ประโยชน์มากที่สุดหากได้มีการศึกษาที่มุมอื่นๆเพิ่มเติมแล้วนำข้อมูลที่ได้ออกมาวิเคราะห์ร่วมกันสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหาการลดทอนที่มุมอื่นๆ ต่อไป ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้พยายามทำการทดลองหาค่าการลดทอนที่มุม 60 องศาประกอบไว้ในเอกสารฉบับนี้ด้วยและได้พยายามทำข้อมูลให้มีรายละเอียดครบถ้วนมากที่สุดเพื่อจะได้เป็นข้อมูลสำหรับผู้ที่จะได้ทำการศึกษายกยผลต่อไป

1.6 มาตรฐานการออกแบบระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม

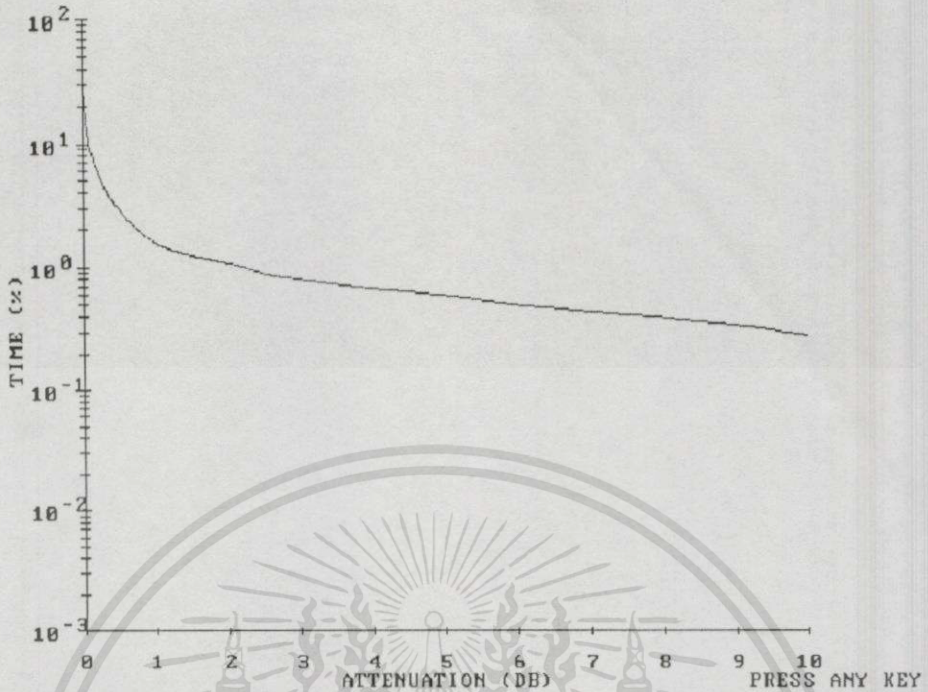
ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมปัจจุบันได้มีการพัฒนารูปแบบลักษณะการให้บริการไปมาก ดังนั้นในการนำเอาระบบสื่อสารที่อยู่ในย่าน Ku-band มาใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเสียค่าใช้จ่ายน้อยนั้นผู้ออกแบบจะต้องทราบค่าสถิติการลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากฝนในแต่ละช่วงเวลาของภูมิภาคนั้นๆ เพื่อจะได้มีการกำหนดกำลังส่งและ/หรือเผื่อค่าการลดทอน (System Margin) ได้ถูกต้อง เช่น สถิติการลดทอนสะสมในแต่ละปี, สถิติการลดทอนสะสมในแต่ละเดือน, สถิติการลดทอนสะสมในแต่ละฤดู, สถิติการลดทอนสะสมในแต่ละช่วงเวลาในรอบ 24 ชั่วโมง เช่นในรอบ 3 ชั่วโมง, รอบ 6 ชั่วโมง, รอบ 12 ชั่วโมง เป็นต้น โดยเฉพาะในช่วงเวลาบ่ายถึงค่ำ ซึ่งเป็นช่วงที่ต้องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ความสำคัญเป็นพิเศษเนื่องจากเป็นช่วงที่มีฝนตกบ่อยและเป็นช่วงที่มีผู้ใช้บริการผ่านเครือข่ายโทรศัพท์ผ่านดาวเทียมมากด้วยเช่นกันเป็นต้น

ในการออกแบบระบบสื่อสารต่าง ๆ นั้น ITU ได้กำหนดมาตรฐานการออกแบบระบบเชื่อมโยงในการให้บริการความเร็วสูงไว้ใน ITU-T Rec.G.821 และ G.826 โดยกล่าวถึงค่าเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ระบบสื่อสารไม่สามารถให้บริการได้ในระยะเวลาหนึ่งๆ (Percent Time Unavailability) เช่น 0.1% Time Unavailability หมายความว่า ระบบสื่อสารนั้น ๆ ไม่สามารถให้บริการได้คิดเป็นเวลา 0.1 % หรือ 8.7 ชั่วโมงตลอดระยะเวลา 1 ปี และในขณะนี้กลุ่มประเทศที่มีความพร้อมในการให้บริการสื่อสารโทรคมนาคมได้มีความพยายามจะนำข้อกำหนดในการคิดค่าบริการแบบใหม่มาใช้ซึ่งไม่ซ้ำทุกประเทศจะต้องมีมาตรฐานทางคุณภาพการให้บริการแบบเดียวกันรวมถึงประเทศไทยด้วย ในส่วนของการสื่อสารแห่งประเทศไทยซึ่งเป็นองค์กรหนึ่งของรัฐบาลที่เปิดให้บริการวงจรรวดเร็วสูงระหว่างประเทศก็ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดนี้ด้วยเช่นกัน กล่าวคือองค์กรผู้ให้บริการจะต้องมีการทำข้อตกลงกับผู้ใช้บริการว่าจะต้องมีการรักษาค่ามาตรฐานในการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการไว้ที่ระดับที่เปอร์เซ็นต์เช่น ข้อตกลงกำหนดไว้ว่าจะต้องมีค่า Time Availability เท่ากับ 99.9 % ตลอดทั้งปีก็หมายความว่าระบบเชื่อมโยงนั้นจะทำให้สัญญาณหรือข้อมูลที่ให้บริการขาดหายไปได้เป็นเวลาไม่เกิน 0.1% ตลอดทั้งปี และหากผู้ให้บริการไม่สามารถรักษาเวลานี้ไว้ได้ในส่วนเวลาที่มีการขาดหายของสัญญาณเกินกว่า 0.1 % นี้จะต้องคิดเป็นค่าปรับคืนไปให้ผู้ใช้บริการ (Refund) ซึ่งนั่นก็จะเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ผู้ให้บริการต้องเสียผลประโยชน์ ดังนั้นการออกแบบระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมโดยเฉพาะในย่านความถี่ Ku-band แล้วผู้ออกแบบจะต้องทราบเปอร์เซ็นต์เวลาที่สัญญาณได้ถูกลดทอนลงไปจนทำให้ระบบเชื่อมโยงไม่สามารถให้บริการได้ตามมาตรฐานสากลที่กำหนดไว้

ค่าเปอร์เซ็นต์ Time Unavailability ดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากสถิติค่าการแจกแจงสะสมการลดทอนของคาบเวลาต่าง ๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.2 เป็นการแสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนที่ได้จากการทดลองที่มุม 90 องศาในช่วงเดือนกันยายน 2540 และหากจะนำผลการทดลองนี้ไปใช้วิเคราะห์การลดทอนในภูมิภาคเขตอื่นๆอาจจะทำให้มีความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ เนื่องจากลักษณะของสภาพภูมิอากาศในแต่ละภาคมักจะมี ความแตกต่างกันและจะทำให้ค่าการลดทอนที่ได้แตกต่างกันไปด้วย การจะนำผลการศึกษาจากภูมิภาคหนึ่งไปใช้กับอีกภูมิภาคหนึ่งที่มีลักษณะภูมิอากาศแตกต่างกันย่อมจะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ซึ่งสถิติการลดทอนที่ได้จากการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำไปออกแบบระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมย่าน Ku-band ในเขตภาคกลางของประเทศไทย

RANGE: 97 SEP 01 - 97 SEP 30 00-24
BANGKOK, RADIOMETER



รูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างค่าแจกแจงสะสมการลดทอนของในช่วงเดือนกันยายน 2540

เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมให้ได้ตามมาตรฐานสากล การออกแบบระบบต้องสามารถชดเชยระดับของสัญญาณที่ถูกลดทอนให้อยู่ในระดับที่พอเหมาะและจะต้องรักษาช่วงเวลาในระบบสื่อสารใช้งานได้ (Percent Time Availability) ไม่ให้ต่ำกว่ามาตรฐาน ปัจจุบันได้มีการศึกษาวิธีการชดเชยการลดทอนของสัญญาณหลายวิธีเช่น วิธีเพิ่ม-ลดกำลังส่ง (Uplink Power Control), วิธีติดตั้งสถานีภาคพื้นดินให้ห่างกันพอเหมาะแล้วเลือกรับสัญญาณจากสถานีที่สัญญาณมีการลดทอนน้อยที่สุด (Site Diversity) [1] ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

1.7 ระยะเวลาในการวิจัย

อุปกรณ์ Radiometer ถูกติดตั้งทำการทดลองที่มุม 90 องศาตั้งแต่ต้นปี 2540 จนถึงปัจจุบัน เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 3 ปี แต่เป็นที่น่าเสียดายว่าในช่วงปี 2541 นั้นไม่สามารถทำการเก็บรวบรวมข้อมูลได้ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลองในครั้งนี้ได้รับความเสียหายจาก ไฟกระชอก (Surge) ที่เข้ามาในระบบจึงเป็นเหตุให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองได้รับความเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ และได้ทำการแก้ไขแล้วเสร็จจนสามารถทำงานได้ตามปกติในต้นปี 2542 ดังนั้นข้อมูลจากการทดลองจะประกอบด้วยข้อมูลที่มุม 90 องศาในช่วงเดือนมกราคม 2540 ถึง ธันวาคม 2540 และ พฤษภาคม 2542 ถึง เมษายน 2543 สำหรับข้อมูลการทดลองที่มุม 60 องศาเริ่มตั้งแต่เดือน พฤษภาคม 2543 จนถึงเมษายน 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฝนกับการลดทอน

ในการที่จะศึกษาเรื่องผลการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากของฝนนั้นเนื่องจากฝนเป็นปรากฏการณ์ตามธรรมชาติจึงทำให้การพยากรณ์ลักษณะการตกของฝนทำได้ยุ่งยากและจะมีผลให้การศึกษาเรื่องผลการลดทอนดังกล่าวเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ง่าย ดังนั้นผู้ที่ศึกษาในเรื่องนี้จะต้องทราบถึงลักษณะของฝนด้วยเพื่อจะได้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ค่าการลดทอนที่เกิดจากฝนได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2.1 การเกิดฝน [2-4]

โดยปกติฝนเกิดจากกลุ่มเมฆที่หนาที่บ โดยมีอากาศที่ร้อนชื้นลอยสูงขึ้นตามกระบวนการพาความร้อน (Convection) หรือผลจากสิ่งก้ำกั้มของภูมิประเทศเช่นภูเขาเมื่ออากาศร้อนและชื้นลอยตัวสูงขึ้น เมื่อไปกระทบกับอากาศเย็นที่อยู่ข้างบนจะทำให้ไอน้ำในอากาศกลั่นตัวเป็นเม็ดน้ำอนุภาคเล็ก ๆ จนทำให้เรามองเห็นในลักษณะที่เรียกว่าเมฆ โดยทั่วไปแล้วไอน้ำจะกลั่นตัวแล้วรวมกันเป็นกลุ่มเมฆที่หนาที่บจนในที่สุดกลายเป็นน้ำฝนตกลงสู่พื้นดินได้นั้นก็ต่อเมื่ออนุภาคเล็ก ๆ (Condensation Nuclei) เหล่านั้นมีจำนวนที่มากพอสมควร นับเป็นล้านๆอนุภาค และอนุภาคเหล่านั้นมารวมเข้าด้วยกันถึงจะกลายเป็นน้ำฝนได้ หากอนุภาคดังกล่าวนี้มีจำนวนไม่มากพอก็ไม่สามารถทำให้เกิดเป็นน้ำฝนได้ซึ่งในบางครั้งเราจะมองเห็นเป็นกลุ่มเมฆลอยอยู่แต่ไม่มีฝนตกเป็นต้น ทฤษฎีการเกิดฝนตั้งแต่การรวมตัวของอนุภาคเม็ดน้ำเล็กๆจนกลายเป็นฝนมี 2 กรรมวิธีคือ

1. กรรมวิธีของการชนกันแล้วรวมตัวกัน (Collision - Coalescence Process), กรรมวิธีจับตัวรวมกัน (Capture Process) และกรรมวิธีของฝนในเขตร้อน (Warm Rain Process) ในกรรมวิธีทั้ง 3 อย่างนี้มีสมมุติฐานที่เหมือนกันว่าในก้อนเมฆก้อนหนึ่งจะมีหยดน้ำที่มีขนาดเล็ก ปะปนกันอยู่เป็นจำนวนมาก หยดน้ำที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีการเคลื่อนที่เร็วกว่าหยดน้ำขนาดเล็กมันจึงเคลื่อนเข้าชนหยดน้ำขนาดเล็กในทิศทางเคลื่อนที่ของมันทำให้เกิดการรวมตัวและมีขนาดที่ใหญ่มากขึ้น (Collision and Coalescence) พฤติกรรมจะเกิดขึ้นซ้ำๆ ต่อเนื่องกันอย่างรวดเร็วจนเกิดเป็นหยดน้ำที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและหยดน้ำดังกล่าวนี้จะแตกออกแล้วเกิดกรรมวิธีที่ซ้ำๆกันอีก จนเกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่จึงทำให้เกิดเป็นเม็ดฝนมากมาย กรรมวิธีของการเกิดฝนในลักษณะดังกล่าวเป็นกรรมวิธีของฝนในเขตร้อนซึ่งเมฆจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส

2. กรรมวิธีเบอร์เจอร์รอน (Bergeron Process) ฝนซึ่งเกิดจากกรรมวิธีนี้ จะเกิดขึ้นในเมฆซึ่งมีไอน้ำผลึกน้ำแข็งและน้ำรวมกัน ซึ่งทั้ง 3 สภาวะจะอยู่ด้วยกันในเมฆที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า -40 องศาเซลเซียส เรียกน้ำที่อุณหภูมิต่ำขนาดนี้ว่า "น้ำเย็นยิ่งยวด" เมื่อไอน้ำผลึกน้ำแข็งที่เย็นนี้รวมอยู่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกันไอน้ำจะกลั่นตัวบนผลึกน้ำแข็งและมีเม็ดโตขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อผลึกน้ำแข็งโตขึ้นก็จะตกมาเป็นหิมะในเขตประเทศหนาว ถ้าตกลงมาในเขตร้อนหิมะจะละลายตกลงมาเป็นเม็ดฝนบางครั้งเรียกกรรมวิธีดังกล่าวนี้ว่ากรรมวิธีเวกเนอร์-เบอร์เจอร์อน-ฟินเดเซน (Wegener-Bergeron-Findeisen Process) ตามชื่อนักวิทยาศาสตร์ผู้ค้นพบ ดังนั้นลักษณะของน้ำที่ตกลงมาจากท้องฟ้านั้นอาจจะเป็นหิมะฝนละอองหรือลูกเห็บเรียกสิ่งดังกล่าวนี้ว่าหยดน้ำฟ้า (Precipitation) การที่น้ำตกลงมาเป็นหิมะหรือผลึกน้ำแข็งหรือเม็ดฝนขึ้นอยู่กับสภาวะภูมิอากาศโดยรอบว่าร้อนหรือเย็นเพียงใด

ในขณะที่หยดน้ำเล็กๆกว่าจะจับรวมตัวกันให้ได้หนึ่งเม็ดฝนได้นั้นจะต้องใช้เวลาและมีสภาวะที่เหมาะสม บางครั้งอาจทำให้หยดน้ำเล็กๆเหล่านี้ระเหยกกลายเป็นไอก่อนที่จะกลายเป็นเม็ดฝนดังนั้นเมฆอาจสลายไปโดยไม่มีฝนตกหรืออาจจะตกมาแล้วแต่ระเหยไปหมดก่อนจะถึงพื้นดิน เป็นต้น

ลักษณะของฝนที่เกิดในเมฆที่อยู่ระดับต่ำกว่าแนวระดับ 0 องศาเซลเซียส (Freezing Level) จะเกิดในบริเวณภูมิประเทศเขตร้อนและจำนวนของปริมาณน้ำฝนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ฐานเมฆอากาศในก้อนเมฆที่ร้อนกว่าจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำได้มากกว่าก้อนเมฆที่เย็นกว่า (ในขณะที่ลอยตัวสูงขึ้น) ส่วนฝนที่เกิดในเมฆที่ยอดบนของก้อนเมฆที่สูงกว่า (Freezing Level) จะเกิดมาจากกรรมวิธีเบอร์เจอร์รอน

2.1.1 ระยะเวลาเกิดฝน

สำหรับภูมิประเทศที่อยู่ในเขตร้อนสามารถแบ่งระยะในการก่อตัวจนเกิดเป็นฝนได้ 3 ระยะ คือ ระยะเริ่มก่อตัว (Cumulus Stage), ระยะเจริญเติบโตเต็มที่ (Mature Stage), ระยะสลายตัว (Dissipating Stage)

2.1.1.1 ระยะเริ่มก่อตัว (Cumulus Stage)

ตามที่กล่าวไปก่อนหน้านี้แล้วว่าเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของอากาศที่สูงกว่าบริเวณข้างเคียงทำให้อากาศไม่เสถียรสภาพทำให้อากาศบริเวณที่ร้อนกว่ามีการยกตัวลอยสูงขึ้นจนกระทั่งมีการควบแน่นและกลั่นตัวเป็นหยดน้ำรวมตัวกันเป็นก้อนเมฆซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.1-10 กิโลเมตร ซึ่งในระยะเริ่มก่อตัวนี้จะมีเพียงกระแสร้อนที่ไหลขึ้น (Updraft) เพียงอย่างเดียวเท่านั้นตามที่แสดงในรูป 2.1

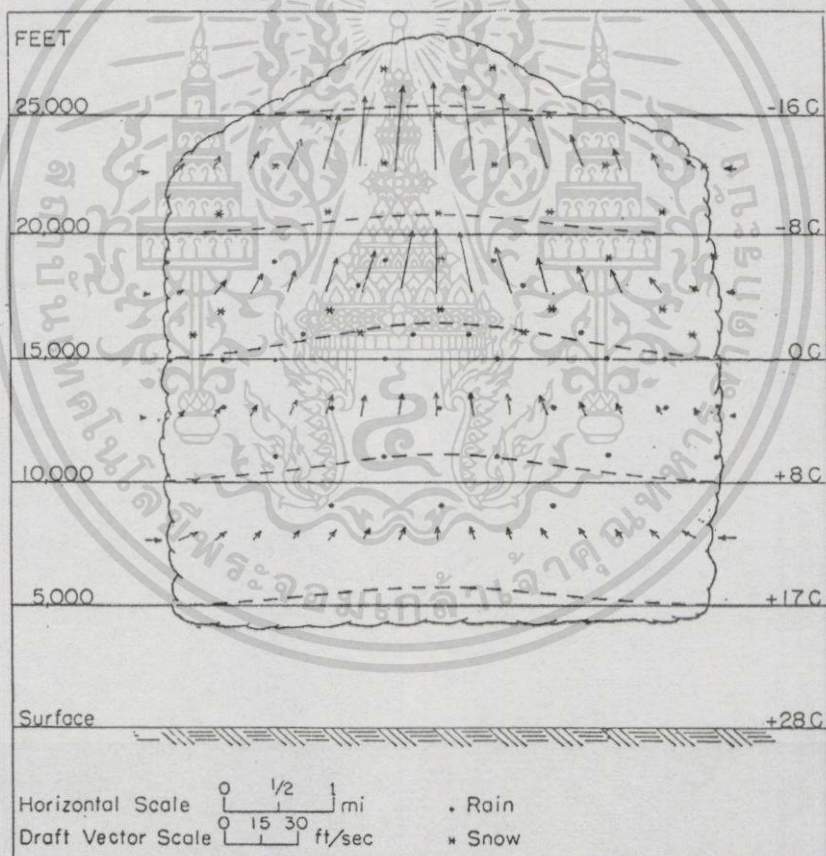
2.1.1.2 ระยะเจริญเติบโตเต็มที่ (Mature Stage)

ในระยะนี้อากาศที่ลอยตัวขึ้นไปจะมีการคลุกเคล้าในระดับข้างขึ้นข้างบนและบนลงล่าง (Both Updraft and Downdraft) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งในช่วงนี้จะมีหยดน้ำหรืออนุภาคน้ำแข็งตกลงมาจากฐานเมฆอย่างชัดเจน ขณะที่กระแสอากาศที่ไหลขึ้นและไหลลงยังคงดำเนินต่อไปนั้นมักจะมีกำลังสูงสุดในส่วนบนของเมฆในช่วงระยะเริ่มต้นของระยะเวลาเจริญเติบโตเต็มที่ และต่อมากกระแสไหล

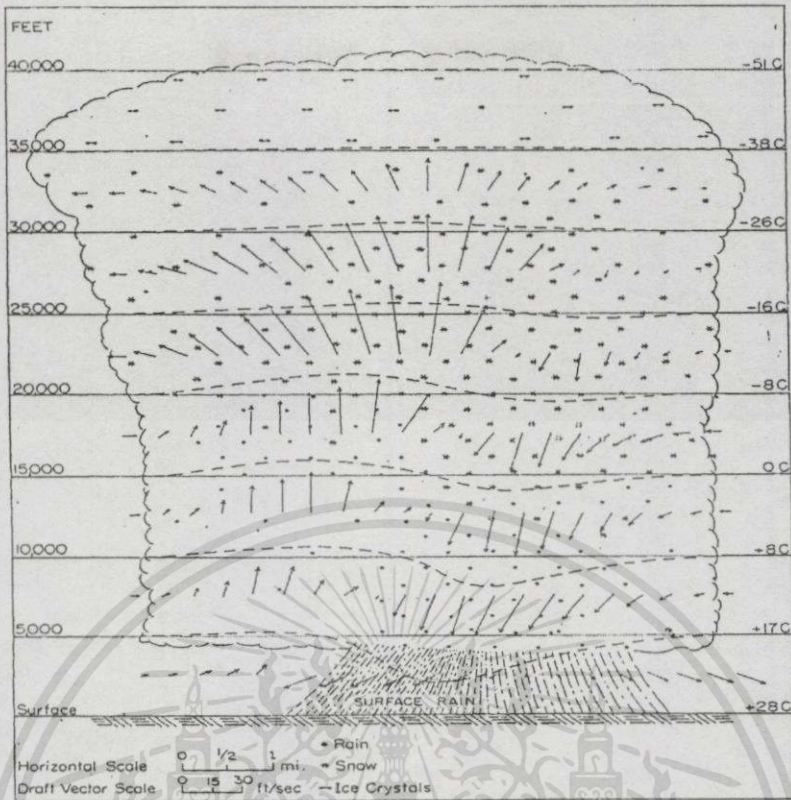
ขึ้นจะลดความรุนแรงลงแต่อากาศที่ไหลลงหรือจมลงนั้นจะถูกดันให้แผ่ออกด้านข้างที่ใกล้พื้นโลก แล้วมีวนตัวกลับขึ้นไปอีกในแนวโค้งอย่างรวดเร็วและรุนแรงจึงทำให้เกิดลมกระโชกแรงเนื่องจาก กระแสที่ไหลลงมีกำลังแรงมากโดยที่กระแสไหลลงนี้มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอากาศที่ล้อมรอบ ดังนั้นลม กระโชกแรงนี้เกิดจากกระแสไหลลงที่รุนแรงของอากาศเย็นซึ่งจะมีฝนตามลงมาด้วยและบางครั้งมี ลูกเห็บตกลงมากับกระแสไหลลงนี้ด้วย

2.1.1.3 ระยะสลายตัว (Dissipating Stage)

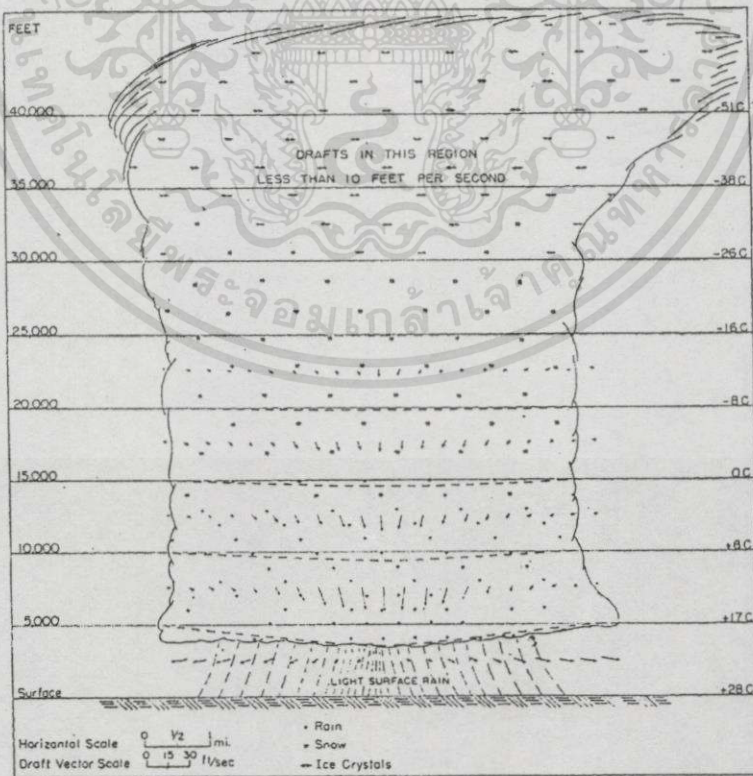
ระยะสลายตัวนี้จะเริ่มตั้งแต่ไม่มีกระแสไหลขึ้นของกระแสอากาศ (Updraft Disappears) แต่กระแสอากาศที่ไหลลงยังคงดำเนินต่อไปและยังมีฝนอยู่จนกระทั่งอุณหภูมิที่เย็นกว่ารอบๆ จะ ค่อยๆเพิ่มขึ้นจนเท่ารอบข้างเคียงและจะไม่มีการกลั่นตัวเกิดขึ้นต่อไปอีก ต่อมากระแสไหลลงจะ อ่อน ไปด้วย จนกระทั่งสลายตัวไปในที่สุด ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.1 ระยะเริ่มก่อตัวมีกระแสอากาศไหลขึ้นเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.2 ระยะเจริญเติบโตเต็มที่ มีทั้งกระแสอากาศไหลขึ้นและไหลลง



รูปที่ 2.3 ระยะสลายตัวมีแต่กระแสไหลลงเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ความลึกของเมฆ

สำหรับในภูมิภาคเขตร้อน (Tropical convective cloud) ความลึกของก้อนเมฆที่วัดตามแนวตั้งระหว่างฐานเมฆกับยอดเมฆจะมีความลึกได้ถึง 16-18 กิโลเมตร สิ่งสำคัญของก้อนเมฆยังมีความลึกมากยิ่งจะทำให้มี

1. มีฝนตกที่แรง
2. มีพื้นที่ฝนตกมาก
3. มีระยะเวลาที่ฝนตกนานขึ้น

ก้อนเมฆที่ลึกกว่าจะให้ปริมาณน้ำฝนมีมากกว่าก้อนเมฆที่มีความลึกที่น้อยกว่าเนื่องจาก

1. เมฆที่มีความลึกมากเกิดจากการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำจากไอน้ำที่มากกว่า
2. ก้อนเมฆที่มีความลึกมากย่อมมีพื้นที่มากกว่าก้อนเมฆที่มีความลึกน้อยกว่า
3. ที่บริเวณส่วนบนของก้อนเมฆที่มีความลึกหรือหนามากๆตำแหน่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจะมีการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงมากทำให้ประจุไฟฟ้าแยกเป็นประจุบวกและลบในก้อนเมฆ

สูงมากจึงทำให้เกิด ฟ้าแลบ ฟ้าร้อง ฟ้าผ่า และเกิดพายุฟ้าคะนอง

2.1.3 ปริมาณน้ำฝน

ตามกรมอุตุนิยมวิทยาได้แบ่งชื่อเรียกสำหรับการวัดปริมาณน้ำฝนที่ตกภายใน 24 ชั่วโมง

ดังนี้

- ฝนวัดจำนวนไม่ได้มีฝนตกวัดปริมาณได้น้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร
- ฝนตกเล็กน้อยวัดปริมาณได้มากกว่า 0.1 มิลลิเมตรแต่ไม่เกิน 10 มิลลิเมตร
- ฝนตกปานกลางวัดปริมาณได้ตั้งแต่ 10.1 ถึง 35 มิลลิเมตร
- ฝนตกหนักวัดปริมาณได้ตั้งแต่ 35.1 ถึง 90 มิลลิเมตร
- ฝนตกหนักมากวัดปริมาณได้ตั้งแต่ 90.1 มิลลิเมตร เป็นต้นไป

2.1.4 ฤดูกาล

กรมอุตุนิยมวิทยาแบ่งฤดูกาลในประเทศไทยไว้ 3 ฤดูกาลดังนี้

- ฤดูฝนระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม
- ฤดูหนาวระหว่างกลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์
- ฤดูร้อนระหว่างกลางเดือนกุมภาพันธ์ ถึง กลางเดือนพฤษภาคม

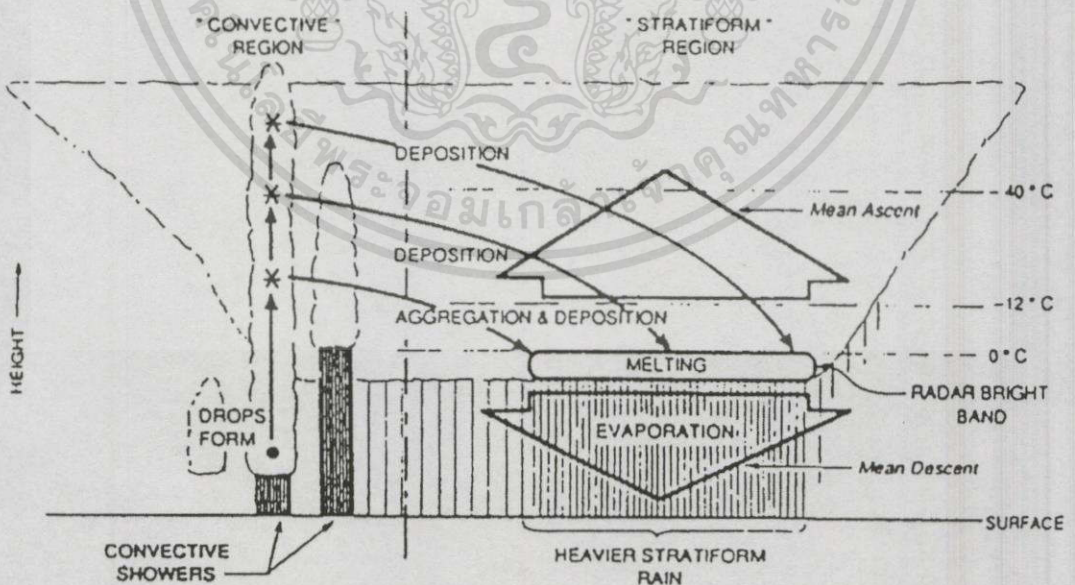
สำหรับภาคใต้จะต่างไปจากภาคอื่นๆคือทางฝั่งตะวันตกจะมีฝนตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงตุลาคม และทางฝั่งตะวันออกตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์

2.2 โครงสร้างของฝน

จากหลักของการเกิดฝนทำให้เราสามารถแบ่งโครงสร้างของฝนออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือโครงสร้างฝนแบบกระจาย (Stratiform) และโครงสร้างฝนแบบพาความร้อน (Convective) ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะเปลี่ยนไปตามสภาพภูมิอากาศ ภูมิประเทศ

สำหรับฝนแบบกระจายนั้นเกิดจากกรรมวิธีของผลึกน้ำแข็งซึ่งมีลักษณะการตกแพร่กระจายกินพื้นที่หลายตารางกิโลเมตรมีอัตราการตกของฝนต่ำ และความสูงของฝนหรือจุดหลอมละลาย (Melting Layer) ใกล้เคียงกับระยะความสูงที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส (เทียบกับระดับน้ำทะเล) หรือที่เรียกว่าตำแหน่ง 0°C Isotherm

ส่วนแบบที่สองคือฝนแบบพาความร้อน เกิดจากกรรมวิธีของการชนกันแล้วรวมตัวกัน ฝนแบบนี้มีลักษณะการตกครอบคลุมพื้นที่แคบ ๆ และตกหนัก ระยะเวลาในการตกสั้นโดยเฉลี่ยประมาณ 30 นาที จุดหลอมละลาย (Melting Layer) ไม่แน่นอน (ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการศึกษาของ ITU ที่กำหนดให้ตำแหน่ง 0°C Isotherm เป็นระยะความสูงของฝนที่ใช้ในการคำนวณค่าการลดทอนในแนว Slant Path) อีกทั้งในขณะที่มีฝนตกจะมีลมกระโชกแรงและมีฟ้าคะนองและฟ้าผ่าร่วมด้วย จึงทำให้การศึกษารลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนที่มีโครงสร้างแบบพาความร้อนทำได้ยุ่งยากและซับซ้อนมาก ลักษณะของฝนแบบนี้จะเกิดในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตรและส่วนมากจะตกในช่วงบ่ายถึงค่ำ ดังในรูปที่ 2.4 ที่แสดงถึงโครงสร้างของฝนแบบกระจายและฝนแบบพาความร้อน



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของฝนแบบกระจายและแบบพาความร้อน

ประเทศไทยมีโอกาสที่จะเกิดฝนได้จากสาเหตุต่าง ๆ โดยสังเขปดังนี้ [2]

1. ฝนที่เกิดจากการพาความร้อน (Convective Rain) เกิดจากการลอยตัวสูงขึ้นของอากาศที่อุ่นกว่าและเบากว่าอากาศที่อยู่โดยรอบความแตกต่างของอุณหภูมิอาจมีผลมาจากการที่ผิวโลกได้รับความร้อนไม่เท่ากัน ประเทศไทยมีโอกาสที่จะมีฝนชนิดนี้ได้เกือบทุกวันในระยะตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงตุลาคมซึ่งเป็นระยะที่อากาศมีความชื้นมาก เฉพาะพื้นที่ในภาคใต้เนื่องจากมีทะเลล้อมรอบ จึงอาจมีฝนชนิดนี้ได้เกือบตลอดทั้งปี แต่ส่วนใหญ่จะมีฝนตกอยู่ทางฝั่งรับลมเท่านั้น

2. ฝนภูเขา (Orographic Rain) เกิดจากการยกตัวของอากาศไปบนภูเขาที่ขวางกั้น ฝนจะตกทางซีกเขาด้านรับลม (Windward Side) ส่วนทางซีกเขาด้านปลายลม (Leeward Side) อาจมีฝนที่ถูกลมพัดเลยไปตกได้บ้างแต่ก็มีเพียงจำนวนน้อย เรียกพื้นที่ด้านปลายลมว่า “พื้นที่อับลม” (Rain Shadow) ดังนั้นจังหวัดที่อยู่ทางซีกเขาด้านปลายลมจึงมีฝนตกน้อย เช่น จังหวัดตาก จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งมีเทือกเขาตะนาวศรี ตั้งขวางลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้อยู่ และจังหวัดที่อยู่ทางซีกเขาด้านรับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะมีฝนตกมาก เช่น ที่จังหวัดระนอง จังหวัดจันทบุรี จังหวัดตราด เป็นต้น ตามรูปที่ 2.5 เป็นบริเวณของพื้นที่การเกิดฝนที่เกิดจากการยกตัวของเมฆตามความลาดเอียงของภูเขา จะเห็นพื้นที่อับฝนอยู่ด้านหลังภูเขา

3. ฝนที่เกิดจากพายุหมุน (Cyclonic Rain) เกิดจากการยกตัวของอากาศที่สอบเข้าหากันเข้าสู่ห่อความกดอากาศต่ำ หรือพายุหมุนทำให้มีฝนตกหนักมากแต่เป็นบริเวณกว้างและอาจตกติดต่อกันเป็นระยะเวลา 2-3 วัน ตามเส้นทางที่พายุเคลื่อนผ่าน ประเทศไทยมีโอกาสที่พายุนี้เคลื่อนที่ผ่านเข้ามาตอนบนของประเทศได้ในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมส่วนในภาคใต้และอ่าวไทยมีในช่วงเดือนตุลาคมถึงธันวาคมฝนดังกล่าวนี้คือตัวการให้เกิดน้ำท่วมได้



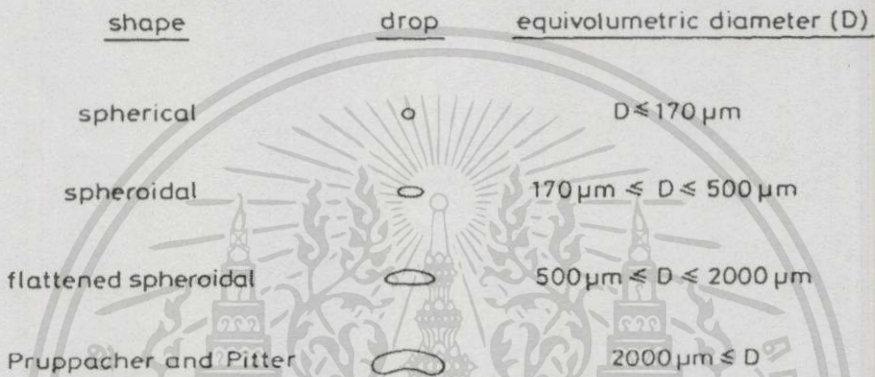
รูปที่ 2.5 แสดงการตกของฝนที่เกิดจากการยกตัวของเมฆเนื่องจากความลาดเอียงของภูเขา

2.3 รูปร่างและขนาดของเม็ดฝน [5]

รูปร่างของเม็ดฝน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงดึงที่ผิวและแรงต้านอากาศ สำหรับเม็ดฝนที่มีขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 170 ไมโครเมตร) แรงดึงที่ผิวจะมีมากกว่าแรงต้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศ ขนาดเม็ดฝนจึงมีลักษณะเป็นทรงกลม (Spherical) สำหรับเม็ดฝนที่มีขนาดประมาณ 170-500 ไมโครเมตร ขนาดของเม็ดฝนจะมีลักษณะเป็นวงรีเนื่องจากมีแรงต้านของอากาศมากกว่าแรงดึงดูด และที่เม็ดฝนขนาดระหว่าง 500-2000 ไมโครเมตรด้านบนจะมีลักษณะมนและด้านล่างจะมีลักษณะแบน แต่ถ้าเม็ดฝนมีขนาดโตมากกว่า 2000 ไมโครเมตร จะมียอเว้าที่ฐานของเม็ดฝน ซึ่งเรียกลักษณะของเม็ดฝนแบบนี้ว่า Pruppacher & Pitter เมื่อมองจากภาคตัดขวางจะมีลักษณะตามรูปที่ 2.6 จากขนาดของเม็ดฝนที่ไม่เป็นทรงกลมนี้ (ไม่สมมาตร) เมื่อสัญญาณผ่านเข้าไปในเม็ดฝนดังกล่าวแล้วนอกจากจะทำให้เกิดการลดทอนแล้ว ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนโพลาไรซ์เซชันด้วย (Depolarization)



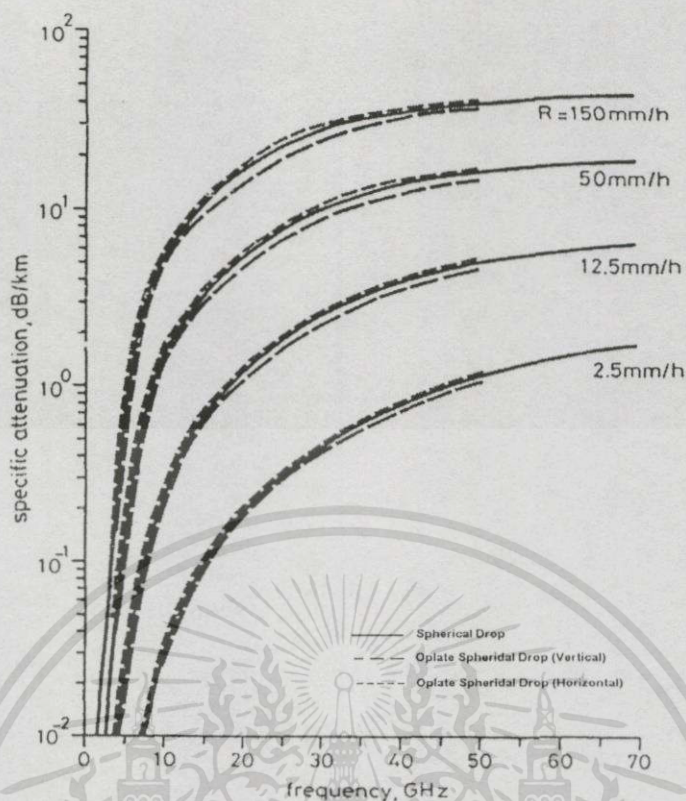
รูปที่ 2.6 แสดงรูปทรงและขนาดของเม็ดฝน

รูปทรงของเม็ดฝนจะมีอิทธิพลต่อหลักการของแรงต้าน (Aerodynamic) เมื่อเม็ดฝนตกลงมาสู่พื้นดิน เม็ดฝนทรงกลมที่มีขนาดใหญ่จะทำให้มีการเสียรูปทรงกว่าเม็ดฝนที่มีขนาดเล็ก ถึงแม้ว่ารูปทรงของเม็ดฝนจะไม่ทำให้ปริมาตรของน้ำเปลี่ยนแปลงก็ตามแต่มันจะมีผลต่อการโพลาไรซ์เซชัน (Polarization) ค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับมุมของเม็ดฝนที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างเช่นเม็ดฝนรูปทรงที่เป็นทรงกลมและรูปทรงที่เป็นรูปไข่รี (Oblate Spheroidal) จะเห็นว่าเม็ดฝนรูปทรงที่เป็นแบบรูปไข่รีจะทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณทางแนวนอน (Horizontal Polarization) มากกว่าแนวตั้ง (Vertical Polarization) ที่ความถี่และอัตราการตกต่างๆ ตามรูปที่ 2.7

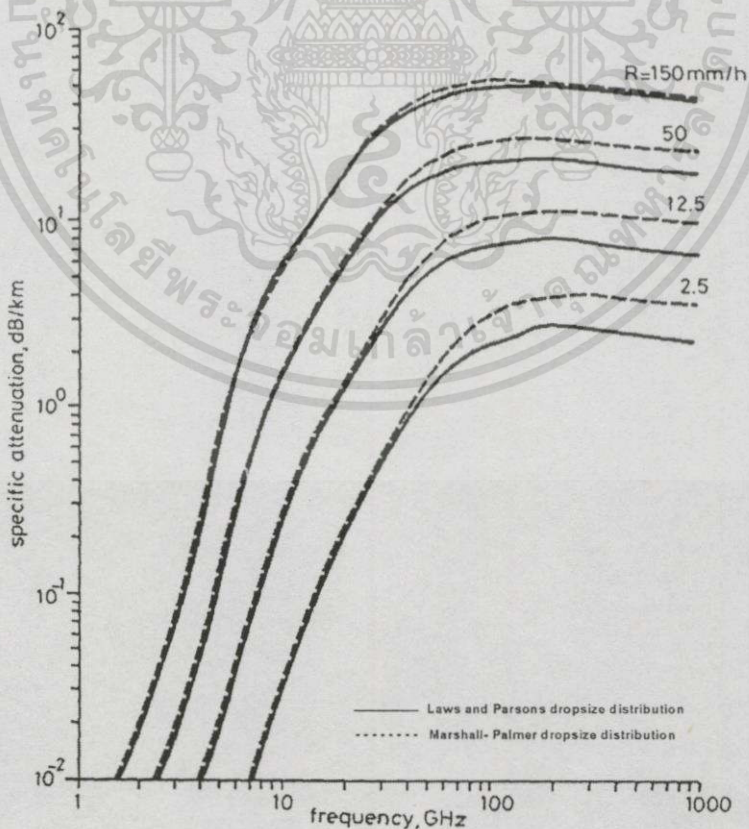
ในส่วนของ การลดทอนจะเกิดขึ้นมากเมื่อความยาวคลื่น (λ) เข้าใกล้กับขนาดของเม็ดฝน ที่ความถี่ต่ำกว่า 10 GHz เม็ดฝนที่มีขนาดเล็กจะไม่มีผลกระทบต่อ การลดทอนมากนัก แต่ที่ความถี่สูงกว่า 10 GHz ขนาดของเม็ดฝนจะมีผลกระทบต่อ การลดทอนสูง ตามผลการศึกษาของ Marshall and Palmer ที่มีจำนวนเม็ดฝนขนาดเล็กมีปริมาณมากกว่าเม็ดฝนขนาดเล็กตามการศึกษาของ Laws and Parsons ที่มีจำนวนเม็ดฝนขนาดเล็กน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราการตกเดียวกันและประมาณว่าเม็ดฝนเป็นแบบทรงกลมที่ความถี่ตั้งแต่ 10 GHz ขึ้นไปจะเห็นว่า การทดลองของ Marshall and Palmer จะมีค่าการลดทอนสูงมากกว่าการลดทอนของ Laws and Parsons ตามรูปที่

2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยวิธีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงการลดทอนที่เกิดจากเม็ดฝนทรงกลมกับเม็ดฝนรูปทรงไข่



รูปที่ 2.8 แสดงถึงการลดทอนที่ต่างกันเมื่อขนาดของเม็ดฝนมีขนาดต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ฝนกับการลดทอนในย่าน Ku-band [5]

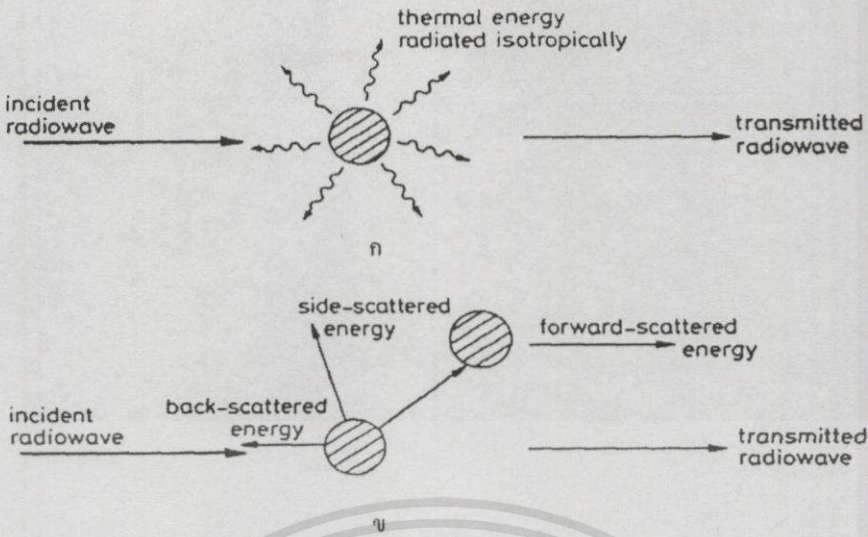
การลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากฝนสำหรับในย่านความถี่ Ku-band เกิดจากสาเหตุหลัก ๆ ด้วยกัน มี 3 ประการคือ

ประการแรกเกิดจากการดูดกลืนพลังงาน (Absorption) เกิดขึ้นเมื่อความยาวของคลื่นมีขนาดใกล้เคียงกับเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดฝนเปรียบเสมือนว่าเม็ดฝนเป็นตัวนำที่ไม่สมบูรณ์ เมื่อคลื่นแม่เหล็กเดินทางผ่านเม็ดฝนจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำมีกระแสเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น (Displacement Current) นั่นคือเมื่อมีกระแสเคลื่อนที่ย่อมจะทำให้เกิดการดูดกลืนพลังงานเกิดขึ้น ดังนั้นที่ความถี่ยิ่งสูงจะทำให้มีกระแสเคลื่อนที่มากขึ้นจึงทำให้เม็ดน้ำฝนต้องดูดกลืนพลังงานไว้มากยิ่งขึ้น

ประการที่สองการกระจายของคลื่น (Scattering) เมื่อคลื่นเดินทางกระทบกับเม็ดฝนจะทำให้คลื่นบางส่วนเกิดการแตกกระจายออกทุกทิศทางของเม็ดฝนทำให้สัญญาณที่ควรจะได้รับในทิศทางที่ต้องการลดน้อยลงไป หรือการกระจายของคลื่นในลักษณะดังกล่าวนี้สัญญาณบางส่วนอาจจะไปกระทบ (Interference) กับขั้วการสื่อสารอื่นๆที่อยู่ในความถี่เดียวกันนี้ได้

ประการที่สามการดีโพลาไรซ์เซชัน (Depolarization) เนื่องจากเม็ดฝนมีลักษณะที่ไม่เป็นทรงกลมโดยสมบูรณ์โดยเฉพาะขณะเมื่อฝนตกแรงและมีลมพัดจะทำให้เม็ดฝนมีลักษณะไม่เป็นทรงกลมมากขึ้นการลดทอนก็จะยิ่งมากขึ้นด้วยเป็นลำดับ

การลดทอนของสัญญาณคลื่นวิทยุพิจารณาในส่วนของ การดูดกลืนและการกระจายที่เกิดจากฝน ตัวอย่างของการดูดกลืนเมื่อมีการส่งกำลังงานเข้าไปในวัตถุ (เม็ดฝน) วัตถุนั้นก็จะมีความร้อนเกิดขึ้นและจะมีการแพร่กระจายออกในทุกทิศทางรอบวัตถุนั้น ซึ่งวัตถุนั้นนั้นจะแพร่ความร้อนออกมามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของวัตถุนั้นว่ามีความสามารถในการดูดกลืนมากหรือน้อยตามกฎของ Kirchhoff's Laws และกำลังงานที่เหลือส่วนหนึ่งจะทะลุผ่านวัตถุนั้นไป ในส่วนการกระจายนั้น เป็นการกล่าวถึงกำลังงานที่ส่งเข้าไปกระทบกับวัตถุด้วยการสะท้อนกระจายออกไปในทิศทางต่างๆ เช่น Back Scattering เป็นการกระจายกำลังงานสวนทางกับกำลังงานที่ป้อนเข้าไป, Side Scattering คือกำลังงานจะมีการกระจายออกไปด้านข้าง ซึ่งการกระจายในลักษณะนี้มีโอกาสที่จะไปรบกวนกับระบบสื่อสารอื่นๆ ได้ และการกระจายแบบ Forward Scattering นั้นจะเกิดขึ้นหลังการกระจายของกำลังงานในอันดับที่หนึ่งผ่านไปแล้ว Forward Scattering สามารถจะเกิดขึ้นได้ทั้งแบบเสริม (Coherent) และแบบหักล้าง (Incoherent) กับกำลังงานที่ส่งเข้าไปตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นการลดทอนที่เกิดจากการดูดกลืนและการกระจายไปในอันดับทิศทางต่างๆ



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของการลดทอน

- ก. การสูญเสียของสัญญาณเนื่องจากการดูดกลืน (Absorption)
- ข. การสูญเสียของสัญญาณเนื่องจากการกระจาย (Scattering)

สมการค่าการลดทอน (Attenuation; A) ที่เกิดจากการดูดกลืนและการกระจายสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$A_{Total} = A_{Absorp} + A_{Scatter} \tag{2.1}$$

การลดทอนที่ว่าเป็นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของความยาวคลื่น (λ), รัศมีของเม็ดฝน (r), ดัชนีการหักเหเชิงซ้อน (Complex index of reflection) ของเม็ดฝน (m)

ถ้าขนาดของเม็ดฝนมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นการกระจายของคลื่นก็จะมีน้อยมาก (ตามทฤษฎีการกระจายของแสง) โดยเฉพาะที่ความถี่ต่ำกว่า 10 GHz แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นจะเป็นเหตุให้การกระจายและการดูดกลืนมากตามไปด้วย เมื่อเทียบกับขนาดของเม็ดฝนในการคำนวณเพื่อหาค่าการลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากเม็ดฝนต้องมีการตั้งสมมุติฐานว่า เม็ดฝนแต่ละเม็ดเป็นแบบทรงกลมและแต่ละเม็ดเป็นอิสระจากกันและความเข้มของคลื่นลดลงเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เมื่อคลื่นวิทยุผ่านกลุ่มฝน (L) ดังนั้นกำลังงานที่รับได้

$$P_r = P_t e^{-kL} \tag{2.2}$$

เมื่อ

P_r คือ กำลังงานที่รับได้

P_t คือ กำลังงานที่ส่งเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน

L คือ ระยะทางในแนว Slant Path

เมื่อแสดงให้อยู่ในรูปของการลดทอน (A) จะได้

$$A = 10 \log pt / pr \quad (2.3)$$

$$A = KL \times 4.34 \quad (2.4)$$

$$K = Q_{Absorp} + Q_{Scatter} = Q_{Total}(r, \lambda, m) \quad (2.5)$$

ในการคำนวณค่าการลดทอนตลอดแนวเส้นทางการตกของฝนจำเป็นต้องรวมการลดทอนที่เกิดจากเม็ดฝนแต่ละเม็ดเข้าด้วยกัน แต่เนื่องจากรัศมีของเม็ดฝนแต่ละเม็ดมีค่ารัศมีไม่เท่ากันการคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอน (K) จึงทำโดยวิธีการอินทิเกรตจากขนาดของเม็ดฝนตลอดเส้นทางดังนี้

$$K = \int Q_{Total} n(r) dr \quad (2.6)$$

Q_{Total} หาได้จากทฤษฎีการแตกกระจายของ Mie (Mie Efficiency Factor) และเมื่อกำหนดให้ค่าการลดทอนเทียบกับ 1 กิโลเมตร ($L=1$) จากสมการที่ (2.4) จะได้ค่าการลดทอนดังนี้

$$A = 4.34 \int Q_{Total} n(r) dr \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.7) เป็นเพียงแนวทางของทฤษฎีเท่านั้นในความเป็นจริงเม็ดฝนไม่ได้เป็นทรงกลมโดยตลอดและการกระจายของเม็ดฝนไม่คงที่สม่ำเสมอตลอดแนว Slant Path แปรผันตามเวลา ตามฟังก์ชันในสมการที่ (2.7) จึงเป็นการยากที่จะหาค่าการลดทอนของสัญญาณให้ได้ค่าที่ถูกต้อง วิธีที่ดีที่สุดคือการหาโดยใช้ข้อมูลที่ได้ในเชิงสถิติด้วยระยะเวลาที่นานพอสมควรจะทำให้ได้ค่าความแม่นยำมากกว่า

จากหลักการเบื้องต้นดังกล่าวได้มีการศึกษาโดย D.V. Roger & R.L. Olsen พบว่าค่าการลดทอนจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความถี่และอัตราการตกของฝน เมื่อความยาวคลื่นมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของเม็ดฝนจะทำให้มีการลดทอนเกิดขึ้นได้สูง โดยเฉพาะตั้งแต่ความถี่ 10 GHz ขึ้นไป ซึ่งค่าการลดทอนจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการตกของฝน โดยค่าการลดทอนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ประมาณ 100 GHz และค่าการลดทอนจะลดลงเล็กน้อยที่ความถี่ประมาณ 1000 GHz เมื่อกำหนดให้เม็ดฝนเป็นแบบทรงกลม, ขนาดเม็ดฝนเป็นแบบ Laws & Parson และความเร็วของเม็ดฝนแบบ Gunn & Kinzer

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการลดทอนที่เกิดจากฝนตามการศึกษาของ D.V. Roger & R.L.Olsen พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการลดทอนกับอัตราการตกของฝนเป็นแบบเลขยกกำลัง (Power Equation) ดังนี้

$$\alpha = aR^b \quad \text{dB/km} \quad (2.8)$$

เมื่อ α คือค่าการลดทอน (dB/km)

และ R คืออัตราการตกของฝน (mm/h)

a และ b จะเปลี่ยนไปตามความถี่และอุณหภูมิเฉลี่ยของฝน จากการคำนวณหาค่า a และ b ตามข้อมูลการศึกษาทดลองการกระจายเม็ดฝนของ Marshall and Palmer, Laws and Parsons และ Joss ที่อุณหภูมิ -10, 0, 20 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ตั้งแต่ 1-1000 GHz นั้น ต่อมาในภายหลังข้อมูลดังกล่าวนี้ CCIR (ITU-R ในปัจจุบัน) ได้นำมาทำการรวบรวมใหม่ในความถี่ตั้งแต่ 1-400 GHz โดยแทนค่าใหม่ให้ $a=k$ และ $b=\alpha$ และค่าการลดทอนถูกแทนด้วยเครื่องหมาย γ ดังนั้นจึงเขียนสมการใหม่ตาม Recommendation ITU-R ได้ดังนี้

$$\gamma = k \times R^\alpha \quad (2.9)$$

เมื่อ K, α คือสัมประสิทธิ์การลดทอนในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้งโดยมีค่า $K_h, K_v, \alpha_h, \alpha_v$ ที่ความถี่ต่างๆ ตามรายละเอียดในตารางที่ 2.1 หากระบบมีโพลาไรซ์เซชันแบบวงกลม (Circular Polarization) ค่า K และ α สามารถหาได้ดังนี้ [6]

$$K = [k_h + k_v + (k_h - k_v) \cos^2 \theta \cos 2\tau] \div 2 \quad (2.10)$$

$$\alpha = [k_h \alpha_h + k_v \alpha_v + (k_h \alpha_h - k_v \alpha_v) \cos^2 \theta \cos 2\tau] \div 2K \quad (2.11)$$

เมื่อ θ เป็นมุมของแนว Slant Path และ τ เป็นมุมของการทำโพลาไรซ์เซชัน (ที่โพลาไรซ์เซชันเป็นแบบวงกลม τ จะเท่ากับ 45 องศา)

นอกจากนี้เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (K, α) แล้วใน Recommendation ITU-R ยังได้มีการกำหนดอัตราการตกของฝน (R) ที่ตกในภูมิภาคต่างๆ โดยแบ่งออกเป็นโซนบนพื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

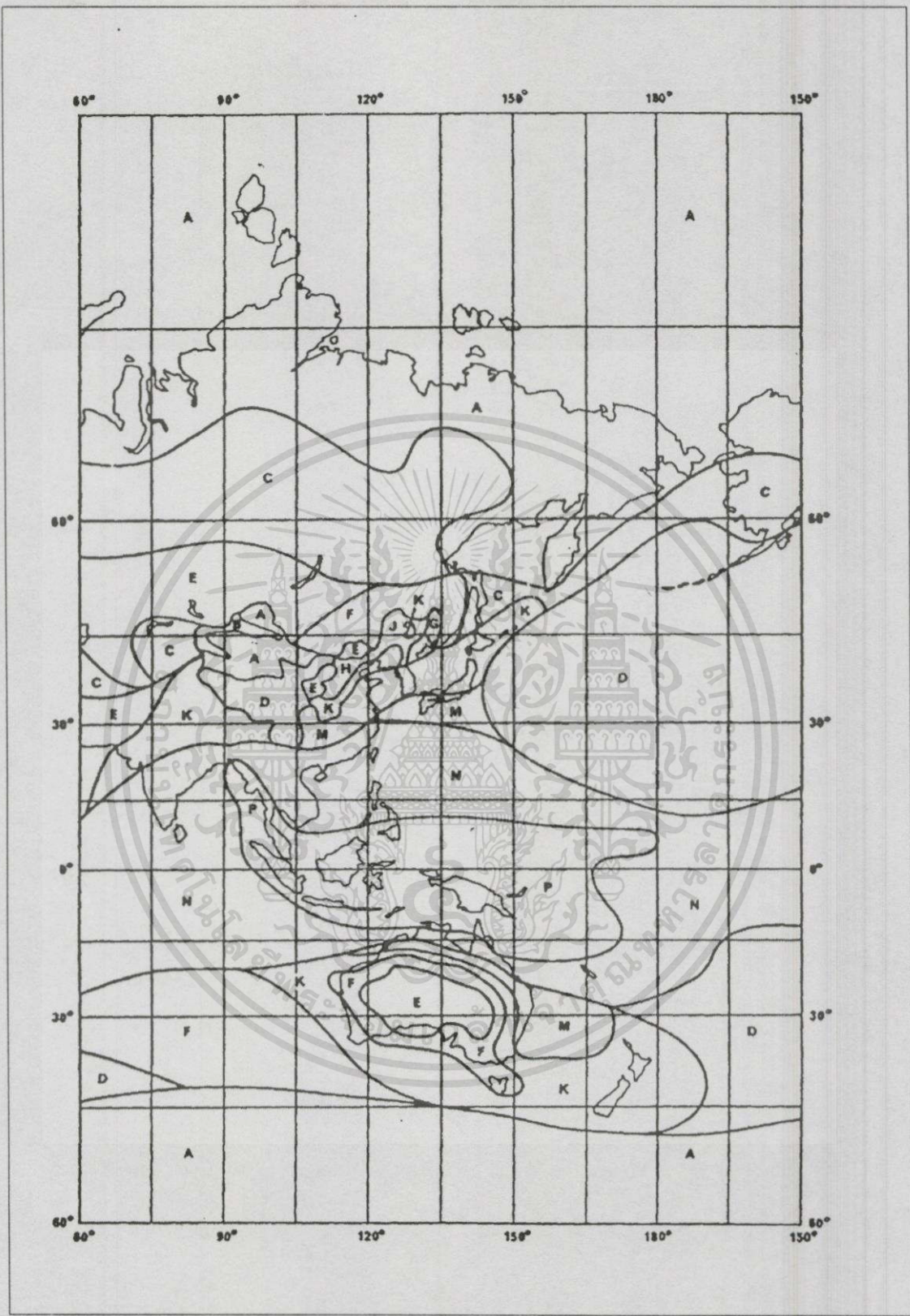
โลกออกเป็น 15 โชนตามรายละเอียดในรูปที่ 2.10 แต่ละโชนจะบอกเปอร์เซ็นต์อัตราการตกสะสมของฝนตามรายละเอียดในตารางที่ 2.2 สำหรับภาคกลางของประเทศไทยจะอยู่คาบเกี่ยวระหว่างโชน P และ โชน N [7]

เมื่อทราบถึงค่าการลดทอนเฉพาะ (Specific Attenuation: γ) ที่เกิดในแนวคลื่นโพลาไรซ์เซชันแบบต่างๆที่เปอร์เซ็นต์สะสมอัตราการตกต่างๆของแต่ละโชนแล้ว ดังนั้นในการจะหาค่าการลดทอนในแนว Slant Path ที่มุมเงยต่างๆ สามารถหาได้ตามผลการคำนวณของ Recommendation ITU-R P.618-5 [8] (แต่อาจจะมีความคลาดเคลื่อนขึ้นได้โดยเฉพาะการลดทอนที่เกิดจากฝนที่เกิดในบริเวณเส้นศูนย์สูตร)



ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณในแนวนอนและแนวตั้ง [6]

Frequency	k_H	k_V	α_H	α_V
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.88
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.00065	0.000591	1.21	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
7	0.00301	0.00265	1.332	1.312
8	0.00454	0.00395	1.327	1.31
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.2
15	0.0367	0.0355	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
25	0.124	0.113	1.061	1.03
30	0.187	0.167	1.021	1.00
35	0.263	0.233	0.979	0.963
40	0.35	0.31	0.939	0.929
45	0.442	0.393	0.903	0.897
50	0.536	0.479	0.873	0.868
60	0.707	0.642	0.826	0.824
70	0.851	0.784	0.793	0.793
80	0.975	0.906	0.769	0.769
90	1.06	0.999	0.753	0.754
100	1.12	1.06	0.743	0.744
120	1.18	1.13	0.731	0.732
0.15	1.31	1.27	0.71	0.711
200	1.45	1.42	0.689	0.69
300	1.36	1.35	0.688	0.689
400	1.32	1.31	0.683	0.684



รูปที่ 2.10 การแบ่งโซนการแจกแจงสะสมอัตราการตกของฝน [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าอัตราการตกในแต่โซนที่เปอร์เซ็นต์สะสมการตกต่าง ๆ [7]

% time	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1	<0.1	0.5	0.7	2.1	0.6	1.7	3	2	8	1.5	2	4	5	12	24
0.3	0.8	2	2.8	4.5	2.4	4.5	7	4	13	4.2	7	11	15	34	49
0.1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0.03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0.003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	132
0.001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	180



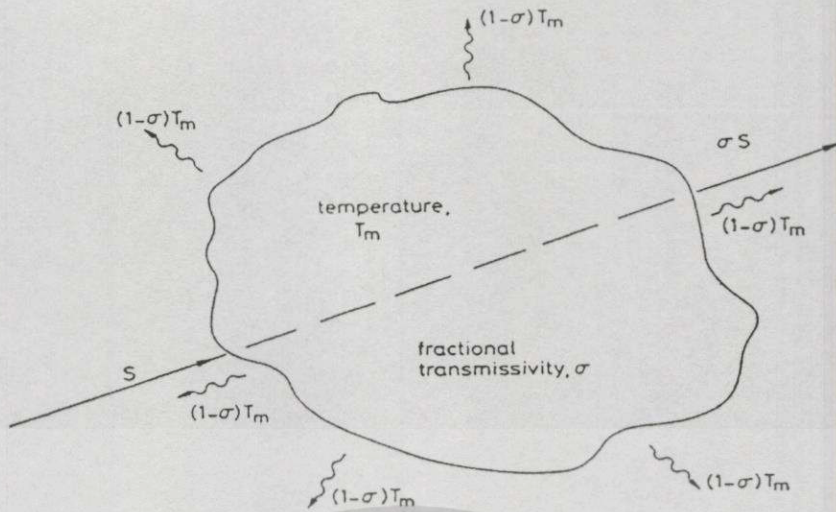
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาการลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากฝนด้วยเครื่องรับ Radiometer

ในแบบจำลองต่าง ๆ ที่เคยมีการศึกษาไว้เพื่อการคำนวณหาค่าการลดทอนนั้นมียุหลายแบบจำลองและแบบจำลองหนึ่งที่ได้รับค่านิยมคือแบบจำลองของ ITU-R Model แต่แบบจำลองดังกล่าวยังให้ค่าความแม่นยำไม่มากพอเมื่อนำมาใช้ในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น (Tropical) อย่างประเทศไทย [9] และจากเอกสารการศึกษาวิจัยหลาย ๆ ฉบับพบว่าการศึกษาจากข้อมูลในเชิงสถิติที่เกิดขึ้นจริงในภูมิภาคนั้นๆจะทำให้ได้ค่าความแม่นยำสูงกว่าการศึกษาในลักษณะของแบบจำลอง ดังนั้นในการศึกษาจึงต้องมีอุปกรณ์ที่จะนำมาทำการจัดเก็บข้อมูลค่าการลดทอนและข้อมูลฝน วิธีการที่ได้รับความนิยมโดยทั่วไปมีอยู่สองแบบ แบบแรกคือการวัดโดยตรง โดยการวัดจากสัญญาณดาวเทียมนำร่อง (Satellite Beacon) ในความถี่และระดับสัญญาณที่คงที่ค่าหนึ่งตลอดเวลาเมื่อมีฝนตกในแนวทางการเดินทางของสัญญาณเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมนำร่องก็จะทราบถึงระดับความแรงของสัญญาณที่ถูกลดทอนลงไปหรืออาจจะใช้อุปกรณ์เรดาร์ซึ่งจะทำให้ได้โดยการวัดระดับสัญญาณที่มีการส่งไปและสะท้อนกลับมาแล้วควมมีระดับสัญญาณหายไปก็เดซิเบลเป็นต้น สำหรับแบบที่สองเป็นการวัดโดยทางอ้อมด้วยการใช้อุปกรณ์ Radiometer ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

3.1 ทฤษฎีอุณหภูมิสัญญาณรบกวน (Sky Noise Temperature) [5]

การวัดโดยทางอ้อมโดยใช้อุปกรณ์ Radiometer นั้นจะเป็นการวัดสัญญาณรบกวนที่อยู่ในรูปของพลังงานความร้อน (Power Noise Temperature) อาศัยหลักการที่ว่าเมื่อมีการส่งพลังงานผ่านตัวกลางๆ จะมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไปเพื่อเป็นการรักษาสถานะให้สมดุลย์ของตัวกลางนั้นซึ่งมันจะต้องมีการแผ่รังสีที่อยู่ในรูปของพลังงานความร้อนออกมาเท่ากับพลังที่มันได้ดูดกลืนเข้าไป ซึ่งพลังงานความร้อนที่แผ่ออกมานี้จะแผ่ออกมาในทุกทิศทางของตัวกลางนั้น ตามรูปที่ 3.1 เมื่อตัวกลาง M ได้ดูดกลืนพลังงานเข้าไปจะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับอุณหภูมิ T_m และตัวกลางนี้จะมีค่าประสิทธิภาพในการดูดกลืนและคายพลังงานความร้อนออกมาเท่ากับค่า Fractional Transmissivity (σ) ซึ่งค่านี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และค่าดังกล่าวนี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงค่าพลังงานที่ตัวกลางนั้นได้ดูดกลืนเข้าไป เช่นค่า σ มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงว่าตัวกลางไม่มีการดูดกลืน พลังงานที่ส่งเข้าไปในตัวกลางสามารถทะลุผ่านตัวกลางไปได้หมด แต่ถ้า σ เท่ากับ 0 หมายความว่าตัวกลางมีการดูดกลืนพลังงานไว้ทั้งหมดพลังงานที่ส่งไปจึงไม่สามารถทะลุผ่านไป



รูปที่ 3.1 แสดงค่าอุณหภูมิที่แผ่ร่อออกมาเนื่องจากค่า Fractional Transmissivity (σ) ที่เกิดในตัวกลาง M

จากรูปที่ 3.1 เพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจนจึงสมมุติให้กำลังงานที่อยู่ในรูปของสัญญาณ S ถูกส่งเข้าไปในตัวกลาง M และตัวกลางมีการดูดกลืนกำลังงานไว้จำนวนหนึ่งที่เหลือจะทะลุผ่านตัวกลางออกมามีค่าเท่ากับ σS ดังนั้นในส่วนที่มีการดูดกลืนจะต้องมีการถ่ายเทออกมาในรูปของความร้อน (Radiate Temperature; T_r) มีค่าเท่ากับ $(1-\sigma)T_m$ เพื่อตัวกลางนั้นจะได้อยู่ในสภาวะที่สมดุล (จากที่กล่าวมานี้คือวิธีการหนึ่งในการศึกษาด้วยอุปกรณ์แบบ Passive Radiometer ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี่) ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่าการลดทอนได้ดังนี้ [5], [10]

$$T_r = (1-\sigma)T_m \quad (3.1)$$

เมื่อ $\sigma = e^{-A/4.34}$ จะได้

$$T_r = (1 - e^{-A/4.34})T_m \quad (3.2)$$

เมื่อ A เป็นค่าการลดทอนของสัญญาณ (dB) ซึ่งสัมพันธ์กับค่า σ ดังสมการที่ (3.3)

$$A = 10 \log(1/\sigma) \quad (3.3)$$

ในสมการที่ (3.2) เมื่อย้ายสมการ จะได้สมการค่าการลดทอนที่อยู่ในเชิงอุดมคติโดยไม่ได้คำนึงถึงค่าผลกระทบอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นจะได้

$$A = 10 \log \left(\frac{T_m}{T_m - T_r} \right) \quad (3.4)$$

เมื่อ T_m คือค่าอุณหภูมิของตัวกลางที่เกิดจากการดูดกลืนกำลังงาน (Physical Medium Temperature) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิของโลก (Ground Temperature; T_g) เป็นองค์ประกอบหลัก

3.2 เครื่องรับ Radiometer

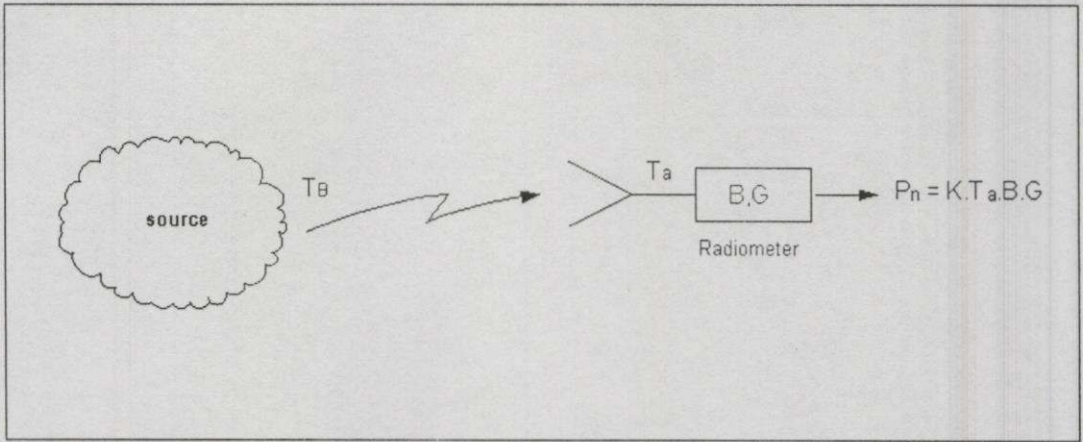
อุปกรณ์ Radiometer เป็นเครื่องรับชนิดหนึ่งที่ต้องอาศัยตัวกลางเป็นตัวแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ เช่น จากดวงอาทิตย์ จากดวงจันทร์ และอื่นๆ ในย่านความถี่ใดความถี่หนึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการนำไปประยุกต์ใช้งาน ในที่นี้จะเน้นศึกษาเฉพาะการลดทอนที่เกิดจากฝนในย่าน Ku-band ดังนั้นอุปกรณ์ Radiometer ที่ใช้ก็ต้องอยู่ในย่านความถี่ Ku-band และมีแหล่งกำเนิดอุณหภูมิคือกลุ่มฝน แหล่งกำเนิดอุณหภูมิโดยทั่วไปมักจะเรียกว่าอุณหภูมิแสงสว่าง (Brightness Temperature; T_B) ตามรูปที่ 3.2 [11]

ค่ากำลังงานของสัญญาณรบกวน (P_n) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแหล่งกำเนิดอุณหภูมิสามารถหาได้จากสมการทั่วไปดังนี้

$$P_n = K T_a B G \quad (3.5)$$

โดยที่

- P_n คือ กำลังงานของสัญญาณรบกวน (Watts)
- K คือ ค่าคงที่ของ Boltz man = 1.38×10^{-23} J/K
- T_a คือ อุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่งานสายอากาศรับได้
- B คือ Bandwidth (Hz)
- G คือ อัตราการขยาย (Gain)



รูปที่ 3.2 พื้นฐานของการศึกษาด้วยอุปกรณ์เครื่องรับ Radiometer

สำหรับเครื่องรับ Radiometer ที่ใช้ในงานด้านโทรคมนาคมเพื่อหาค่าการลดทอนในแนวของ Slant Path นั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่เป็น Active Radiometer และ Passive Radiometer ดังนี้

3.2.1 เครื่องรับแบบ Active Radiometer [5]

การวัดโดยใช้วิธีของ Active Radiometer จะเป็นการวัดค่าอุณหภูมิแสงสว่างที่อาศัยแหล่งกำเนิดอุณหภูมิจากดวงอาทิตย์ โดยอุปกรณ์ Radiometer จะถูกออกแบบให้สามารถเคลื่อนที่ได้ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ดังนั้นจึงเรียกชื่อได้อีกอย่างว่าเครื่องรับแบบ Sun Tracking Radiometer ค่าอุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่งานสายอากาศสามารถรับได้ (T_a) หาได้ดังสมการ

$$T_a = T_s \times e^{-A/4.34} \quad (3.6)$$

T_s คือ อุณหภูมิแสงสว่าง (Brightness Temperature) จากดวงอาทิตย์ (K)

A คือ ค่าการลดทอนตลอดเส้นทาง (dB)

อุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่งานสายอากาศรับได้จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของการลดทอนในเส้นทางนั้น ๆ ตามสมการที่ (3.6) หากในเส้นทางการเดินทางของสัญญาณมีการลดทอนเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิที่งานสายอากาศรับได้ก็จะเปลี่ยนตามไปด้วยเช่นกัน และตามที่แสดงในรูปที่ 3.3 อุปกรณ์ Radiometer นอกจากจะรับค่าอุณหภูมิแสงสว่างจากดวงอาทิตย์แล้วยังมีการรับอุณหภูมิที่เกิดตามการหลักการของ Kirchhoff's Law ด้วยกล่าวคือเมื่อตัวกลาง (กลุ่มฝน) เข้าไปอยู่ในเส้นทางของแหล่งกำเนิดที่เป็นอุณหภูมิแสงสว่าง (ดวงอาทิตย์) ตัวกลางนั้นย่อมจะมีการดูดกลืนแล้วส่วนหนึ่งก็จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพลังงานความร้อนและแพร่กระจายออกมารอบๆ (Isotropic) ตัวกลางนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่แพร่กระจายออกมารอบๆตัวกลางนั้นถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิอีกชนิดหนึ่งเหมือนกัน สำหรับในทางด้านโทรคมนาคมเรียกอุณหภูมินี้ว่าอุณหภูมิสัญญาณรบกวน (Sky Noise Temperature) ดังนั้นอุณหภูมิที่งานสายอากาศรับได้ทั้งหมดจึงเท่ากับ

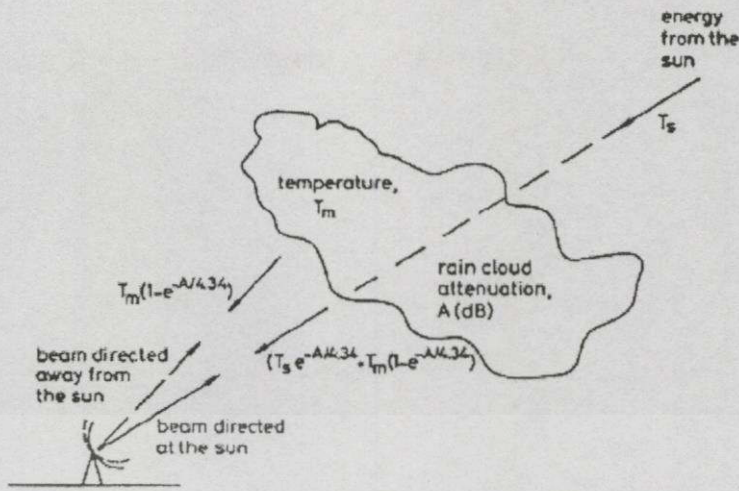
$$T_a = T_s \times e^{-A/4.34} + T_m(1 - e^{-A/4.34}) \quad (3.7)$$

จะเห็นว่าในเทอมที่สองของสมการ (3.7) ค่าอุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่แพร่ออกมาจากกลุ่มฝนจะมีค่าเท่ากับสมการที่ (3.2) นั่นเอง เนื่องจากขณะนี้เป็นการศึกษาการลดทอนของสัญญาณโดยอาศัยแหล่งกำเนิดของสัญญาณจากดวงอาทิตย์จึงจำเป็นต้องตัดแหล่งสัญญาณที่เกิดจากกลุ่มฝนทิ้งไป ดังนั้นในสมการที่ (3.7) เทอมที่สองจะต้องถูกกำจัดทิ้งซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. ใช้ Feed Horn สองตัวอยู่ในงานสายอากาศใบเดียวกัน Feed Hone ตัวแรกจะรับสัญญาณในทิศทางจากแหล่งกำเนิดที่มาจากดวงอาทิตย์และ Feed Horn ตัวที่ 2 จะรับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดอื่นเมื่อนำมาทำการคำนวณเปรียบเทียบกันก็จะทำให้สามารถทราบถึงค่าการลดทอนที่มาจากแหล่งกำเนิดของดวงอาทิตย์ได้

2. ใช้ Feed Horn ตัวเดียวแต่บังคับให้งานรับสัญญาณในทิศทางของดวงอาทิตย์ครั้งหนึ่งและรับสัญญาณในทิศทางอื่นอีกครั้งหนึ่งดังรูปที่ 3.3 ค่าความแตกต่างที่ได้ก็จะทำให้ทราบถึงค่าเทอมที่สองของสมการที่ (3.7) ได้

ตามวิธีการวัดแบบ Active Radiometer จะมีความยุ่งยากในการติดตามการเคลื่อนที่เนื่องจากดวงอาทิตย์ไม่ได้อยู่กับที่ที่มีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาจึงไม่สะดวกในการปรับทิศทางของอุปกรณ์งานรับสัญญาณให้อยู่ในแนวเดียวกับดวงอาทิตย์ อีกทั้งในเวลากลางคืนก็ไม่สามารถวัดค่าการลดทอนจากแหล่งกำเนิดสัญญาณดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการวัดที่เรียกว่าแบบ Passive Radiometer แทน



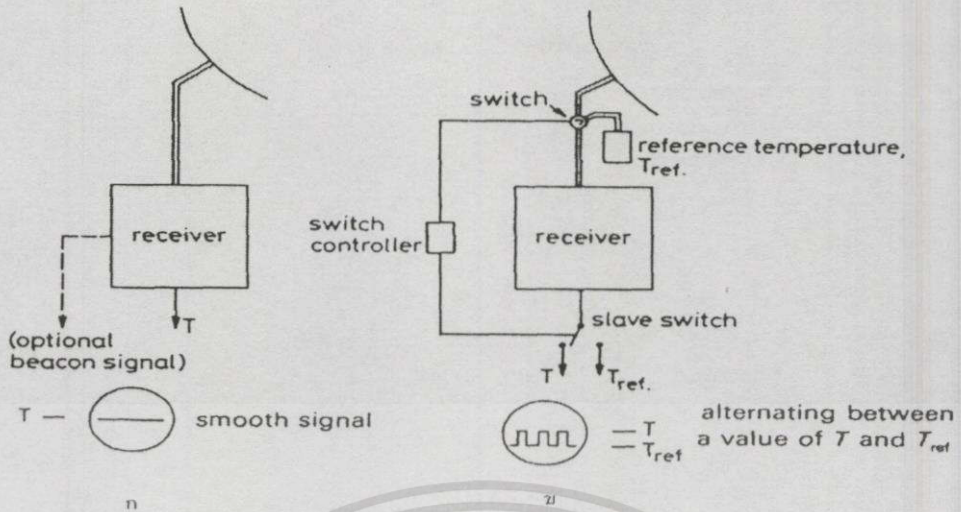
รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องรับแบบ Active Radiometer เมื่อเครื่องรับอยู่ในทิศทางเดียวกับดวงอาทิตย์ อุณหภูมิที่รับได้เท่ากับ $T_s \times e^{-A/4.34} + T_m (1 - e^{-A/4.34})$ และเมื่อเครื่องรับอยู่นอกทิศทางของดวงอาทิตย์จะมีค่าเท่ากับ $T_m (1 - e^{-A/4.34})$

3.2.2 เครื่องรับแบบ Passive Radiometer [5]

การวัดด้วยหลักการของเครื่องรับแบบ Passive Radiometer จะเป็นกรวัดสัญญาณที่แพร่ออกมาจากตัวกลางในรูปของอุณหภูมิสัญญาณรบกวน ตามที่ได้กล่าวมาแต่ในตอนต้นในข้อ 3.1 เรื่องทฤษฎีอุณหภูมิสัญญาณรบกวนซึ่งเครื่องรับแบบ Passive Radiometer สามารถจะแบ่งย่อยออกไปได้อีกคือ แบบ DC และแบบ Switch และต่อมาในภายหลังได้มีการเปลี่ยนชื่อเรียกใหม่ว่า Total Power และ Dicke Radiometer ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.4 [5]

ในเครื่องรับแบบ Total Power (รูปที่ 3.4ก) สัญญาณที่รับได้อาจจะมีความผิดพลาดขึ้นได้เมื่อเครื่องรับไปรับเอาสัญญาณแปลกปลอมอย่างอื่นเข้ามาด้วยเช่นสัญญาณรบกวน (Interference) จากดาวเทียมหรือจากดวงอาทิตย์ เนื่องจากเครื่องรับแบบ Total Power ไม่มีภาครับสัญญาณอ้างอิง (Reference Temperature) จึงไม่สามารถแยกแยะได้ว่าสัญญาณที่รับเข้ามานั้นคือสัญญาณที่ต้องการหรือไม่

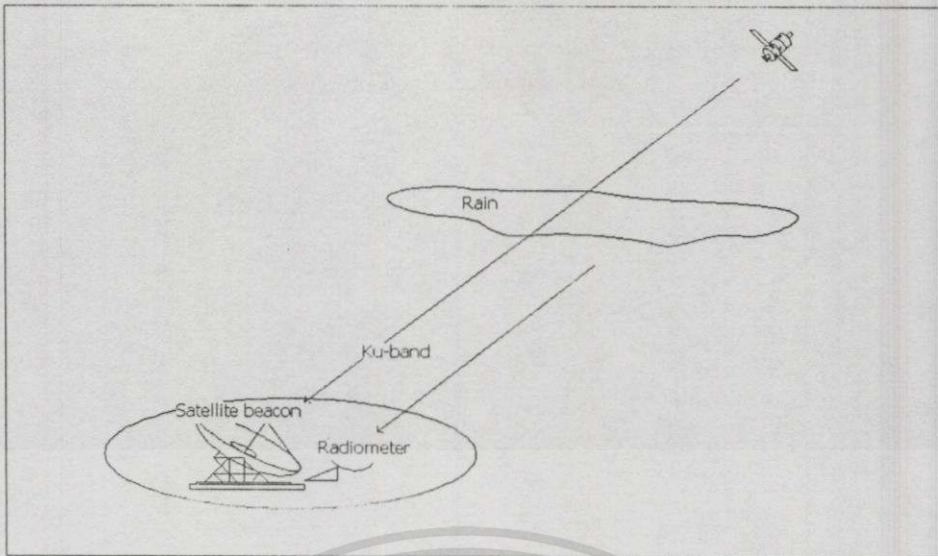
ในเครื่องรับแบบ Dicke Radiometer (รูปที่ 3.4ข) เครื่องรับจะนำสัญญาณที่รับได้มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงด้วยความเร็วประมาณ 1 kHz ซึ่งจะทำได้สามารถลดการผิดพลาดจากการไปรับเอาสัญญาณแปลกปลอมอื่นๆ เข้ามาได้ และในการทดลองวิจัยนี้จะใช้อุปกรณ์ในแบบ Dicke Radiometer เป็นอุปกรณ์สำหรับการทดลองวิจัยในครั้งนี้



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องรับแบบ Passive Radiometer

เนื่องจากการศึกษาผลการลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากฝน ดังนั้นเป้าหมายของรายละเอียดในที่นี้จึงต้องมุ่งเน้นไปที่กลุ่มฝนและเนื่องจากการศึกษาด้วยอุปกรณ์ Radiometer นั้นเป็นการศึกษาในแบบทางอ้อม โดยการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิที่กลุ่มฝนได้แพร่ออกมาให้อยู่ในรูปของค่าการลดทอน (Attenuation) ด้วยการใช้อุปกรณ์ทางคณิตศาสตร์เข้าช่วย และในการที่จะทราบถึงค่าอุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้นนั้นเราจะต้องทราบว่าค่าอุณหภูมิที่กลุ่มฝนได้ดูดกลืนเข้าไป (T_m) นั้นมีค่ามากน้อยเพียงใดซึ่งค่าอุณหภูมิที่ตัวกลาง (กลุ่มฝน) ได้ดูดกลืนเข้าไปนั้นจะมีเข้ามาได้หลายทิศทางเช่น จากอุณหภูมิของพื้นโลก จากท้องฟ้าที่รวมถึงกลุ่มดาวและก๊าซต่างๆ แต่โดยหลักใหญ่แล้วจะขึ้นอยู่กับความร้อนของพื้นผิวโลกเป็นสำคัญ ตามที่ได้เคยกล่าวไปแล้วในเรื่องของการเกิดฝนว่าเมื่ออากาศร้อนที่ผิวโลกเมื่อลอยตัวขึ้นไปกระทบกับอากาศที่เย็นกว่าบนท้องฟ้า แล้วจะมีผลให้เกิดเป็นกลุ่มฝนและตกลงมาเป็นเม็ดฝนในที่สุดนั้น ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิของกลุ่มฝนจึงขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิของพื้นโลกเป็นสำคัญตามที่กล่าว ซึ่งวิธีการหนึ่งที่จะสามารถหาค่าอุณหภูมิที่ตัวกลางได้ดูดกลืนเข้าไปได้โดยการนำเครื่องรับ Radiometer ไปทำการวัดสอบเทียบกับเครื่องรับดาวเทียมนำร่องที่อยู่ในย่านความถี่เดียวกันและต้องทำการวัดเปรียบเทียบในเวลาเดียวกันด้วย โดยการวางเครื่องรับทั้งสองไว้ในบริเวณที่ใกล้เคียงกันตามรูปที่ 3.5 แล้วใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์คำนวณจากค่าการลดทอนที่วัดได้จากเครื่องรับดาวเทียมนำร่องให้ไปอยู่ในรูปของอุณหภูมิที่ตัวกลางมีการดูดกลืนไว้ (T_m) ซึ่งโดยประมาณแล้วฝนในเขตร้อนจะมีค่าอุณหภูมิ T_m ประมาณ 280 K และสามารถเขียนเป็นค่าสมการได้ดังนี้

$$T_m = 1.12T_g - 50 K \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.5 แสดงการสอบเทียบระหว่างเครื่องวัด Radiometer และเครื่องรับดาวเทียมนำร่อง

ค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นตลอดแนวของ Slant Path สำหรับอุปกรณ์ Radiometer ตามที่ได้กล่าวมาแต่ต้นในเรื่องของอุณหภูมิสัญญาณรบกวน ตามสมการที่ (3.4) นั้นเป็นเพียงค่าในอุดมคติเท่านั้น ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากจานรับสัญญาณ (Antenna Effect) และสัญญาณแปลกปลอมอื่นๆที่เข้ามาทางจานสายอากาศ เช่นสัญญาณรบกวนจากพื้นดินและจากกลุ่มดาวต่าง ๆ ส่วนอุณหภูมิสัญญาณรบกวนในโอกาสของดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ หรือจากสัญญาณรบกวนจากคลื่นไมโครเวฟในย่านความถี่เดียวกันที่จะเข้ามานั้นสิ่งเหล่านี้สามารถจะสังเกตและแก้ไขได้

ผลกระทบที่เกิดจากจานรับสัญญาณนั้น เนื่องจากในทิศทางของจานรับสัญญาณประกอบด้วย Main Lobe และ Side Lobe จึงทำให้สายอากาศรับสัญญาณรบกวนเข้ามาได้ในทุกทิศทาง ในส่วนของ Main Lobe นอกจากการรับสัญญาณรบกวนที่แพร่ออกจากกลุ่มฝน (T_r) แล้วส่วนหนึ่งจะไปรับสัญญาณรบกวนจากกลุ่มดาวต่างๆ (Sky Temperature; T_{sp}) เข้ามาด้วย สำหรับในส่วนที่เป็น Side Lobe นั้นมีโอกาสที่จานสายอากาศจะไปรับค่าอุณหภูมิรบกวนจากพื้นดิน (Earth Temperature; T_g) เข้ามาด้วย

เมื่อกำหนดให้ในอัตราส่วนของ Main Lobe ของจานอากาศมีค่าเฟคเตอร์เท่ากับ X ดังนั้นสัดส่วนในทิศทางของ Side Lobe จึงเท่ากับ $1-X$ (เฟคเตอร์ X มีค่าประมาณ 0.9) ดังนั้น อุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่จานสายอากาศรับได้ (Antenna Temperature; T_a)

$$T_a = XT_r + XT_{sp} + (1-X)T_g \quad (3.9)$$

ในขณะที่ท้องฟ้าปลอดโปร่งไม่มีฝนตก (Temperature Clear Sky; T_{cs}) ค่าอุณหภูมิ สัญญาณรบกวนที่มาจากกลุ่มดาวต่างๆ รวมกับค่าอุณหภูมิที่มาจากพื้นดินรวมแล้วประมาณ 30 องศาเคลวินซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$T_{cs} = XT_{sp} + (1 - X)T_g \quad (3.10)$$

เมื่ออุณหภูมิที่แพร่กระจายออกมาจากกลุ่มฝนตามสมการที่ (3.1): $T_r = (1 - \sigma)T_m$ จะได้

$$T_a = X(1 - \sigma)T_m + T_{cs} \quad (3.11)$$

จากค่าการลดทอนในอุดมคติในสมการที่ (3.4) เมื่อนำผลกระทบของงานรับสัญญาณเข้ามา รวมด้วยจะได้สมการใหม่ที่ใช้ในการหาค่าการลดทอนและใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในบทความนี้ดังนี้ [10], [12]

$$A = 10 \log \left(\frac{T_m - T_{cs}}{T_m - T_a} \right) \text{ dB} \quad (3.12)$$

หากงานสายอากาศสามารถรับอุณหภูมิรบกวนที่แพร่ออกมาจากตัวกลาง (กลุ่มฝน) เข้าอยู่ในทิศทางของงานสายอากาศได้หมดทั้ง Main Lobe และ Side Lobe โดยที่ไม่มีอุณหภูมิอื่นปะปนเข้ามาด้วยแล้วจะทำให้ T_a มีค่าเท่ากับ T_r ตรงตามค่าในอุดมคติ (อุณหภูมิที่แพร่ออกมาจากกลุ่มฝนเท่ากับอุณหภูมิที่งานสายอากาศรับได้)

3.3 ความเที่ยงตรงในการวัดสัญญาณ [12]

ความแม่นยำของการวัดด้วยอุปกรณ์ Passive Radiometer จะถูกจำกัดอยู่ในช่วงประมาณ 10 dB ซึ่งค่าความแม่นยำจะลดน้อยลงตามค่าการลดทอนที่เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การวัดด้วยอุปกรณ์ Active Radiometer จะอยู่ในช่วงประมาณ 15 dB โดยค่าความแม่นยำของการศึกษาด้วยอุปกรณ์ Passive Radiometer นั้นขึ้นอยู่กับกำหนดค่าอุณหภูมิ T_m ของตัวกลาง ค่าอุณหภูมิ T_m นั้นจะขึ้นกับฤดูกาลและสภาพภูมิประเทศ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 275 ถึง 290 องศาเคลวิน (K) สำหรับในภูมิภาคเขตร้อนชื้นในแถบเส้นศูนย์สูตร T_m จะเท่ากับ 280 K โดยประมาณ ทั้งนี้ เพื่อให้เกิดความแม่นยำมากขึ้นควรจะต้องมีการสอบเทียบกับการวัดโดยดาวเทียมนำร่องก่อน

ตามรายละเอียดในตารางที่ 3.1 เมื่ออุณหภูมิ T_a เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการลดทอนเพิ่มสูงตามไปด้วยเช่นกันและเมื่อพิจารณาที่ค่าอุณหภูมิ T_m ต่างๆ จะเห็นว่าขณะที่อุณหภูมิ T_a เพิ่มขึ้นจะทำให้เห็นถึงค่าการลดทอนที่เบี่ยงเบนเพิ่มมากขึ้นด้วย จากสมการที่ (3.12) เมื่ออุณหภูมิ T_{cs} เท่ากับ 30 K และอุณหภูมิ T_m เท่ากับ 275 K, 280 K, 285 K, 290 K ตามลำดับ จะทำให้ทราบถึงค่าความผิดพลาดสูงสุดของการลดทอนได้ เช่นที่การลดทอนเท่ากับ 6 dB จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 0.47 dB แต่ที่การลดทอนเท่ากับ 10 dB จะทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นเป็น 1.29 dB เป็นต้น ซึ่งจะเห็นว่าที่การลดทอนเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ความคลาดเคลื่อนสูงตามไปด้วย สำหรับในอุปกรณ์แบบ Passive Radiometer ค่าการลดทอนจะถูกจำกัดไว้ที่ไม่เกิน 10 dB ทั้งนี้เพื่อต้องการให้ได้ค่าความเที่ยงตรงมากที่สุด และในรูปที่ 3.6 เป็นตัวอย่างของข้อมูลในช่วงเวลาที่มีการตกของฝนที่ทำให้ค่าการลดทอนเกินกว่า 10 dB ข้อมูลในช่วงเวลาที่เกินกว่า 10 dB เหล่านี้จะไม่ถูกนำมาทำการพิจารณา

สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องวัดน้ำฝนนั้นก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาด้วยเช่นกันดังนี้

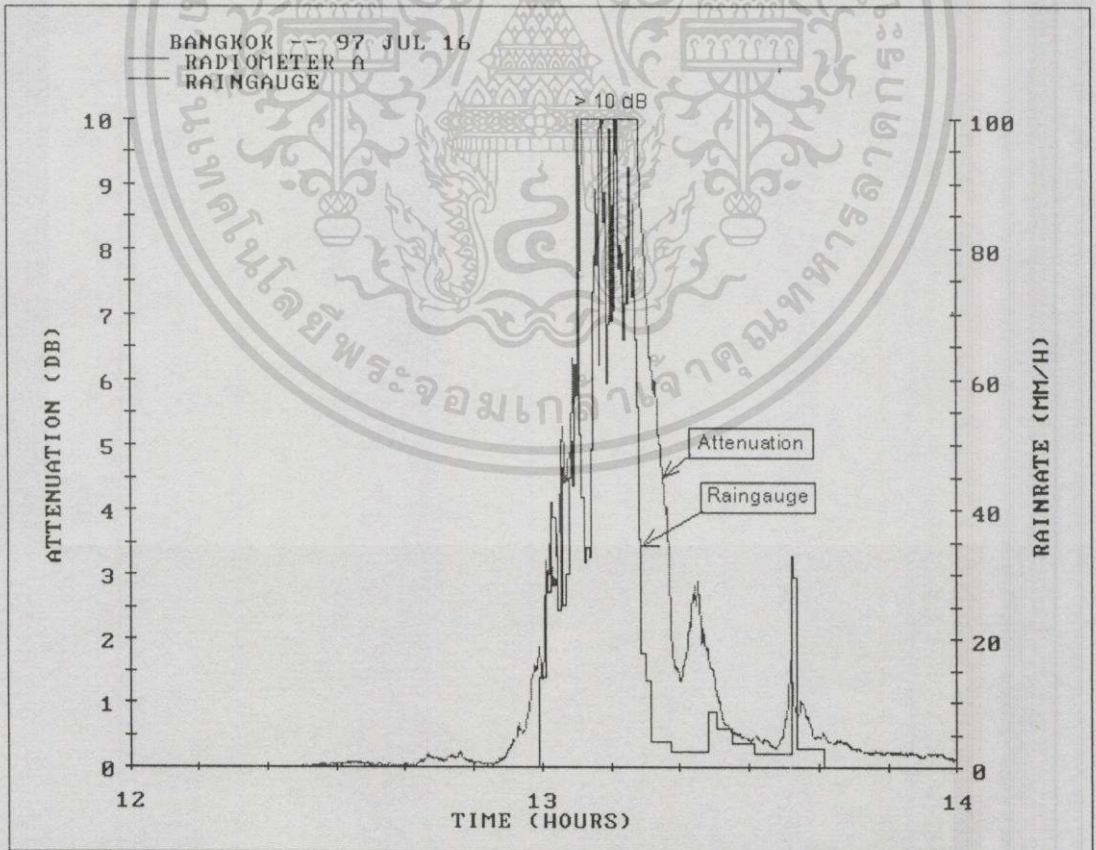
1. ความคลาดเคลื่อนจากระยะห่างของการติดตั้งเครื่องวัดน้ำฝน เนื่องจากการวัดปริมาณน้ำฝนที่เกิดขึ้นในตลอดระยะทางของ Slant Path นั้นไม่สามารถที่จะติดตั้งเครื่องวัดได้ตลอดแนวของระยะทางทั้งหมด ดังนั้นจึงมีโอกาสน้ำฝนอาจจะตกในตำแหน่งที่ไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนไว้ จึงทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่จะนำมาคำนวณหาค่าการลดทอนได้โดยเฉพาะที่มุมของ Slant Path ต่ำๆ ยิ่งจะมีค่าความคลาดเคลื่อนได้สูง

ความพยายามที่จะแก้ไขข้อผิดพลาดดังกล่าวสามารถทดแทนได้ด้วยการเก็บข้อมูลในเชิงสถิติที่มีระยะยาวนานพอสมควรจะทำให้สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นให้ลดน้อยลงได้

2. ความคลาดเคลื่อนจากกลไกการทำงาน สำหรับเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนที่เป็นแบบคานโยก (Tipping Bucket) ซึ่งมีการทำงานแบบแมคคานิกส์จะทำให้คานกระเดื่องไม่สามารถตอบสนองการตกของฝนที่อัตราการตกต่ำๆ และที่อัตราการตกสูงมากๆ ได้ดีเท่าที่ควรจึงทำให้การวัดมีความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากคานกระเดื่องไม่สามารถตอบสนองตามได้ทันแต่อย่างไรก็ตามค่าความแม่นยำจะยังอยู่ระหว่าง 5 ถึง 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงถ้าได้มีการปรับแต่งและบำรุงรักษาที่ดีพอ ปัจจุบันมีการพัฒนาอุปกรณ์เครื่องรับน้ำฝนให้มีการตอบสนองได้ไวขึ้นเช่นใช้เทคนิคของระบบออปติคอลเป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์แบบคานโยกก็ยังเป็นที่ได้รับความนิยม

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าคลาดผิดพลาดของสัญญาณที่รับได้เมื่อกำหนดค่า $T_m = 275$ K, 280 K, 285 K, 290 K ตามลำดับ

Attenuation (dB.)	Antenna Temperature (T_a)	Error (dB)			
		$T_m = 275$	$T_m = 280$	$T_m = 285$	$T_m = 290$
1	81.42	-0.02	0.00	0.02	0.04
2	122.26	-0.05	0.00	0.05	0.09
3	154.70	-0.09	0.00	0.08	0.16
4	180.47	-0.13	0.00	0.12	0.24
5	200.94	-0.19	0.00	0.18	0.34
6	217.20	-0.27	0.00	0.24	0.47
7	230.12	-0.37	0.00	0.33	0.62
8	240.38	-0.49	0.00	0.43	0.80
9	248.53	-0.66	0.00	0.55	1.02
10	255.00	-0.88	0.00	0.70	1.29



รูปที่ 3.6 แสดงค่าการลดทอนในช่วงเวลาที่มีการลดทอนเกินกว่า 10 dB

3.4 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของอุปกรณ์ Radiometer [12]

3.4.1 ส่วนประกอบ

อุปกรณ์ Radiometer ประกอบด้วยส่วนสำคัญๆ ได้แก่

1. Outdoor Unit ประกอบด้วยส่วนรับสัญญาณที่มีเสียงรบกวนต่ำ (Low Noise Amplifier; LNA) ความถี่ 12 GHz แบนวิดท์ 200 MHz งานสายอากาศแบบพาราโบลาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7

2. Indoor Unit ประกอบด้วย ส่วนประมวลผลข้อมูลและส่วนของระบบการควบคุมต่างๆ รวมทั้งแหล่งจ่ายกำลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และมีบล็อกไดอะแกรมตามรูป ที่ 3.9

3. เครื่องวัดน้ำฝนแบบکانโยคตามรูปที่ 3.10

เครื่องรับ Radiometer เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Diversitel Communications ประเทศแคนาดาซึ่งมีรายละเอียดด้านเทคนิคของอุปกรณ์ดังนี้

Radiometer

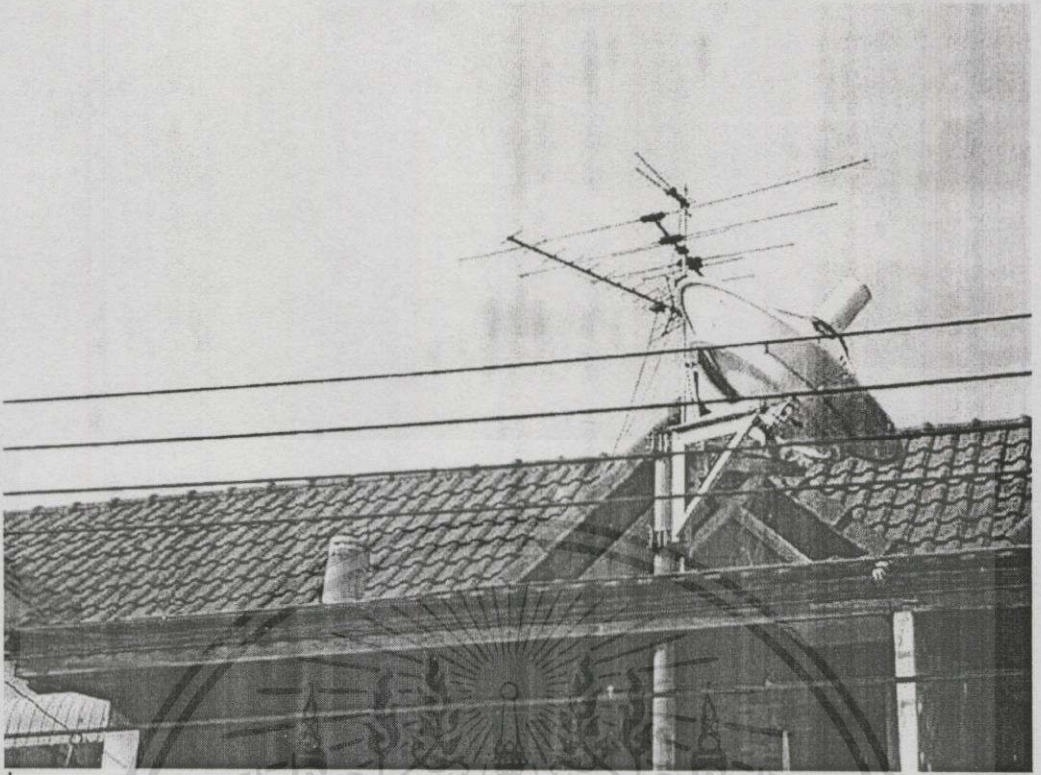
Feed	: Prime focus
Calibration	: Manual and automatic using the clear sky and reference termination as cold and hot loads respectively
Frequency	: 12.0 GHz
Serial Ports	: RS-232, 9-Pin, for connection to the modem, terminal or computer
Raingauge	: Connection for one tipping-bucket raingauge, contact closure, BNC connector
Temperature range	: Indoor unit 0 C to 40 C, non-condensing Outdoor unit -5 C to 45 C
Data storage	: RAM sufficient to Store data acquired over at least 96 hours
Cable	: Multi-conductor cable with connector, 40M. length
Power	: 220V/240V ($\pm 10\%$), 48-66 Hz,

Raingauge

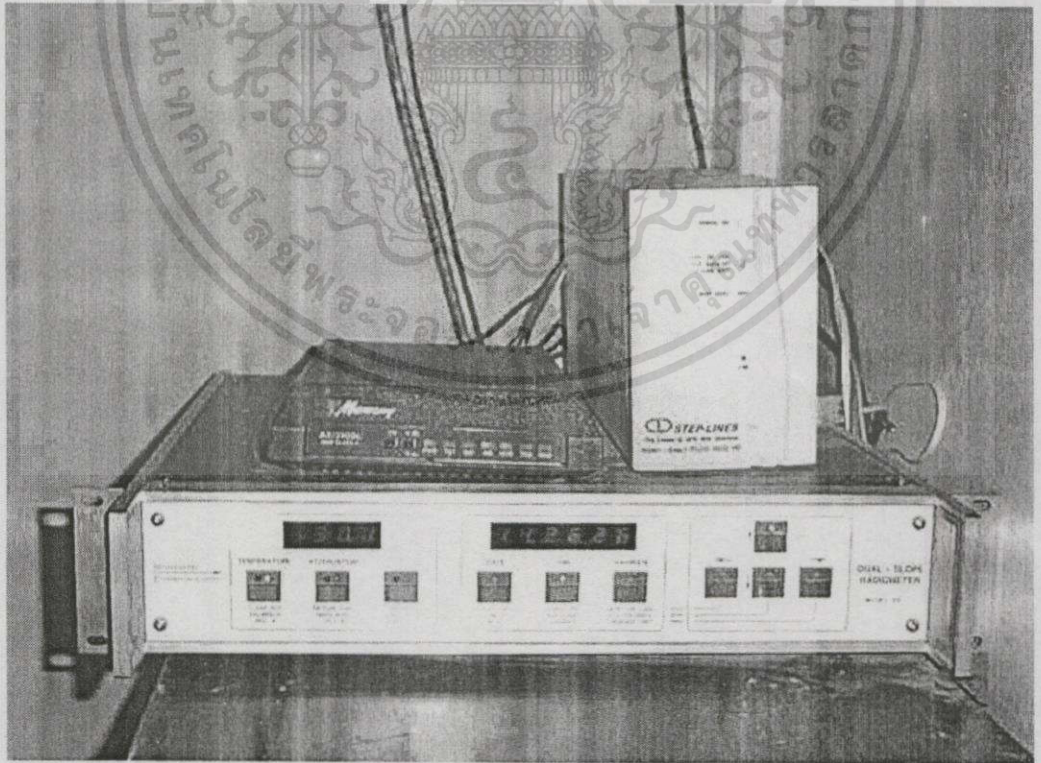
- Raingauge : Standard tipping bucket with
Contact closure, normally open
- Cable : RG-58 cable with spade lugs and BNC
male connector ,40 m length

Data Acquisition and Analysis

- Data retrieval : Asynchronous ASCII data with
Commands in verbose mode (terminal
mode) and responses in either verbose
mode or compressed mode (computer
acquisition and storage)
- Modem : Operate at 2400 baud over the
standard switched telephone network
with DTMF signaling and include data
compression and error correction with
hardware flow control
- Software : Precipitation attenuation data retrieval
and analysis software (ATTEN) by
Diversitel Communication Inc.
including screen and hard-copy plots
of rainrate and antenna temperature or
computed attenuation Data
Communications and modem control software
(TELEX) by Exis Inc.
- Data acquisition : Data retrieved automatically in
complete daily blocks at specified
time-of-day with a specified number of
days between successive data
retrievals

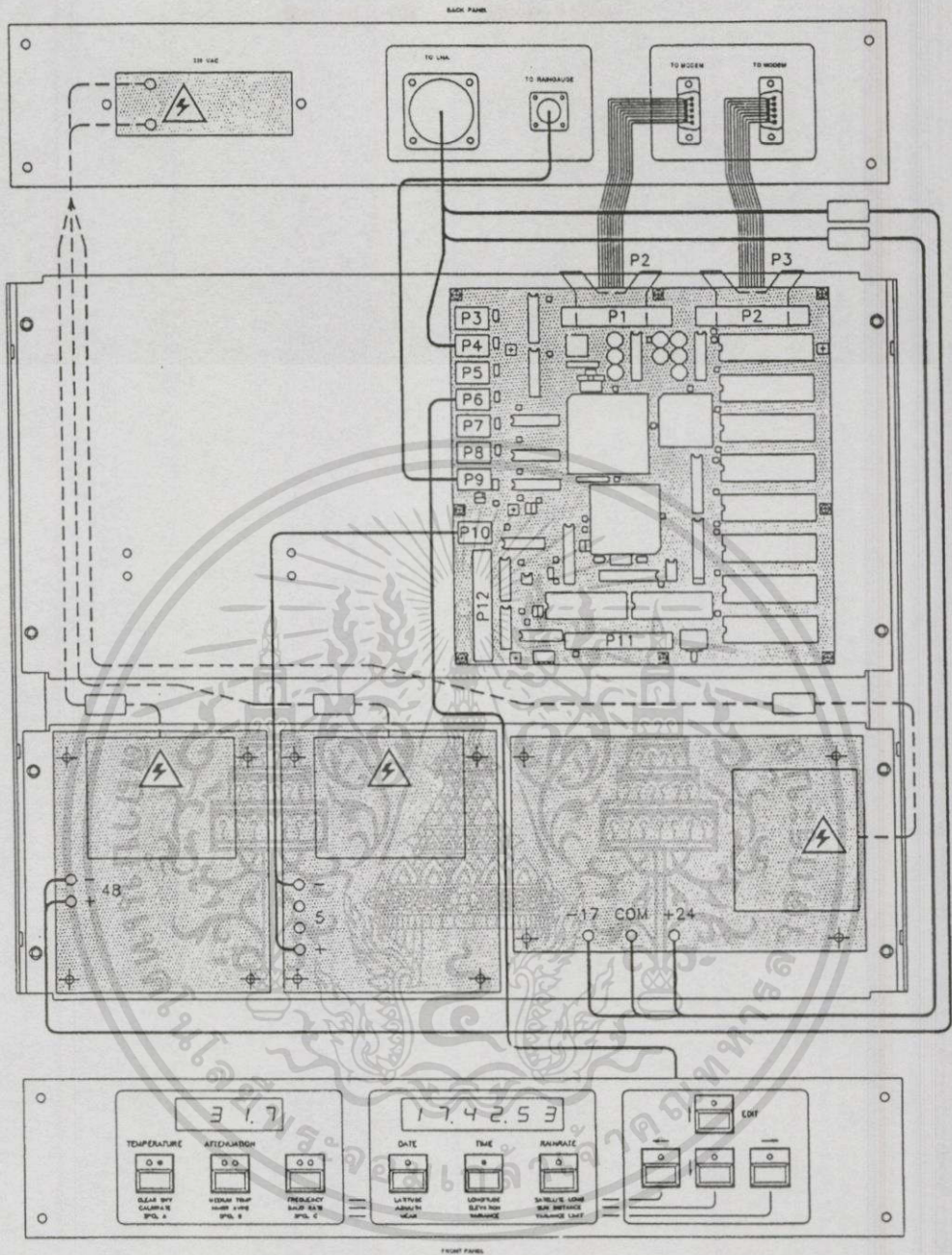


รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์ Outdoor unit



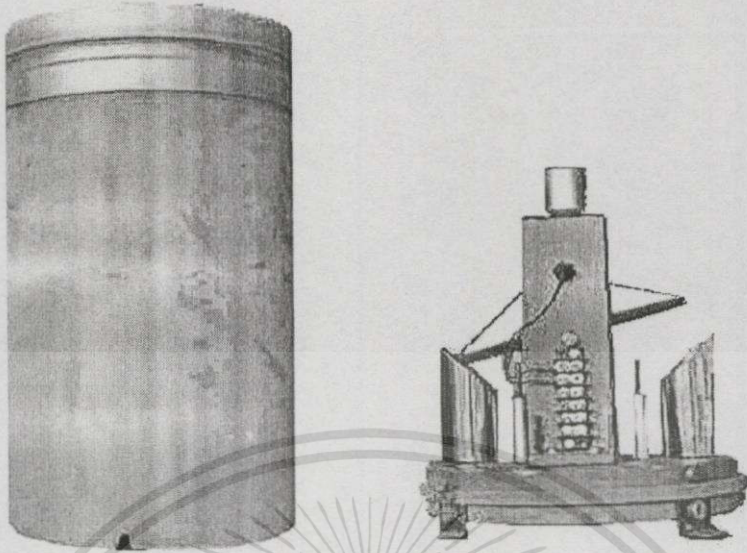
รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์ Indoor unit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีให้นำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมของอุปกรณ์ Indoor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องวัดน้ำฝนแบบคานโยก (Tipping Bucket)

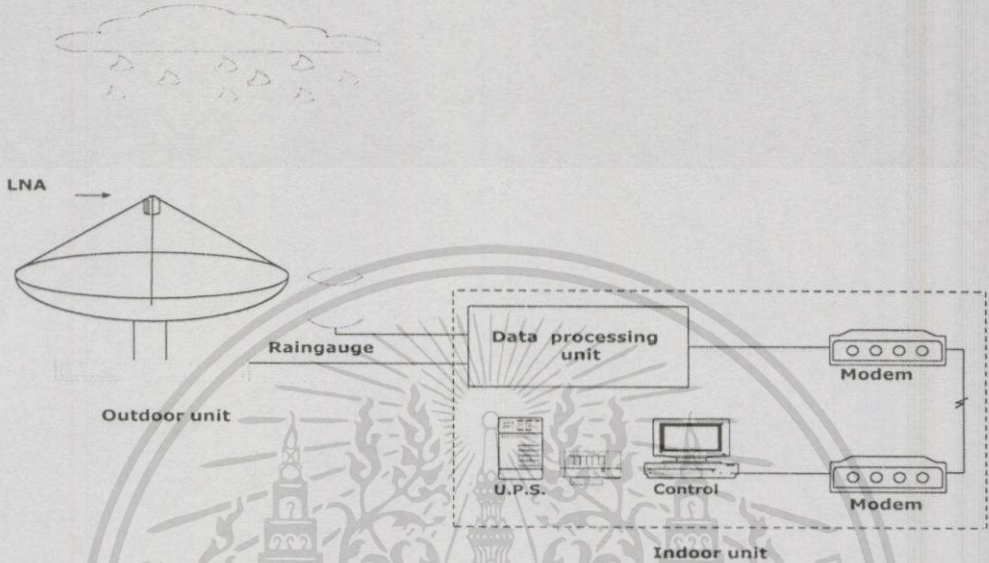
3.4.2 หลักการทำงาน [12]

ในรูปที่ 3.11 แสดงส่วนประกอบและการทำงานของอุปกรณ์ Radiometer ขณะที่งานสายอากาศรับเอาสัญญาณรบกวนจากท้องฟ้า (Sky Noise Temperature) เข้ามาเมื่อผ่านส่วนรับสัญญาณรบกวนต่ำ (LNA) สัญญาณรบกวนในช่วงความถี่ 12 GHz จะถูกกรองให้มีระดับของสัญญาณรบกวนที่มีแถบความถี่เท่ากับ 200 MHz แล้วส่งผ่านสายเคเบิลทองแดงไปยังส่วนประมวลผล (Data Processing Unit) เพื่อทำการประมวลผล ส่วนอุปกรณ์วัดน้ำฝนซึ่งเป็นแบบคานโยก เมื่อปริมาณน้ำฝนตกลงบนคานในทุกๆ ปริมาณน้ำฝน 0.2 มิลลิเมตรจะทำให้คานโยก 1 ครั้ง โดยจะมีอุปกรณ์ตรวจเช็คทางแสง (Light Emitting Diode) จะตรวจนับจำนวนครั้งการโยกของคานแล้วจะส่งสัญญาณพัลส์ (Pulse) ที่ได้ไปยังส่วนประมวลผลเพื่อคำนวณหาอัตราการตกของฝนภายในส่วนประมวลผล ข้อมูลมีหน่วยความจำที่สามารถเก็บข้อมูลได้นาน 96 ชั่วโมง (4 วัน) โดยที่ข้อมูลในชั่วโมงก่อนหน้านี้จะถูกลบทิ้งหากไม่มีการโอนย้ายข้อมูลไปเก็บในหน่วยความจำถาวร (Hard Copy) ของอุปกรณ์ส่วนควบคุม (Control Unit) โดยส่งผ่านไปทางอุปกรณ์โมเด็ม

ในระหว่างที่มีการเก็บรวบรวมข้อมูลบางครั้งอาจจะมีสัญญาณแปลกปลอมเข้ามาที่ภาครับของอุปกรณ์ Radiometer ได้เช่นสัญญาณจากดาวเทียมหรือสัญญาณรบกวนที่มาจากระบบวิทยุไมโครเวฟภาคพื้นดินในย่านที่ 12 GHz ด้วยกัน หรือจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากดวงอาทิตย์ หรืออาจเกิดจากความผิดพลาดของอุปกรณ์ Radiometer เองสิ่งต่างๆ เหล่านี้สามารถสังเกตเห็นได้ที่อุปกรณ์ส่วนควบคุมและสามารถแก้ไขข้อมูลที่ไม่พึงประสงค์นี้ได้โดยการลบข้อมูลในชั่วโมงที่มีสัญญาณแปลกปลอมหรือชั่วโมงที่เกิดความผิดพลาดทิ้งไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่ขบวนการเก็บข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล แจกแจงสะสมการตก แจกแจงสะสมการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่วงรายคาบต่างๆ และการแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ขบวนการเหล่านี้กระทำด้วยระบบควบคุมสั่งการของระบบคอมพิวเตอร์จึงทำให้ข้อมูลการทดลองที่ได้ความเที่ยงตรงสูงมาก



รูปที่ 3.11 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ Radiometer

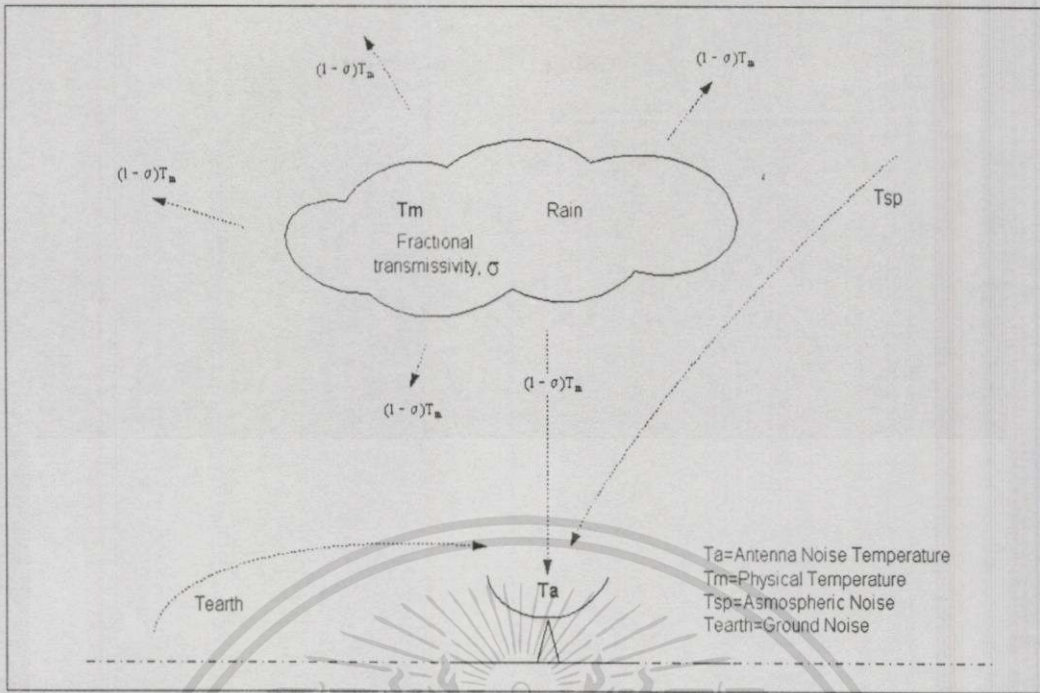
บทที่ 4

การวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 วิเคราะห์หาค่าการลดทอน

ในการศึกษาผลการลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนนั้น วิธีการที่นิยมใช้วัดเพื่อหาค่าการลดทอนในทางตรง เช่น โดยการวัดจากสัญญาณดาวเทียมนำร่องและ/หรือเรดาร์ เป็นต้น ส่วนวิธีทางอ้อมก็โดยอาศัยการวัดจากสัญญาณที่แพร่ออกจากกลุ่มฝนโดยใช้อุปกรณ์ Radiometer ทั้งโดยวิธีทางตรงและทางอ้อมตามที่กล่าวมาแล้วแต่ต้นแล้วนั้นจะมีข้อจำกัดในการวัดที่แตกต่างกันออกไป เช่น ข้อจำกัดของวิธีการวัดจากสัญญาณดาวเทียมนำร่องมักจะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้เสมอเมื่ออัตราการขยายของอุปกรณ์เปลี่ยนแปลง (Gain Variation) หรือกรณีที่ดาวเทียมเกิดเคลื่อนที่ออกนอกตำแหน่งวงโคจร ทั้งหมดนี้จะทำให้สัญญาณที่รับได้ผิดไปจากค่าความเป็นจริง หรือในบางพื้นที่ก็ไม่สามารถที่จะรับสัญญาณได้เนื่องจากพื้นที่อยู่ในบริเวณที่ไม่สามารถมองเห็นดาวเทียมได้ เป็นต้น ส่วนการวัดโดยใช้เรดาร์นั้นจะให้ค่าความแม่นยำสูง แต่ราคาของอุปกรณ์ก็ค่อนข้างจะสูงจึงไม่ค่อยจะแพร่หลายมากนัก สำหรับการวัดโดยวิธีทางอ้อมโดยใช้อุปกรณ์ Radiometer นั้นมักจะเป็นที่นิยมโดยทั่วไปเนื่องจากง่ายต่อการบำรุงรักษาและสามารถทำการวัดการลดทอนได้ทุกองศา แต่ค่าความแม่นยำจะลดน้อยลงที่การลดทอนสูงๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกำหนัดค่าอุณหภูมิของกลุ่มฝนที่คาดว่าจะเกิด (Physical Medium Temperature; T_m) หากได้กำหนดค่า T_m ที่เหมาะสมก็จะทำให้การวัดค่าการลดทอนของสัญญาณใกล้เคียงถูกต้องมากตามไปด้วย ซึ่งโดยปกติแล้วกลุ่มฝนแต่ละกลุ่มจะกำเนิดสัญญาณรบกวนที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศของแต่ละภูมิภาค ซึ่งในภูมิภาคที่อยู่ในเขตร้อนจะมีค่า T_m ที่สูงกว่าแถบภูมิภาคที่อยู่ในเขตอบอุ่น เท่าที่มีการศึกษากันมาของนักวิจัยพบว่าในภูมิภาคเขตร้อนจะมีค่า T_m อยู่ในช่วงระหว่าง 275 ถึง 290 องศาเคลวิน (K) สำหรับประเทศไทยซึ่งอยู่ในเขตร้อนจะใช้ค่า $T_m = 280$ K [1], [9]

ในรูปที่ 4.1 แสดงถึงเครื่องรับ Radiometer ที่มีการรับสัญญาณรบกวนเข้ามาทางจานสายอากาศในหลายทิศทางดังนั้นในการคำนวณจะต้องแยกแยะสัญญาณรบกวนอื่นๆ ที่ไม่ใช่สัญญาณรบกวนที่เกิดจากกลุ่มฝนออก และสมการที่ใช้ในการหาค่าการลดทอนที่ได้จากการศึกษาทดลองด้วยเครื่องรับ Radiometer สามารถหาได้ดังนี้ [12]



รูปที่ 4.1 แสดงการวัดสัญญาณอุณหภูมิรบกวนด้วยเครื่องรับ Radiometer

$$T_a = X \left\{ T_m \left(\frac{L-1}{L} \right) + \frac{T_{sp}}{L} \right\} + (1-X) T_{earth} \tag{4.1}$$

- T_a คือ อุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่ตัวกลางแพร่ออกมาและสามารถรับได้ด้วยงานสายอากาศของอุปกรณ์ Radiometer (Antenna Noise Temperature; K)
- L คือ ค่าเฟดเตอร์การสูญเสีย (Loss Factor; $L = 1/\sigma$)
- T_m คือ อุณหภูมิทางกายภาพของตัวกลาง (Physical Medium Temperature of Rain; K)
- X คือ อัตราส่วนของการรับสัญญาณจาก Main Lobe
- $1-X$ คือ อัตราส่วนของการรับสัญญาณจาก Side Lobe
- T_{earth} คือ อุณหภูมิโลก (K)
- T_{sp} คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากกลุ่มดาวบนท้องฟ้า เมฆ หมอกและก๊าซต่างๆ

ในขณะที่ไม่มีฝนตกท้องฟ้าปรอดโปร่งค่าการสูญเสีย (Loss) ที่เกิดจากฝนจึงไม่เกิด ($L=1$) อุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่รับได้ (T_a) จึงเท่ากับอุณหภูมิสัญญาณรบกวนขณะท้องฟ้าปรอดโปร่งไม่มีฝนตก (Noise temperature under clear sky ; T_{cs}) ดังนั้นเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$T_{cs} = X \left(\frac{T_{sp}}{L} \right) + (1-X) T_{earth} \tag{4.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอุปกรณ์ Radiometer ขณะรับสัญญาณรบกวนเมื่อท้องฟ้าปลอดโปร่งไม่มีฝนตกที่ ย่านความถี่ 12 GHz จะมีสัญญาณรบกวนปริมาณเล็กน้อยที่เข้ามาทางลำคลื่นด้านหน้าของจานสายอากาศ (Main Lobe) เช่น จากไอน้ำ จากกลุ่มดาวบนท้องฟ้ารวมถึงก๊าซต่างๆในอากาศเป็นต้น และนอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนจากพื้นดิน (Ground Noise) ที่เข้ามาทางลำคลื่นด้านข้างของจานสายอากาศ (Side Lobe) ซึ่งผลรวมของสัญญาณรบกวนทั้งสองนี้รวมกันแล้วประมาณ 30 องศาเคลวิน (ค่า T_{sp} ในย่าน Ku-band มีค่าน้อยมากแทบจะไม่มีผลกระทบ) เมื่อแทนสมการที่ (4.2) ลงในสมการที่ (4.1) จะได้

$$T_a = X\left\{T_m\left(\frac{L-1}{L}\right)\right\} + T_{cs} \quad (4.3)$$

ในขณะที่มีฝนตกค่าการสูญเสียจะเพิ่มขึ้น ($L \gg 1$) ทำให้ T_a เข้าใกล้ T_m มากขึ้น จัดรูปสมการใหม่เมื่อให้ $T_a = T_m$ จะได้

$$T_m = XT_m + T_{cs} \quad (4.4)$$

แทนค่า $XT_m = T_m - T_{cs}$ ในสมการที่ (4.3) จะได้

$$T_a = (T_m - T_{cs})\left(\frac{L-1}{L}\right) + T_{cs} \quad (4.5)$$

จัดสมการใหม่

$$T_a - T_{cs} = (T_m - T_{cs})\left(\frac{L-1}{L}\right) \quad (4.6)$$

จัดสมการที่ (4.6) ใหม่ให้อยู่ในรูปอัตราส่วนค่าการสูญเสีย (Loss Factor: L)

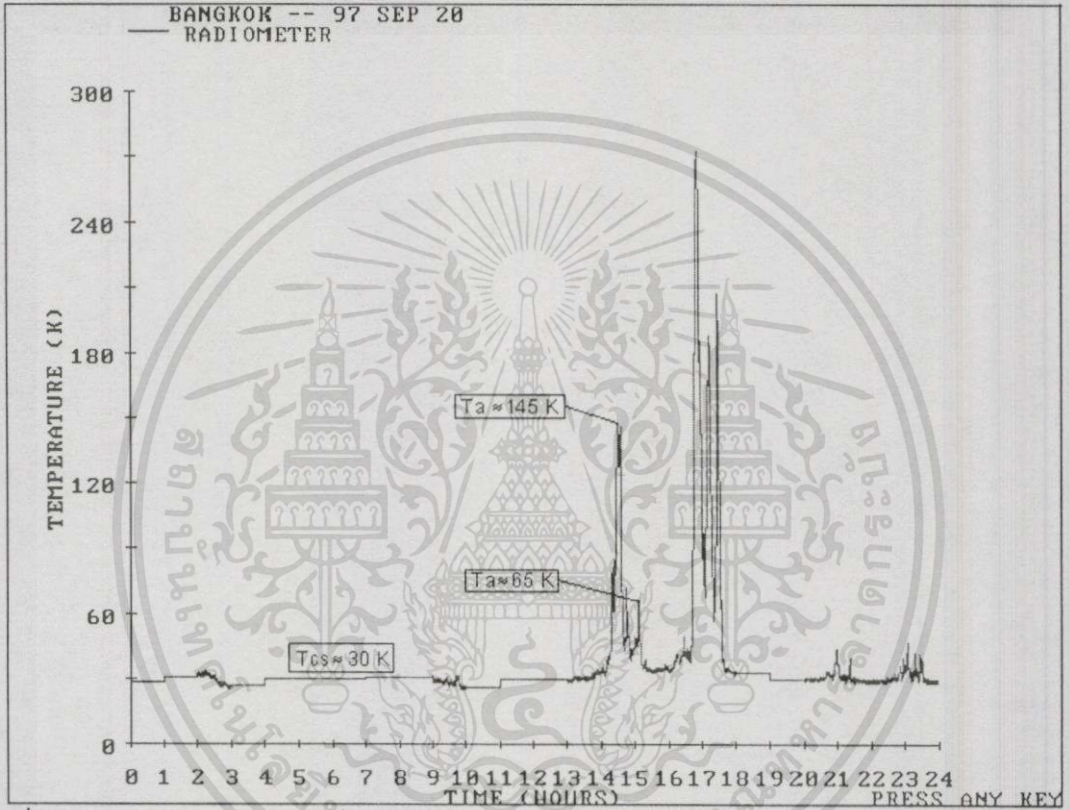
$$L = \left(\frac{T_m - T_{cs}}{T_m - T_a}\right) \quad (4.7)$$

ดังนั้นจึงสามารถกำหนดค่าการลดทอนได้ดังสมการที่ (4.8) เมื่อ A คือ ค่าการลดทอนของสัญญาณ (Attenuation; dB)

$$A = 10 \log\left(\frac{T_m - T_{cs}}{T_m - T_a}\right) \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากในรูปที่ 4.2 เป็นตัวอย่างของข้อมูลจากการวัดด้วยอุปกรณ์ Radiometer ที่แสดงถึงค่าอุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่งานสายอากาศรับได้ (T_a) เช่น ที่ประมาณเวลา 14.30 นาฬิกา วัดอุณหภูมิรบกวนได้ประมาณ 145 K หรือที่เวลาประมาณ 15 นาฬิกา วัดอุณหภูมิรบกวนได้ประมาณ 65 K เมื่อนำอุณหภูมิดังกล่าวแทนลงในสมการการลดทอนที่ (4.8) เมื่อกำหนดให้ T_{cs} เท่ากับ 30 K และ T_m เท่ากับ 280 K จะได้ค่าการลดทอนเท่ากับ 2.6 dB และ 0.6 dB ตามลำดับดังที่แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิสัญญาณรบกวนที่งานสายอากาศรับได้ (T_a)

4.2 วิเคราะห์อัตราการตกของฝน

สำหรับเครื่องวัดน้ำฝนจะเป็นแบบคานโยกจะมีค่าความแม่นยำสูงที่ความแรงของฝนในช่วงประมาณ 5 ถึง 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง สาเหตุเนื่องจากความผิดพลาดของอุปกรณ์วัดน้ำฝนซึ่งทำงานด้วยระบบกลไกแบบคานโยก แต่อย่างไรก็ตามเครื่องวัดน้ำฝนแบบนี้ยังเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

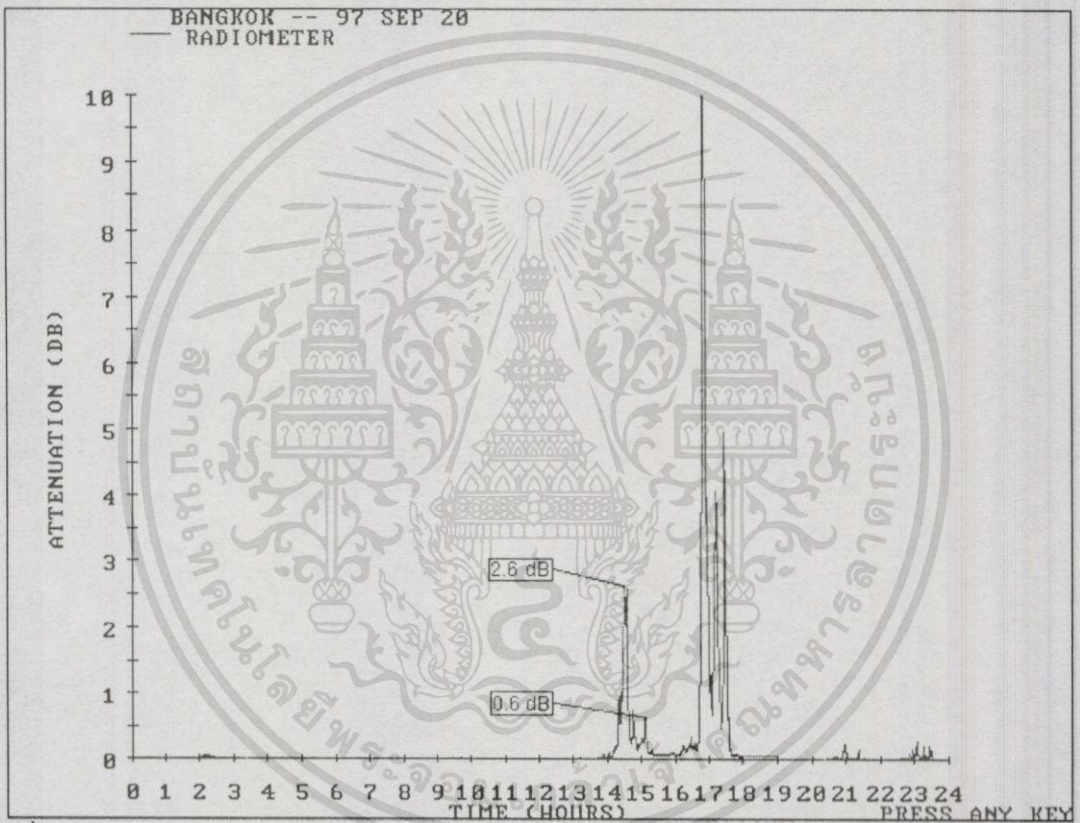
ในปริมาณน้ำฝนทุกๆ 0.2 มิลลิเมตรที่ตกลงกระบวยรับน้ำฝนจะทำให้คานโยก 1 ครั้ง จึงสามารถคำนวณหาอัตราการตกของฝน (R) ได้ ตามสมการที่ (4.9) [1], [9]

R (mm/h) = จำนวนปริมาณน้ำฝนทั้งหมดในหน่วยเวลา/ระยะเวลาการโยกของคาน

$$R = \frac{0.2 \text{ mm} \times 3600}{\Delta t} \quad \text{mm/h} \quad (4.9)$$

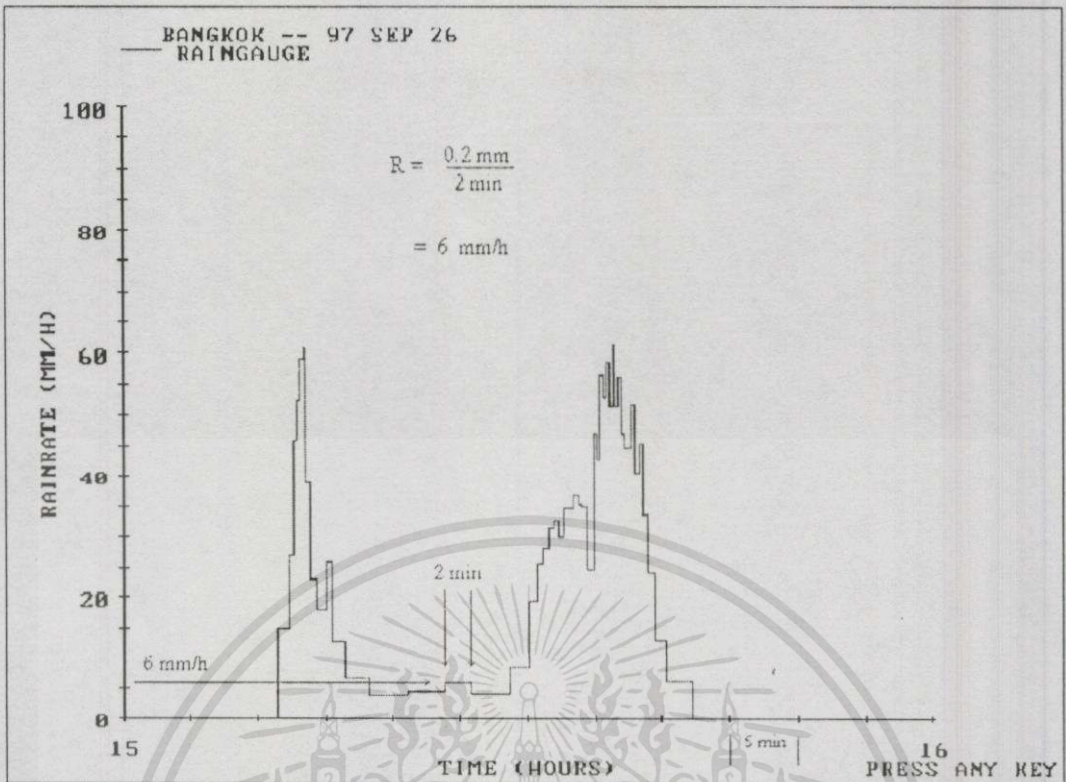
R คือ อัตราการตกของฝน (Rain-intensity; mm/h)

Δt คือ ช่วงระยะเวลาการโยกของคานเครื่องวัดน้ำฝน (Difference time each raingauge tip; Seconds)



รูปที่ 4.3 แสดงค่าการลดทอนที่ได้หลังจากการคำนวณด้วยระบบคอมพิวเตอร์ควบคุม

ตามตัวอย่างในรูปที่ 4.4 ตั้งแต่ในช่วงเวลา 15 ถึง 16 นาฬิกาจะถูกแบ่งออกเป็น 12 ช่อง แต่ละช่องเท่ากับ 5 นาที และในช่วงเวลาที่ยกขึ้นมาเป็นตัวอย่างเพื่อดูค่าอัตราการตกมีค่า $\Delta t = 2$ นาที ดังนั้นอัตราการตก (R) ตามสมการที่ (4.9) จะเท่ากับ 6 mm/h

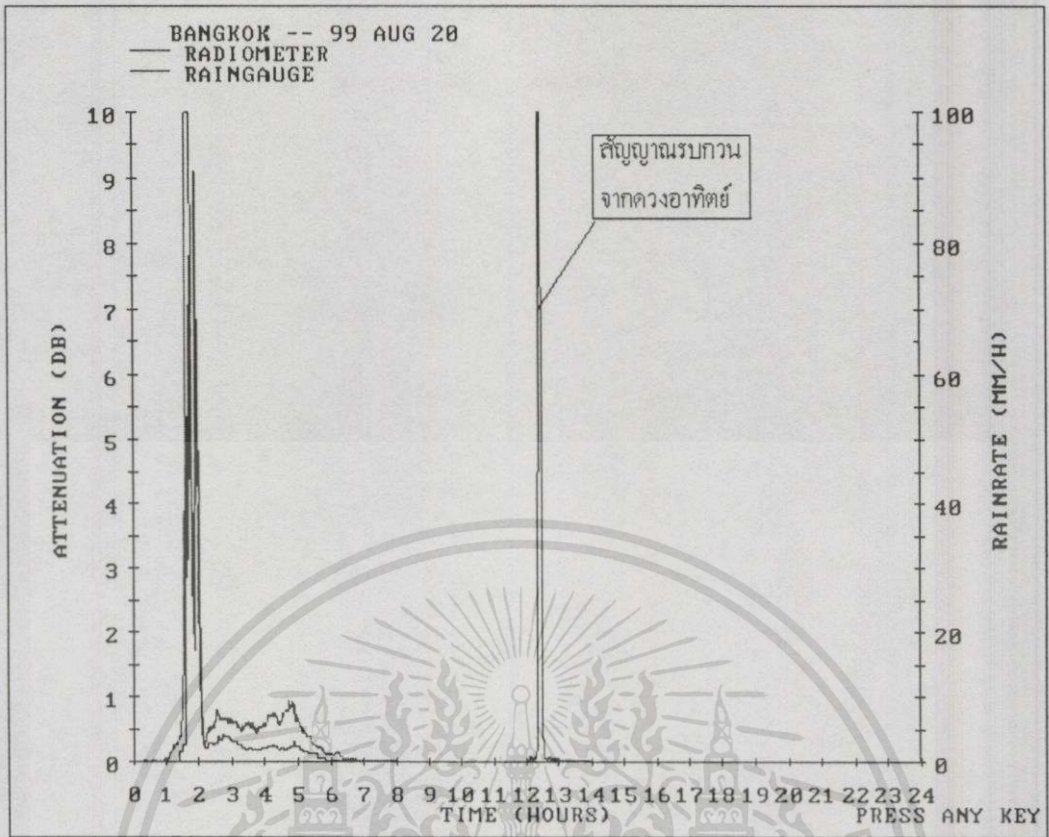


รูปที่ 4.4 แสดงวิธีการคำนวณหาค่าอัตราการตกของฝน

4.3 การแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูล

ในระหว่างการเก็บรวบรวมข้อมูลการลดทอนของสัญญาณและความแรงของฝนบางครั้งอาจจะมีสัญญาณแปลกปลอมเข้ามาที่ภาครับของอุปกรณ์ Radiometer เช่นกรณีเกิดสัญญาณรบกวนจากดวงอาทิตย์ (Sun Interference) หรือมีสัญญาณแปลกปลอมจากดาวเทียมหรือจากระบบวิทยุไมโครเวฟภาคพื้นดินที่ย่านความถี่ 12 GHz เข้ามายังเครื่องรับ Radiometer หรือเกิดจากความบกพร่องของการทำงานของอุปกรณ์ในตัว Radiometer เอง ซึ่งส่วนต่างๆ เหล่านี้สามารถสังเกตเห็นได้ปกติแล้วการวัดค่าการลดทอนที่เกิดจากฝนที่มุม 90 องศา นั้นค่าการลดทอนของสัญญาณจะเกิดควบคู่กับฝนตก (ซึ่งต่างจากการวัดที่มุมอื่นๆ ซึ่งบางครั้งอาจจะมี การลดทอนเกิดขึ้นแต่ไม่สามารถวัดการตกของฝนได้เนื่องจากขณะนั้นฝนอาจจะตกอยู่ที่บริเวณอื่นที่ไม่มีเครื่องวัดน้ำฝนวางอยู่)

ที่มุม 90 องศา หากสังเกตเห็นว่ามีค่าการลดทอนแต่ไม่มีฝนตกให้เห็นแสดงว่าขณะนั้นมีสัญญาณแปลกปลอมที่ไม่พึงประสงค์เกิดขึ้น และการแก้ไขข้อมูลนั้นจะกระทำโดยการลบข้อมูลเฉพาะในช่วงชั่วโมงที่มีสัญญาณแปลกปลอมหรือมีปัญหาทิ้งไป ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนจากดวงอาทิตย์ที่เกิดในเวลาประมาณเที่ยงวันของเดือนสิงหาคม



รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากดวงอาทิตย์

4.4 วิเคราะห์ลักษณะรูปแบบของการลดทอนและการตกของฝน

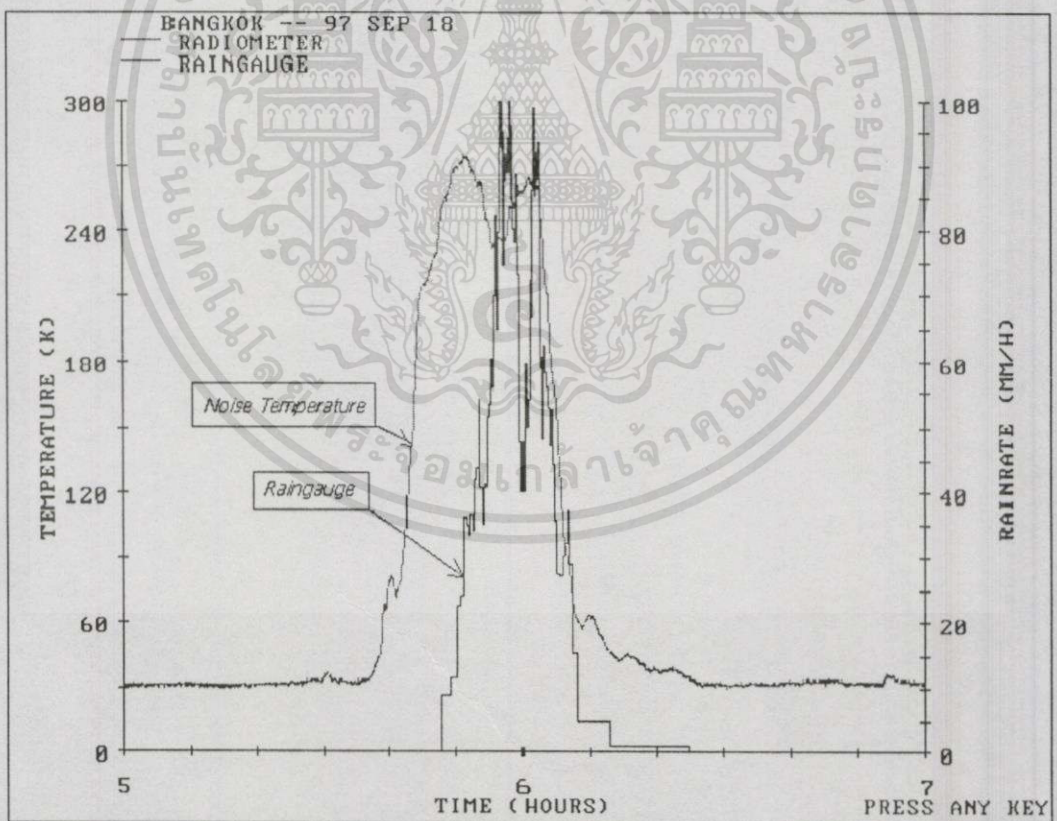
ที่มุมเงยของจานทำมุม 90 องศากับพื้นดิน ตามตัวอย่างในรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นเพียงบางส่วนของข้อมูลจากการทดลองที่ยกมาแสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปแบบของฝนและการลดทอน โดยจะสังเกตเห็นว่าในช่วงเวลาเริ่มต้นของการลดทอนกับเวลาเริ่มต้นในการตกของฝนจะเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน โดยการลดทอนจะเกิดขึ้นก่อนที่จะมีฝนตกในตำแหน่งเครื่องวัดน้ำฝน เหตุการณ์ความสัมพันธ์ตามลักษณะดังกล่าวนี้มักจะเกิดในช่วงเวลาที่ก่อนจะมีฝนตกเล็กน้อยและในขณะนั้นท้องฟ้าจะมีครึ้ม ถัดจากนั้นไม่นานจะมีทั้งฝนและการลดทอนที่เกิดขึ้นควบคู่กัน และจากการเฝ้าสังเกตพอจะสามารถตั้งข้อสมมุติฐานในการเกิดเหตุดังกล่าวได้ว่า

1. เหตุเนื่องมาจากขณะนั้นกลุ่มฝนได้เริ่มก่อตัวขึ้นแล้ว แต่ยังไม่มีความชื้นตกลงมา
2. ฝนอาจจะตกลงมาแล้วแต่ยังไม่ถึงเครื่องวัดน้ำฝน
3. ฝนอาจจะตกลงมาแล้วแต่อาจจะมีลมพัดพาให้ฝนไปตกในตำแหน่งอื่นที่ไม่ใช่ตำแหน่งที่ได้วางเครื่องวัดน้ำฝน หรือฝนอาจจะตกลงมาแล้วแต่อาจจะระเหยไปก่อนที่จะตกลงในเครื่องวัด

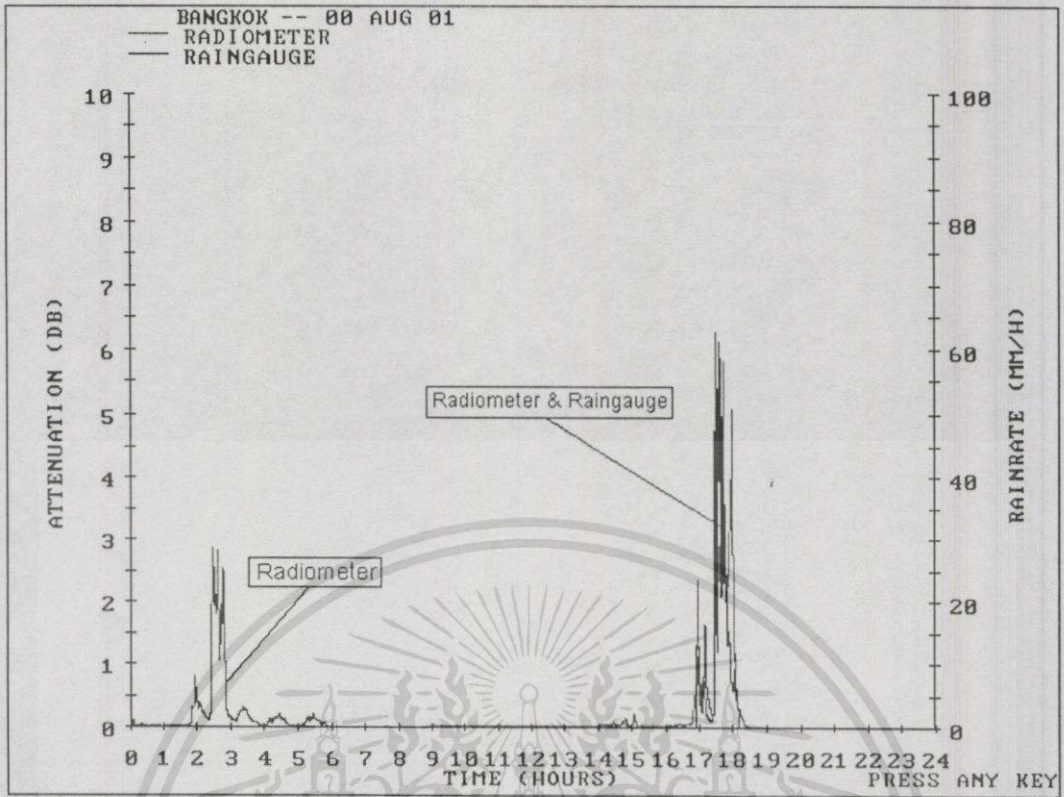
แต่ที่มุมเงยน้อยกว่า 90 องศาจะมีโอกาสเกิดการลดทอนขึ้นได้โดยที่ฝนไม่ตกในตำแหน่งที่มีการติดตั้งจานรับสัญญาณและเครื่องวัดน้ำฝน จึงทำให้มีความรู้สึกเหมือนว่ามีฝนลดทอนเกิดขึ้น

โดยที่ไม่มีฝนตก ตามตัวอย่างในรูปที่ 4.7 ในช่วงประมาณเวลา 2 ถึง 3 นาฬิกา คือช่วงเวลาที่มีการลดทอนเกิดขึ้นแต่ฝนไม่ได้ตกในตำแหน่งของเครื่องวัดน้ำฝนจึงเป็นเหตุให้ไม่มีค่าอัตราการตกของฝนแสดงให้เห็นจะมีเพียงเฉพาะค่าการลดทอนปรากฏให้เห็นเท่านั้น ส่วนในช่วงเวลา 17 ถึง 18 นาฬิกา แสดงให้เห็นถึงช่วงเวลาที่มีการลดทอนและฝนตกเกิดขึ้นควบคู่กัน

ซึ่งนี่คือเหตุผลหนึ่งที่ยืนยันว่าทำไมขณะที่กำลังรับชมรายการจากเครื่องรับโทรทัศน์ผ่านเครือข่ายดาวเทียมในขณะที่ฝนยังไม่ทันจะตกแต่คุณภาพของสัญญาณกลับลดลงและโดยเฉพาะเครื่องรับดาวเทียมที่มีมุมเงยต่ำโอกาสที่จะเกิดการจางหายของสัญญาณมีมากกว่าเครื่องรับที่มีมุมเงยสูงๆ หรือทำไมในบางครั้งฝนตกน้อยหรือบางครั้งฝนไม่ตกแต่ไม่สามารถรับสัญญาณได้ เหตุการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าเครื่องรับที่ทำมุมเงยต่ำๆ ระยะทางจากเครื่องรับกับเครื่องส่งบนดาวเทียมมีมากดังนั้นโอกาสของกลุ่มฝนอาจมีมากกว่าหนึ่งกลุ่มที่อยู่ในแนว Slant Path [13] (ตามรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วแต่ตอนต้นในบทที่ 1) และมีโอกาสที่กลุ่มฝนเหล่านั้นจะไม่ตกในบริเวณที่ได้ติดตั้งจานรับสัญญาณไว้ จึงทำให้ดูเหมือนว่าฝนตกน้อยหรือไม่มีฝนตกแต่กลับมีการลดทอนเกิดขึ้น



รูปที่ 4.6 แสดงช่วงเวลาของการเกิดการลดทอนและการตกของฝน



รูปที่ 4.7 มีการลดทอนเกิดขึ้น โดยที่ฝนไม่ตกในตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณ

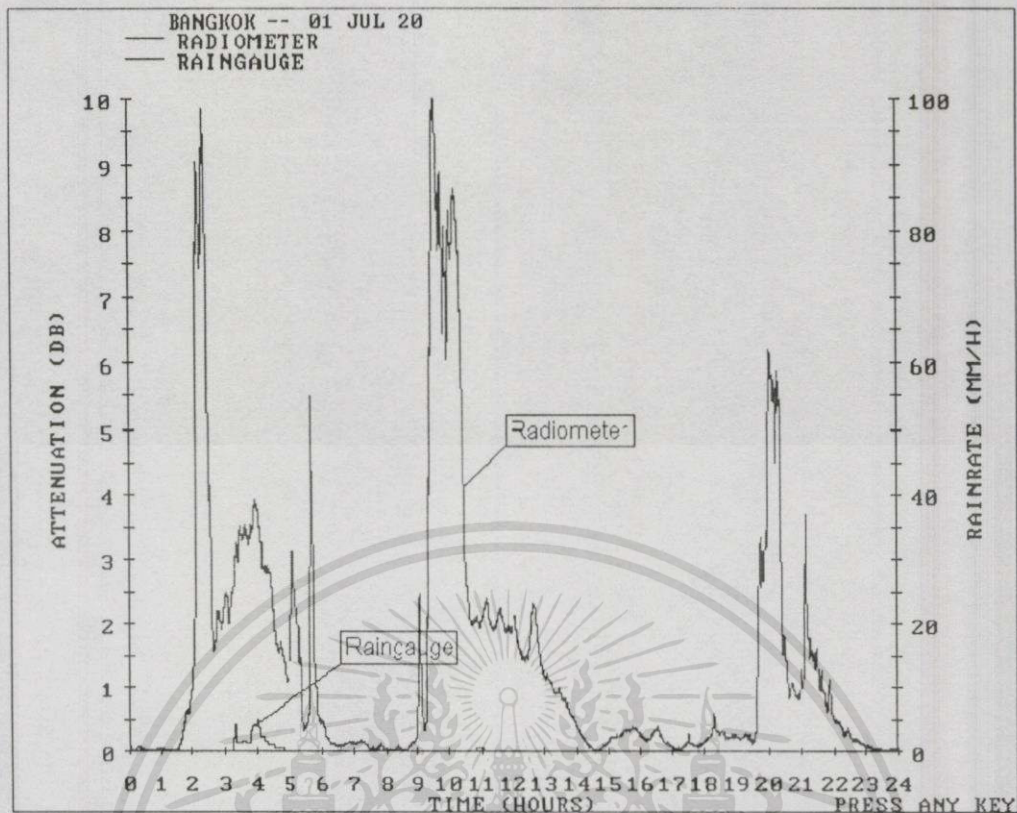
แต่อย่างไรก็ตามสำหรับที่มุม 60 องศา การเกิดเหตุการณ์ในลักษณะที่มีการลดทอนเกิดขึ้น แต่ไม่มีฝนตกมีโอกาสดังกล่าวได้แต่ไม่บ่อยมากนัก และจากข้อมูลการทดลองเป็นที่สังเกตว่าการลดทอนที่เกิดขึ้นโดยที่ฝนตกไม่ตรงกับตำแหน่งจุดที่ตั้งเครื่องมีวัดน้ำฝนนั้น ค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นจะเป็นเพียงค่าการลดทอนที่ต่ำ ๆ ตามรูปที่ 4.7 ในช่วงเวลาประมาณ 2 ถึง 3 นาฬิกาที่มีการลดทอนน้อยกว่า 3 dB ซึ่งในเหตุการณ์ดังกล่าวตั้งเป็นข้อสมมุติฐานได้ว่าฝนที่เกิดเป็นเพียงกลุ่มฝนเล็ก ๆ และกลุ่มฝนดังกล่าวไม่มีรัศมีใหญ่พอที่จะครอบคลุมมาถึงจุดที่มีการตั้งเครื่องมีวัดน้ำฝนไว้ ซึ่งต่างกับการลดทอนที่มุมต่ำมากๆ จากการทดลองทำการจัดการลดทอนด้วยเครื่องรับ Radiometer ที่มุมเงย 10 องศา ในตัวอย่างของเหตุการณ์วันที่ 20 กรกฎาคม 2544 สามารถจะสังเกตพบเหตุการณ์ของการลดทอนเกิดขึ้นได้โดยที่ฝนตกไม่ตรงกับตำแหน่งที่ตั้งเครื่องมีวัดน้ำฝนได้ชัดเจนและมีโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้นได้บ่อยกว่าที่มุมเงย 60 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ที่มีการลดทอนเกิดขึ้นตลอดเวลา 24 ชั่วโมงในขณะที่เครื่องวัดน้ำฝนมีฝนตกเพียงเล็กน้อยในช่วงเวลาประมาณ 3-5 นาฬิกา และนอกจากนี้ที่มุมเงยต่ำมีโอกาสที่กลุ่มฝนจะอยู่ในแนวของ Slant Path ได้มากกว่าหนึ่งกลุ่มฝน ซึ่งจะส่งผลให้มีการลดทอนเกิดขึ้นได้สูงมากเช่นกันในขณะที่ช่วงเวลานั้นไม่มีฝนตกในตำแหน่งของเครื่องวัดน้ำฝนเลยก็ได้ [13]

เมื่อกลับมาพิจารณาที่มุมเงย 60 องศา ตามรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดให้ตำแหน่ง "0 Isotherm" สูงเท่ากับ 5 กิโลเมตรที่มุมเงย 60 องศาแล้วระยะ L_g จะประมาณ 2.88 กิโลเมตร ซึ่ง

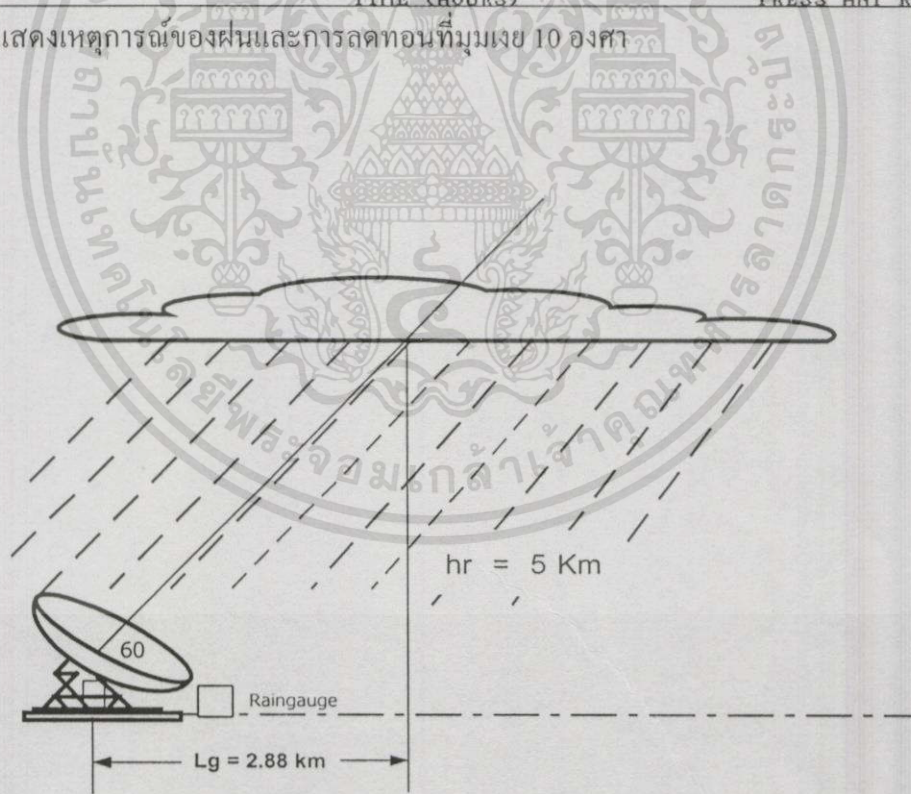
ถือว่ามิมีระยะไม่มากนักเมื่อเทียบกับความกว้างของเซลล์ฝนในขณะที่มีมุมเงย 10 องศาจะมีระยะ Lg ประมาณ 28 กิโลเมตร ดังนั้นที่มุมเงย 60 องศาโอกาสที่ฝนจะตกในตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณควบคู่กับฝนตกในเครื่องวัดน้ำฝนจึงมีโอกาสเป็นไปได้สูง และจะมีโอกาสของความเป็นไปได้ที่มีการลดทอนเกิดขึ้นแต่จำนวนน้ำฝนที่วัดได้ได้ค่อนข้างจะน้อยเนื่องจากตามลักษณะปกติของเซลล์กลุ่มฝนบริเวณศูนย์กลางของเซลล์ฝนจะมีฝนมากกว่าบริเวณขอบๆของเซลล์ ดังนั้นที่มุม 60 องศาจึงมีโอกาสที่ Main Lobe ของจานรับสัญญาณจะอยู่ในแนวตรงกับศูนย์กลางของเซลล์ฝนแต่ฝนที่ตกในเครื่องวัดน้ำฝนเป็นฝนที่เกิดจากบริเวณขอบเซลล์ดังสมมุติฐานในรูปที่ 4.10 สำหรับลักษณะของสัญญาณการลดทอนกับอัตราการตกที่ได้จากลักษณะของเหตุการณ์ดังกล่าวจากผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.11 ที่มีการลดทอนค่อนข้างจะสูงในขณะที่ฝนที่วัดได้เป็นเพียงจำนวนเล็กน้อยสำหรับที่มุมเงยต่ำ 10 องศา การลดทอนที่เกิดขึ้นโดยที่ไม่มีฝนตกในตำแหน่งของอุปกรณ์วัดน้ำฝนหรือลักษณะที่มีการลดทอนเกิดขึ้นแล้วแต่กลับวัดน้ำฝนได้น้อย ลักษณะเหตุการณ์ดังกล่าวนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้บ่อยมากๆ เมื่อเทียบกับที่มุมเงย 60 องศา

ทั้งเหตุการณ์ที่มีการลดทอนเกิดขึ้นแต่ไม่มีฝนตก หรือมีการลดทอนเกิดขึ้นแต่วัดน้ำฝนได้น้อย ทั้งสองเหตุการณ์นี้ สำหรับที่มุม 60 องศาจะมีการเกิดผสมผสานกันเสมอและจากข้อมูลการทดลองการจะแยกแยะออกเป็นเหตุการณ์ต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วทำได้ไม่ถนัดนัก ฉะนั้นการจะให้ได้มาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนและการตกของฝนที่ถูกต้องแม่นยำจึงต้องใช้วิธีการเฉลี่ยข้อมูลจากการเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงสถิติในระยะเวลาที่ยาวนานพอสมควร

แต่สำหรับที่มุม 90 องศาแล้วการลดทอนจะเกิดควบคู่กับการตกของฝนและสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือแทบจะไม่มีโอกาสที่ฝนตกแล้วจะวัดการลดทอนไม่ได้หรือมีการลดทอนเกิดขึ้นแต่วัดน้ำฝนได้น้อยเพราะเหตุว่าทิศทางตำแหน่งของจานรับสัญญาณอยู่ในทิศทางตำแหน่งเดียวกันกับเครื่องวัดน้ำฝน เมื่อฝนตกในเครื่องรับ Radiometer ก็จะต้องตกในเครื่องวัดน้ำฝนด้วย

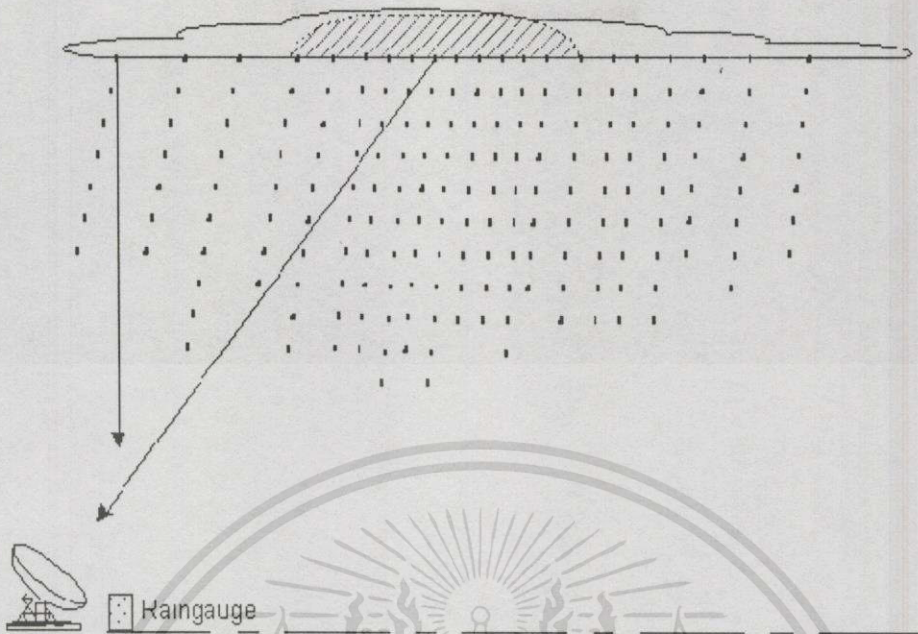


รูปที่ 4.8 แสดงเหตุการณ์ของฝนและการลดทอนที่มุมเงย 10 องศา

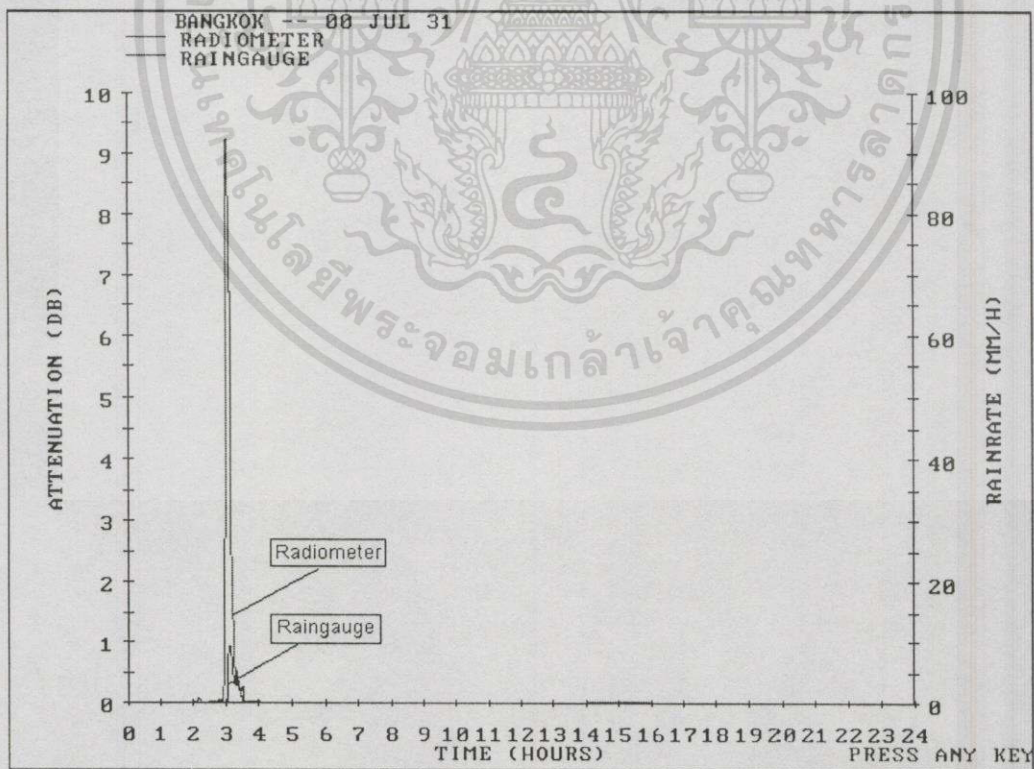


รูปที่ 4.9 แสดงระยะทาง L_g ที่มุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงสมมุติฐานลักษณะการลดทอนที่เกิดขึ้นโดยที่ฝนตกในเครื่องวัดน้ำฝนมีน้อย



รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการลดทอนและการตกของฝนที่ได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์

Radiometer ที่มุม 60 องศา

บทที่ 5

ผลการทดลอง

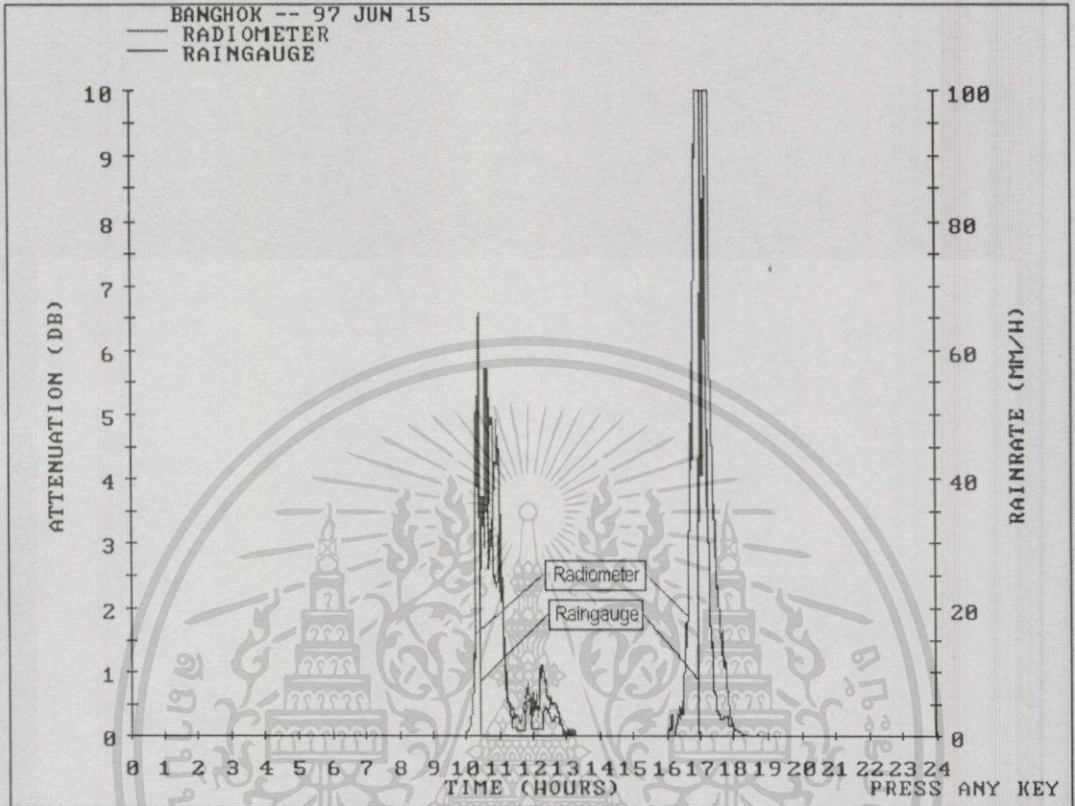
ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้ประกอบด้วยข้อมูลสองส่วนคือข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยอุปกรณ์ Radiometer ที่มุม 90 องศา ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม 2541 ถึง เมษายน 2543 ส่วนข้อมูลที่สองเป็นข้อมูลการทดลองที่มุม 60 องศาด้วยอุปกรณ์ Radiometer เช่นเดียวกันระยะเวลาในการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2543 ถึง เมษายน 2544 ซึ่งข้อมูลทั้งสองส่วนนี้จะป็นข้อมูลหนึ่งที่สำคัญมากสำหรับการนำไปวิเคราะห์หาค่าการลดทอนที่เกิดจากฝนในช่วงเวลาต่าง ๆ และข้อมูลการทดลองที่มุม 90 องศานี้มีรายละเอียดปรากฏอยู่ในภาคผนวกแล้ว

5.1 ผลการทดลองที่มุม 90 องศา

จากการศึกษาสถิติของข้อมูลที่ได้รับรวบรวมมาที่มุม 90 องศา ในช่วงเวลาตั้งแต่เดือนมกราคม 2540 ถึง เมษายน 2543 รวมระยะเวลาไม่น้อยกว่า 3 ปี แต่เป็นที่น่าเสียดายว่าข้อมูลในช่วงเดือนมกราคม 2541 ถึง เดือนเมษายน 2542 มีการสูญหายไปช่วงเวลาหนึ่งตามที่ได้กล่าวในบทที่ 1 ไปแล้วนั้น เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ก็จะทำให้ทราบถึงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนของสัญญาณกับอัตราการตกของฝน, ค่าการแจกแจงสะสมการลดทอน (Cumulative distribution attenuation), และค่าแจกแจงสะสมอัตราการตกของฝน (Cumulative distribution rain-intensity) ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ เช่นในช่วงเวลายาวคาบ 3 ชั่วโมง, รายคาบ 6 ชั่วโมง, รายคาบ 12 ชั่วโมง, รายฤดู, รายครึ่งปี, รายปี เป็นต้น ซึ่งข้อมูลสถิติในช่วงเวลาต่างๆ เหล่านี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำไปออกแบบระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมเพื่อชดเชยระดับของสัญญาณที่มีการสูญหายไปให้ถูกต้องตามช่วงเวลาการตกของฝน

ในการรักษาคุณภาพของระดับสัญญาณให้ได้ตามมาตรฐานสากลยอมรับนั้น โดยมาตรฐานทั่วไปจะกำหนดค่า Availability ไว้ที่ไม่ต่ำกว่า 99.9% ของช่วงระยะเวลาใดๆ ซึ่งก็หมายความว่าในการออกแบบระบบจะต้องมีการเผื่อค่าการสูญหายของสัญญาณไว้ในระดับหนึ่งจะมากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในภูมิภาคนั้น ๆ ถ้าหากผู้ออกแบบไม่ทราบถึงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนที่เกิดขึ้นจริงในท้องถิ่นนั้นๆ ก็จะทำให้การออกแบบระบบมีความผิดพลาดขึ้นได้ เช่นผู้ออกแบบเผื่อค่าการสูญหายของสัญญาณที่คาดว่าจะเกิดไว้ น้อยเกินไปเมื่อมีฝนตกจะทำให้ค่า Availability ต่ำกว่าค่ามาตรฐานกำหนดได้ แต่หากผู้ออกแบบเผื่อค่าการสูญหายของสัญญาณไว้สูงกว่าค่ามาตรฐานที่ได้วางไว้ซึ่งก็หมายความว่าค่าใช้จ่ายสำหรับการลงทุนในระบบที่ตามมาจะสูงขึ้น

ด้วยเช่นกัน ดังนั้นผู้ออกแบบจึงมีความจำเป็นมากที่จะต้องทราบค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในภูมิภาคนั้น ๆ จึงจะทำให้ได้ค่า Availability ตามที่มาตรฐานกำหนดและเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย



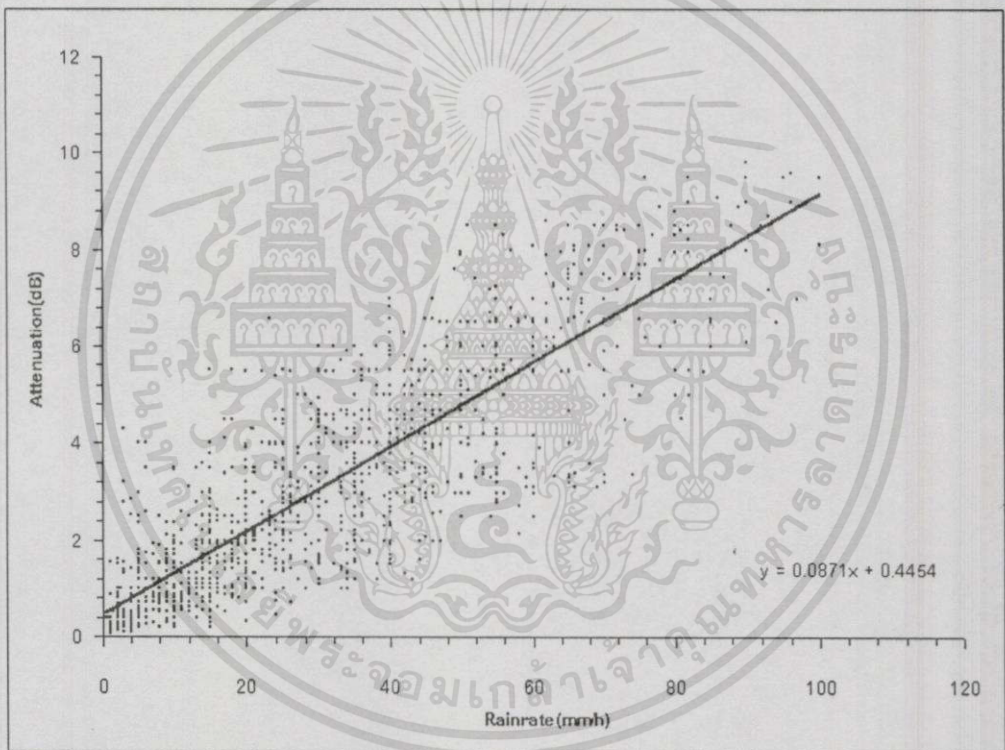
รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์ Radiometer ที่มุม 90 องศา

ในรูปที่ 5.1 เป็นเพียงบางส่วนของตัวอย่างของข้อมูลจากข้อมูลทั้งหมดที่จะยกมาแสดงให้เห็นถึงลักษณะของสัญญาณการลดทอนและอัตราการตกของฝนที่ได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์ Radiometer ซึ่งโดยทั่วไปแล้วที่มุมดังกล่าวค่าอัตราการตกจะต้องสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับการลดทอน กล่าวคือค่าการลดทอนจะแปรผันตรงตามการตกของฝนเมื่อเรานำค่าการลดทอนและค่าอัตราการตกของฝนที่ได้ทั้งหมดมากำหนดลงในแผนภาพกระจาย (Scatter Diagram) และใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่าวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ก็จะทำให้สามารถทราบถึงสมการเส้นถดถอย (Regression Line) ที่ใช้ในการพยากรณ์หาค่าความสัมพันธ์การลดทอนของสัญญาณจากอัตราการตกของฝนได้ โดยกำหนดให้อัตราการตกของฝนเป็นตัวแปรอิสระและค่าการลดทอนเป็นตัวแปรตามก็จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ดังในรูปที่ 5.2 ซึ่งมีสมการเส้นถดถอยหรือเส้นแนวโน้มที่แสดงถึงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนกับอัตราการตกในลักษณะของเส้นตรง (Linear Curve) ดังนี้

$$Y = 0.0871X + 0.4454 \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อตัวแปร X ถูกแทนด้วยค่าอัตราการตกของฝน และตัวแปร Y แทนด้วยค่าการลดทอนจากการพืดเคิบรูปที่ 5.2 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างกันและกัน (Correlation Coefficient) ประมาณ 0.9 ซึ่งแสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้ค่าการลดทอนมีความสัมพันธ์สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับอัตราการตกของฝนเป็นอย่างมากจึงถือได้ว่ามีความเหมาะสมมากที่จะนำข้อมูลการทดลองไปขยายผลการศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาค่าแจกแจงสะสมการตกและแจกแจงสะสมอัตราการลดทอนในช่วงเวลาต่าง ๆ เช่น ค่าเฉลี่ยการแจกแจงสะสมที่เกิดในทุกๆ คาบเวลา 3 ชั่วโมง, แจกแจงสะสมที่เกิดในทุกๆ คาบเวลา 6 ชั่วโมงและ 12 ชั่วโมง, แจกแจงสะสมที่เกิดในรายฤดู, แจกแจงสะสมที่เกิดในรายเดือน, แจกแจงสะสมที่เกิดในรายครึ่งปีและรายปีต่อไปดังนี้



รูปที่ 5.2 แสดงค่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าการลดทอนกับอัตราการตกของฝนที่มุม 90 องศา

5.1.1 การแจกแจงสะสมที่เกิดในทุกๆ คาบเวลา 3 ชั่วโมง

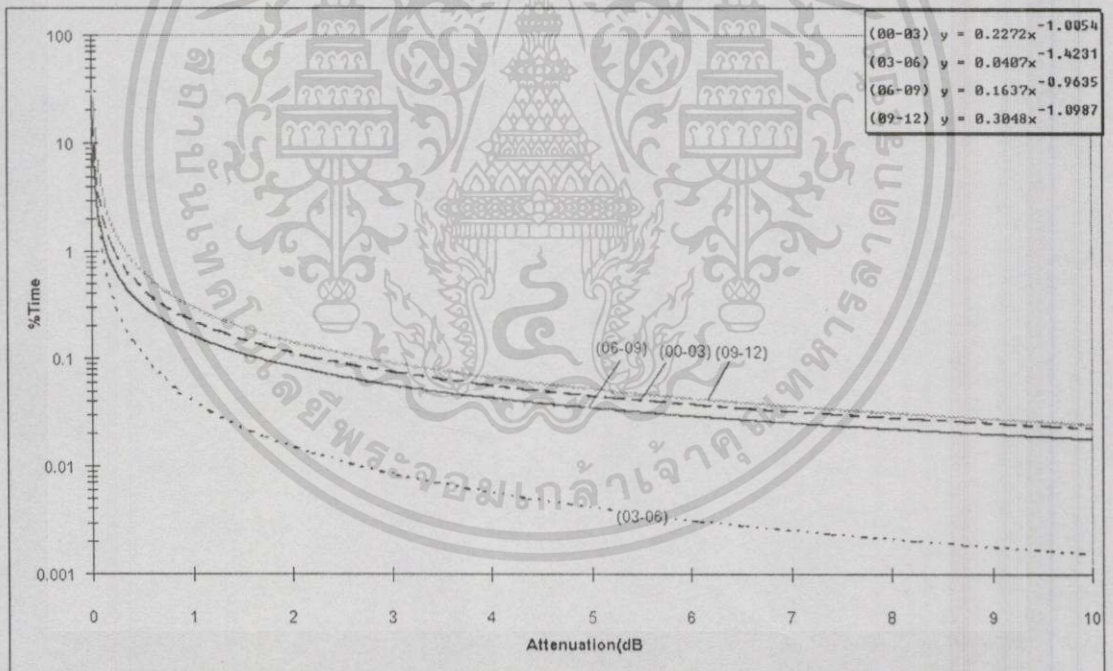
ในการออกแบบระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดแต่คุณภาพอยู่ในมาตรฐานที่ยอมรับได้นั้น ผู้ออกแบบจะต้องทราบค่าแจกแจงสะสมการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อจะได้มีการชดเชยสัญญาณการลดทอนได้อย่างถูกต้องตรงกับเวลาการตกของฝน ดังที่กล่าวมาแล้ว หากการออกแบบเพื่อต้องการเน้นคุณภาพในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเช่นต้องการเน้นคุณภาพการรับชมรายการโทรทัศน์ในช่วงเวลา 15-18 นาฬิกาหรือช่วงเวลา 18-21 นาฬิกาซึ่งเป็นช่วงที่โดยส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่แล้วจะมีผู้ใช้บริการชมรายการ โทรทัศน์ผ่านดาวเทียมมากผู้ออกแบบจึงควรให้ความสนใจกับข้อมูลในช่วงดังกล่าวเป็นพิเศษเป็นต้น

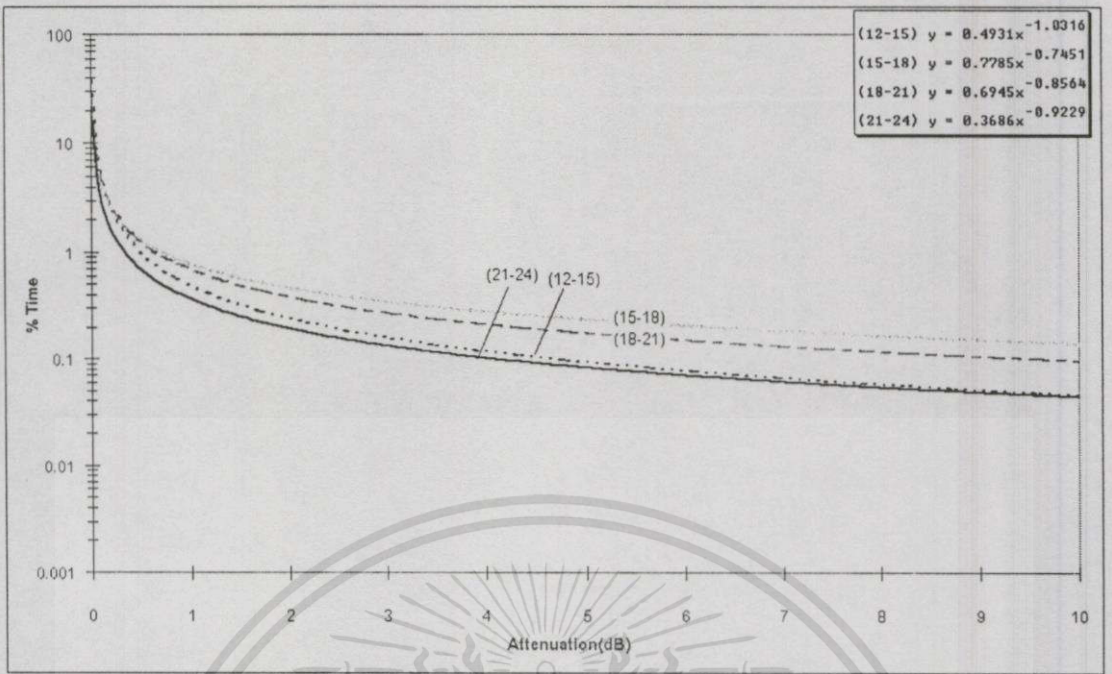
ในตารางที่ 5.1 เป็นการแสดงค่าแจกแจงสะสมอัตราการตกและรูปที่ 5.3, 5.4 แสดงค่าการแจกแจงสะสมการลดทอนที่ได้จากข้อมูลสถิติการทดลองระหว่างเดือนมกราคม 2541 ถึง เมษายน 2543 ที่เกิดในทุกๆ คาบเวลา 3 ชั่วโมงของเวลาในประเทศไทย (00-03, 03-06, 06-09, 09-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-24) จะพบว่าในช่วงเวลา 15-18 นาฬิกา มีแนวโน้มการเกิดฝนและการลดทอนเกิดขึ้นบ่อยและกินเวลานานกว่าช่วงเวลาอื่นๆ จึงทำให้เปอร์เซ็นต์แจกแจงสะสมเกิดขึ้นมากกว่าช่วงเวลาอื่นๆ และรองลงมาคือช่วงเวลา 18-21 นาฬิกา ในขณะที่ช่วงเวลา 03-06 นาฬิกา มีฝนและการลดทอนน้อยกว่าช่วงเวลาอื่นๆ มาก ในการออกแบบระบบสื่อสารนั้น ITU ได้กำหนดมาตรฐานการออกแบบระบบเชื่อมโยงในการให้บริการไว้ใน ITU-T Rec.G.821 และ G.826 โดยกล่าวถึงค่าเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ระบบสื่อสารไม่สามารถติดต่อให้บริการได้ (Percent Time Unavailability) เช่น 0.1% ซึ่งหมายความว่าระบบสื่อสารนั้นไม่สามารถให้บริการได้คิดเป็นเวลา 0.1% หรือเท่ากับ 0.18 นาทีที่ระบบไม่สามารถให้บริการได้ของคาบเวลา 3 ชั่วโมง จากข้อมูลการทดลอง เช่น ในช่วงเวลา 18-21 นาฬิกาของรูปที่ 5.4 ที่ค่าการลดทอนมากกว่าหรือเท่ากับ 9 dB มีเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมการลดทอนเกิดขึ้นน้อยกว่า 0.1% หรือคิดเป็นเวลาที่การลดทอนมากกว่าหรือเท่ากับ 9 dB มีเวลาสะสมเกิดขึ้นไม่ถึง 0.18 นาทีของแต่ละรอบเวลา 3 ชั่วโมง แต่สำหรับการลดทอนที่เท่ากับหรือน้อยกว่า 9 dB จะมีการลดทอนสะสมเกิดขึ้นมากกว่า 0.1% หรือมากกว่า 0.18 นาทีเป็นต้น ดังนั้นหากผู้ประกอบการด้านการให้บริการ โทรทัศน์ผ่านดาวเทียมหากต้องการจะเน้นคุณภาพการให้บริการในเวลา 18-21 นาฬิกา ผู้ให้บริการควรจะต้องมีการเผื่อค่าการลดทอนหรือการสูญหายของสัญญาณที่จะเกิดจากฝนไว้ไม่น้อยกว่า 9 dB ถึงจะได้คุณภาพของสัญญาณ 99.9% ในขณะที่ช่วงเวลา 03-06 นาฬิกา เป็นช่วงที่มีฝนตกไม่บ่อยนักและผู้ชมรายการในช่วงนี้ก็มีน้อยเช่นกัน เพียงแต่เผื่อค่าการลดทอนไว้ 0.5 dB ก็เพียงพอที่จะได้ค่า Availability 99.9% ในช่วงเวลาดังกล่าวแล้วเป็นต้น ส่วนช่วงเวลาอื่นๆ สามารถพิจารณาในทำนองเดียวกับที่กล่าวมาแล้วได้จากข้อมูลรายละเอียดในรูปที่ 5.3 และ 5.4

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในคาบเวลา 00-03, 03-06, 06-09, 09-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-24

Period	Rainrate (mm/h)									
	30	10	3	1	0.3	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
00-03 LT.	<3	3	11	30	50	65	72	80	93	94
03-06 LT.	<1	1	3.5	6	9	20	25	34	36	40
06-09 LT.	<8	8	20	28	32	35	40	42	47	50
09-12 LT.	1	11	30	50	70	90	95	100	103	105
12-15 LT.	2	20	45	53	74	95	98	100	105	107
15-18 LT.	2.3	30	60	83	98	101	105	110	120	125
18-21 LT.	1.8	14	38	60	85	96	98	100	105	110
21-24 LT.	1	4	17	46	75	85	96	100	105	108



รูปที่ 5.3 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 00-03, 03-06, 06-09, 09-12



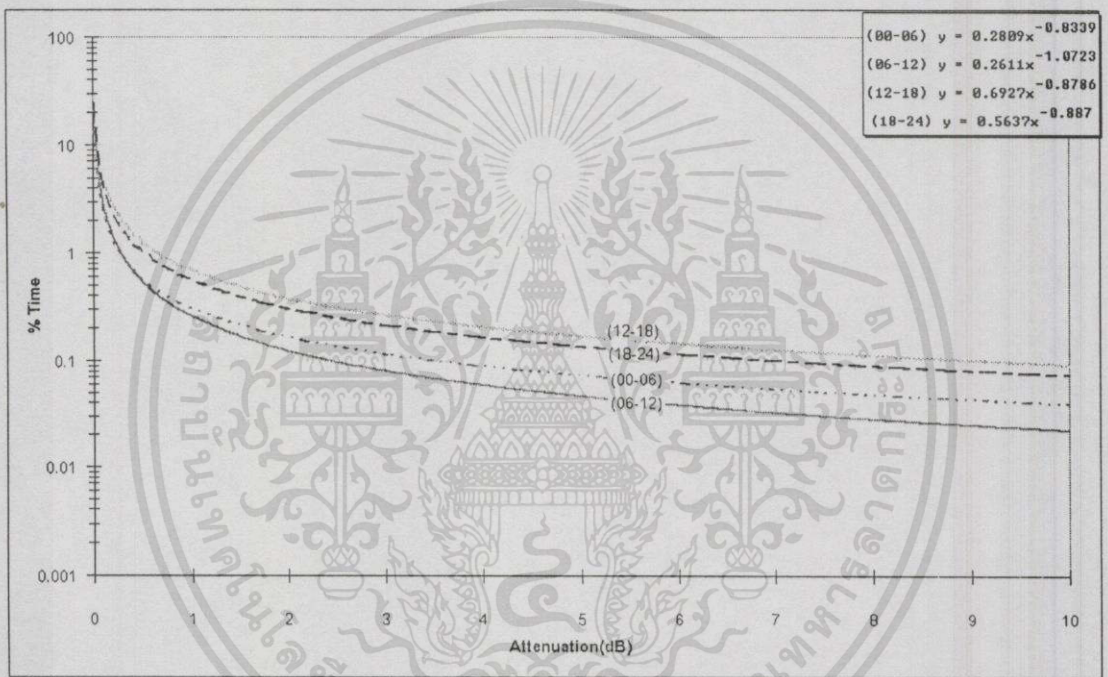
รูปที่ 5.4 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 12-15, 15-18, 18-21, 21-24

5.1.2 การแจกแจงสะสมที่เกิดในทุกๆ คาบเวลา 6 ชั่วโมงและ 12 ชั่วโมง

ในตารางที่ 5.2 และ รูปที่ 5.5 เป็นค่าแจกแจงสะสมอัตราการตกและแจกแจงสะสมการลดทอนที่เกิดในทุกๆ 6 ชั่วโมง (00-06, 06-12, 12-18, 18-24) โอกาสของการเกิดฝนและการลดทอนในรายคาบ 6 ชั่วโมง จะเกิดบ่อยในช่วงเวลาบ่ายและค่ำ (12-18, 18-24 นาฬิกา) ส่วนใน ตารางที่ 5.3 และ รูปที่ 5.6 แสดงค่าแจกแจงสะสมอัตราการตกและแจกแจงสะสมลดทอนในรายคาบเวลา 12 ชั่วโมง (00-12, 12-24) พบว่าในช่วงเวลาดังแต่เพียงวันจนถึงเวลาเที่ยงคืน (12-24 นาฬิกา) เป็นช่วงเวลาที่มึฝนตกและการลดทอนเกิดขึ้นบ่อยกว่าช่วงเวลาเที่ยงคืนถึงเที่ยงวัน (00-12 นาฬิกา) มาก ดังนั้นในการออกแบบระบบเพื่อต้องการเน้นคุณภาพในช่วงเวลาต่างๆตามที่กล่าวมาจะต้องเผื่อค่าการสูญหายของสัญญาณไว้ให้สอดคล้องกับช่วงเวลาต่างๆตามที่แสดงในรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 เช่นองค์กรผู้ให้บริการวางจรเช่าช่องสัญญาณความเร็วสูงได้ทำข้อตกลงประกันคุณภาพ (Agreement Guaranty) ไว้ที่ 99.9 % กับผู้เช่าใช้ช่องสัญญาณ ดังนั้นองค์กรผู้ให้บริการจะต้องเผื่อค่าการลดทอนไว้ไม่น้อยกว่า 3 dB ในช่วงเวลา 00-12 นาฬิกา และ 9 dB ในช่วงเวลา 12-24 นาฬิกาเป็นต้น

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในคาบเวลา 00-06, 06-12, 12-18, 18-24

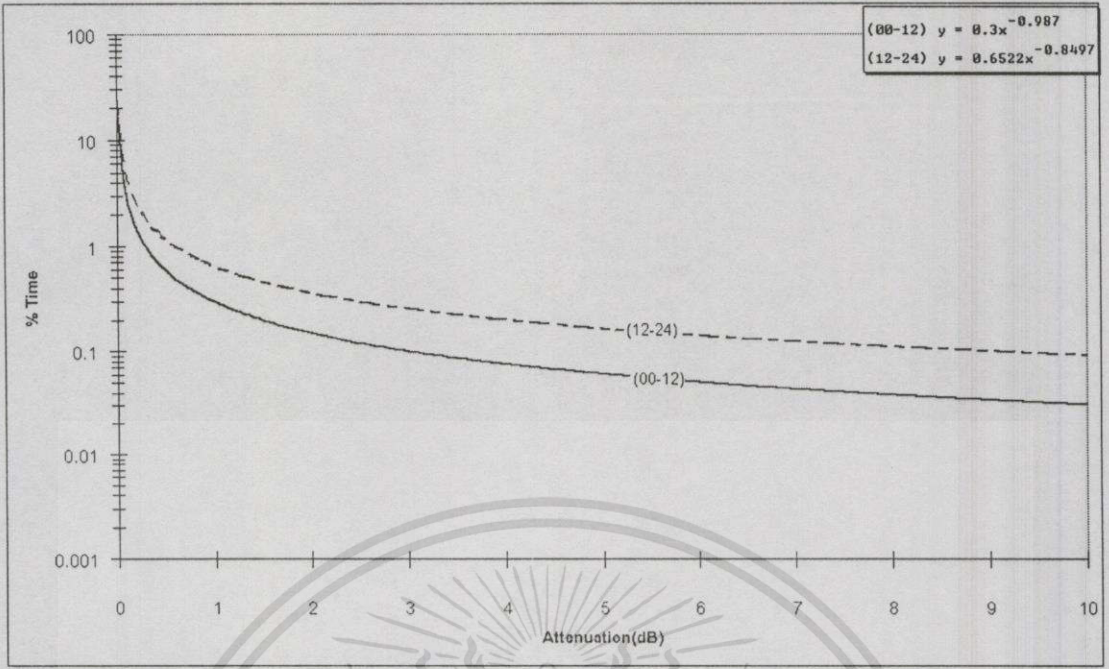
Period	Rainrate (mm/h)										
	Percent Time(%)	30	10	3	1	0.3	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
00-06 LT.	<3.5	3.5	32	70	90	98	107	120	125	130	
06-12 LT.	4	9.3	35	61	90	102	111	122	122	123	
12-18 LT.	3	25	65	81	100	106	117	122	126	138	
18-24 LT.	1.8	7	35	70	92	100	110	120	125	132	



รูปที่ 5.5 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 00-06, 06-12, 12-18, 18-24

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในคาบเวลา 00-12, 12-24

Period	Rainrate (mm/h)										
	Percent Time(%)	30	10	3	1	0.3	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
00-12 LT.	1.4	5.2	28	62	90	107	128	145	146	148	
12-24 LT.	1.8	12	41	68	91	102	115	148	149	152	



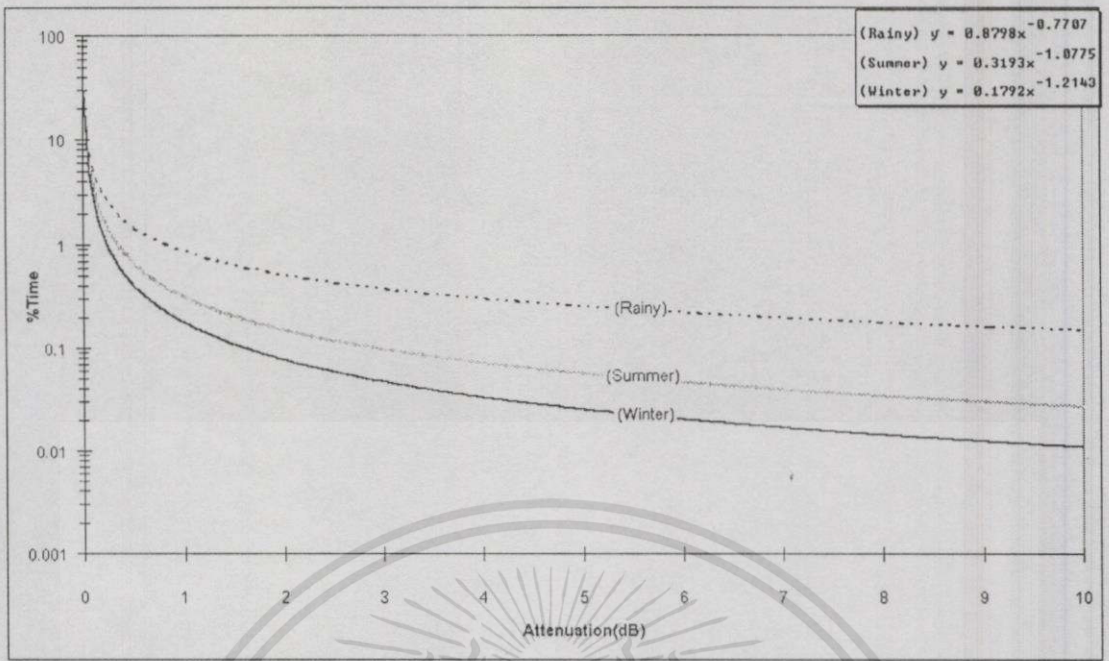
รูปที่ 5.6 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 00-12, 12-24

5.1.3 การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายฤดู

การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายฤดูแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงฤดูฝน ตั้งแต่กลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม, ฤดูหนาวตั้งแต่กลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์และ ฤดูร้อนตั้งแต่กลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคมดังแสดงในตารางที่ 5.4 พบว่าเปอร์เซ็นต์เวลาการตกสะสมจะมีมากกว่าในช่วงฤดูฝน, ฤดูร้อนและฤดูหนาวตามลำดับ เช่นที่อัตราการตกน้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจะมีเวลาสะสมมากกว่า 0.3 % ในฤดูฝน, 0.1 % ในฤดูร้อนและ 0.01 % ในฤดูหนาวตามลำดับ ดังนั้นในการออกแบบระบบเพื่อชดเชยการลดทอนของสัญญาณต้องเพื่อการลดทอนไว้ไม่น้อยกว่า 10 dB ในฤดูฝน, 3 dB ในฤดูร้อน และ 1.6 dB ในฤดูหนาวตามลำดับถึงจะได้มาตรฐานคุณภาพ 99.9% ดังแสดงรายละเอียดไว้ในรูป ที่ 5.7

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงฤดูฝน ฤดูร้อน ฤดูหนาว

Period	Rainrate (mm/h)									
Percent Time(%)	30	10	3	1	0.3	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
Rainy	1.7	12	43	72	100	110	130	170	202	208
Summer	2.1	10	28	48	80	100	104	106	110	110
Winter	2	6	23	41	64	72	94	100	108	110



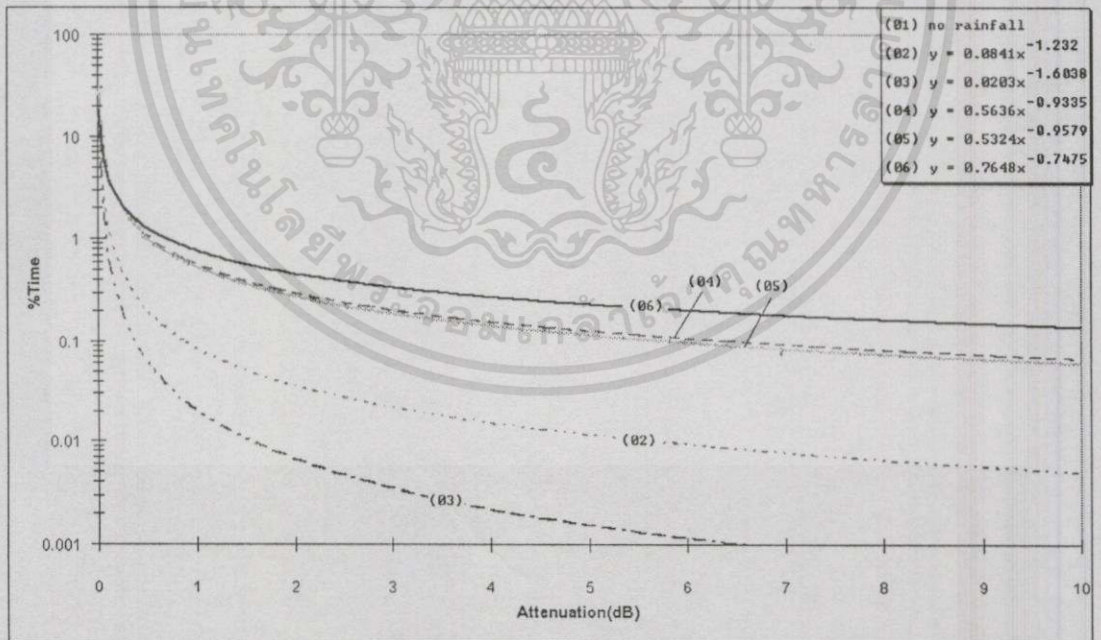
รูปที่ 5.7 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงฤดูฝน ฤดูร้อน ฤดูหนาว

5.1.4 การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายเดือน

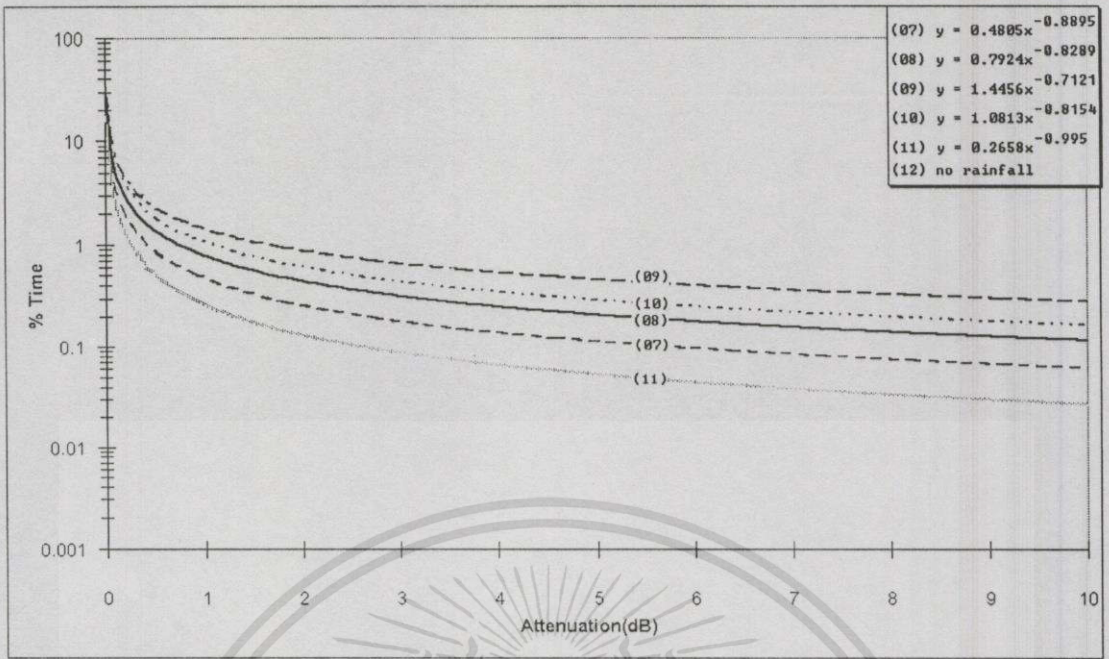
ในตารางที่ 5.5 เป็นการแสดงแจกแจงค่าสะสมอัตราการตกที่เกิดขึ้นในแต่ละเดือน (เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม) จะเห็นว่าในเดือนกันยายนซึ่งอยู่ในช่วงฤดูฝนจะเป็นช่วงเวลาที่มฝนตกบ่อยและกินเวลานาน ในขณะที่เดือนมกราคมและเดือนธันวาคมเป็นช่วงที่ไม่มีฝนตกจึงไม่มีค่าแจกแจงสะสมปรากฏให้เห็นส่วนในรูปที่ 5.8 เป็นค่าการแจกแจงสะสมการลดทอนที่เกิดในเดือนมกราคมถึงมิถุนายนและรูปที่ 5.9 เป็นค่าการแจกแจงสะสมการลดทอนที่เกิดในเดือนกรกฎาคมถึงธันวาคมจะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมที่เกินกว่า 0.1 % ของเดือนมิถุนายน สิงหาคม กันยายน ตุลาคม ทำให้เกิดการลดทอนขึ้นมากกว่า 10 dB โดยเฉพาะเดือนกันยายนซึ่งอยู่ในช่วงฤดูฝนที่การลดทอน 10 dB จะมีเวลาสะสมเกิดขึ้น 0.29 % หรือคิดเป็นเวลาที่สำคัญขนาด 10 dB จะต้องสูญหายไปเป็นเวลา 5.22 ชั่วโมงในเดือนกันยายนซึ่งถือว่าต่ำกว่ามาตรฐานที่ยอมรับได้มาก (ซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดไว้ไม่เกิน 0.1 %)

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงรายเดือน มกราคม ถึง ธันวาคม

Period	Rainrate (mm/h)									
	30	10	3	1	0.3	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
01 (Jan)	no rainfall									
02 (Feb)	3	10	17	28	40	52	70	70	70	70
03 (Mar)	1.7	7	11	14	16	16	16	16	16	16
04 (Apr)	2.7	13	40	65	90	100	102	110	115	120
05 (May)	1.8	9	38	60	80	90	100	115	115	115
06 (Jun)	1	8	40	67	90	102	115	118	122	124
07 (Jul)	1.1	7	40	60	80	90	102	105	106	107
08 (Aug)	1.5	10	50	67	90	100	105	117	120	121
09 (Sep)	2	11	40	70	102	110	125	200	220	250
10 (Oct)	2	10	40	72	98	105	110	120	123	124
11 (Nov)	2.3	11	40	50	60	70	80	80	80	80
12 (Dec)	no rainfall									



รูปที่ 5.8 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงเดือน มกราคม, กุมภาพันธ์, มีนาคม, เมษายน, พฤษภาคม, มิถุนายน



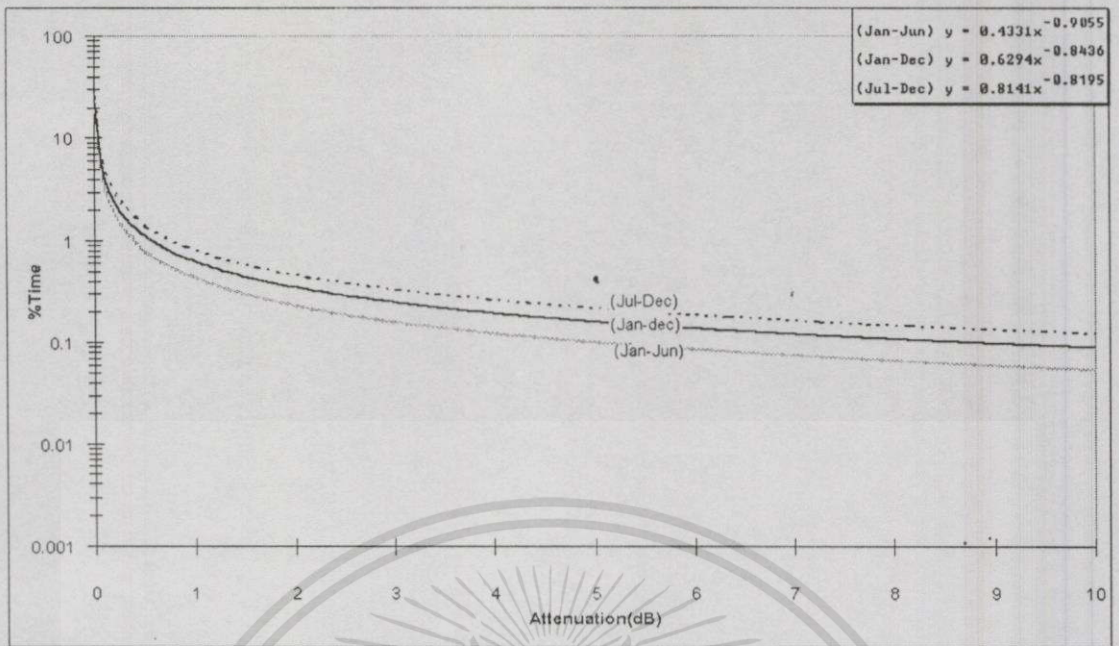
รูปที่ 5.9 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงเดือน กรกฎาคม, สิงหาคม, กันยายน, ตุลาคม, พฤศจิกายน, ธันวาคม

5.1.5 การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายครึ่งปีและรายปี

ตารางที่ 5.6 และ รูปที่ 5.10 เป็นค่าการแจกแจงสะสมอัตราการตกของฝนและค่าการแจกแจงสะสมการลดทอนของสัญญาณในช่วงครึ่งปีแรก(มกราคม-มิถุนายน), ครึ่งปีหลัง (กรกฎาคม-ธันวาคม), และรายปี (มกราคม-ธันวาคม) โดยในช่วงรายครึ่งปีหลังจะมีค่าแจกแจงสะสมการตกและการลดทอนมากกว่าในช่วงรายปี, รายครึ่งปีแรกตามลำดับ โดยมีเปอร์เซ็นต์การตกสะสมและการลดทอนสะสมในช่วงเวลาทั้งปีจะใกล้เคียงกับการลดทอนที่เกิดในช่วงรายครึ่งปีหลังและหากจะคิดที่ค่า Availability 99.9% ในช่วงรายครึ่งปีแรกต้องเผื่อค่าการลดทอนไว้ไม่น้อยกว่า 5 dB, มากกว่า 10 dB ในครึ่งปีหลังและ 9 dB ในช่วงเวลาทั้งปีเป็นต้น

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงรายปี (มกราคม ถึง ธันวาคม), รายครึ่งปีแรก (มกราคม ถึง มิถุนายน) และรายครึ่งปีหลัง (กรกฎาคม ถึง ธันวาคม)

Period	Rainrate (mm/h)									
Percent Time(%)	30	10	3	1	0.3	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
Jan-Dec	1.8	11	40	70	93	110	130	160	197	210
Jan-Jun	1.8	10	38	65	80	90	110	122	130	140
Jul-Dec	1.7	11	42	73	100	110	140	170	200	220



รูปที่ 5.10 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงรายปี (มกราคม ถึง ธันวาคม), รายครึ่งปีแรก (มกราคม ถึง มิถุนายน) และรายครึ่งปีหลัง (กรกฎาคม ถึง ธันวาคม)

5.2 ผลการทดลองที่มุม 60 องศา

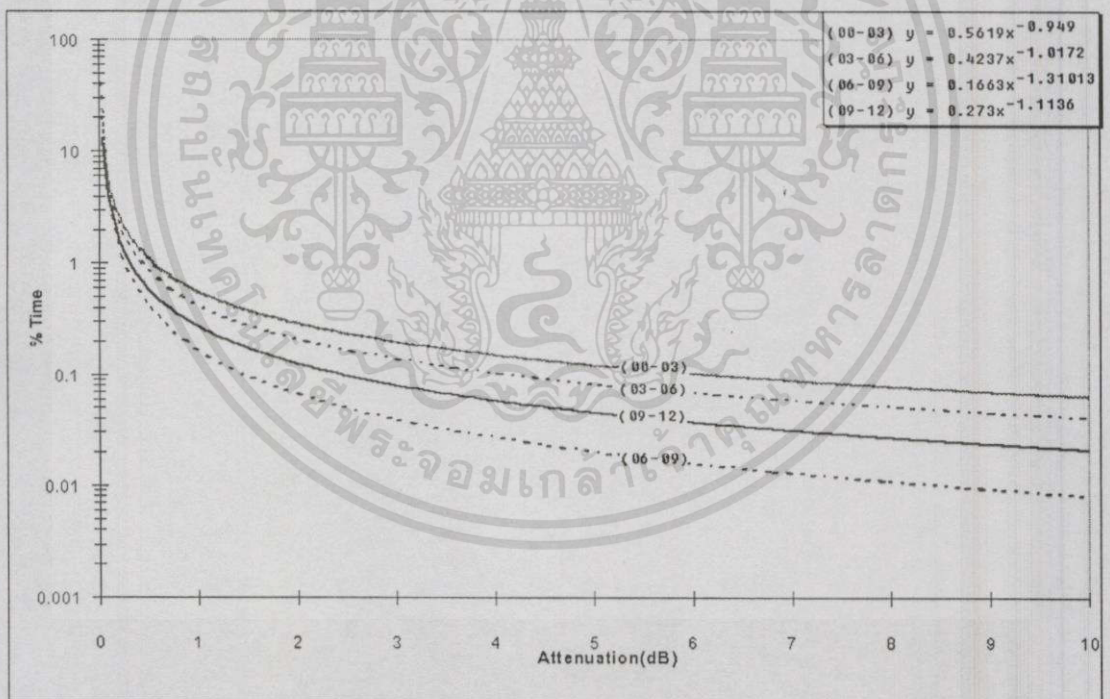
ข้อมูลที่มุม 60 องศาเริ่มทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2543 ถึงเมษายน 2544 รวมระยะเวลา 1 ปี การแจกแจงสะสมที่มุม 60 องศา แบ่งเป็นค่าการแจกแจงสะสมที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาต่างๆ ดังนี้

5.2.1 การแจกแจงสะสมที่เกิดในทุกๆ คาบเวลา 3 ชั่วโมง

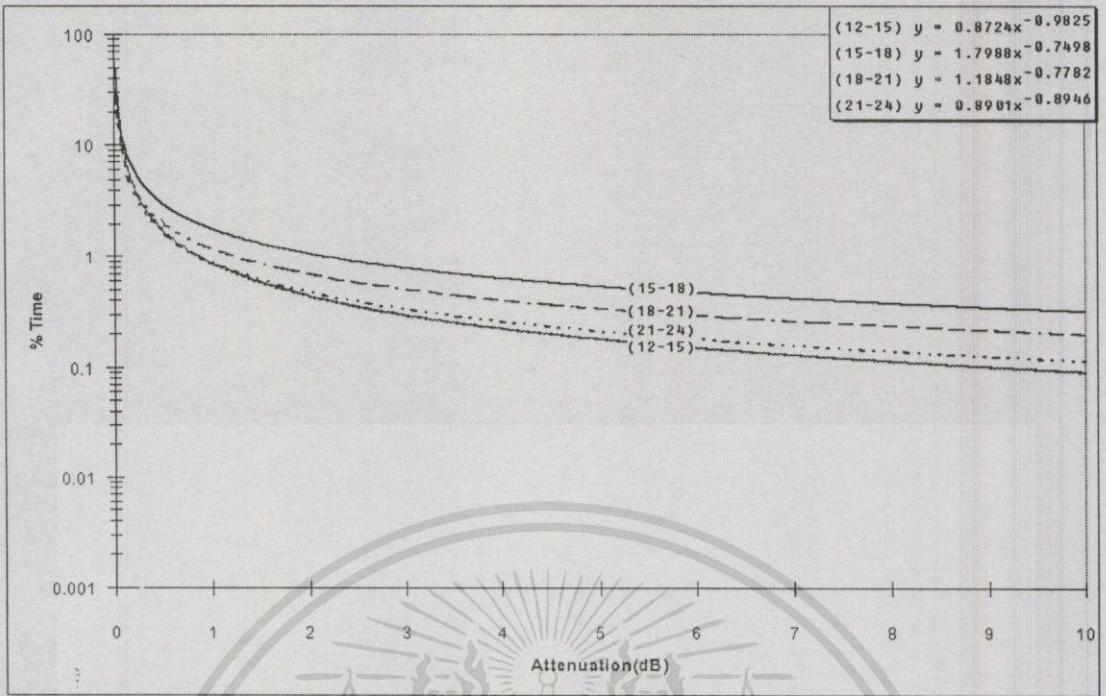
ค่าการแจกแจงสะสมอัตราการตกและค่าแจกแจงสะสมการลดทอนที่เกิดในทุกๆ เวลา 3 ชั่วโมง (00-03, 03-06, 06-09, 09-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-24) สามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 5.7 และรูปที่ 5.11, 5.12 ตามลำดับ พบว่าในกลุ่มช่วงเวลาดังแต่หลังเที่ยงวันจนถึงเที่ยงคืน (12-15, 15-18, 18-21, 21-24) มีเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมการตกและเปอร์เซ็นต์สะสมการลดทอนมากกว่าในกลุ่มช่วงเวลาดังแต่หลังเที่ยงคืนไปจนถึงเที่ยงวัน (00-03, 03-06, 06-09, 09-12) และโดยเฉพาะในช่วงเวลา 15-18 นาฬิกา มีเวลาสะสมการเกิดฝนและการลดทอนเกิดขึ้นมากกว่าช่วงเวลานั้นๆ และรองลงมาคือช่วงเวลา 18-21 นาฬิกา

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในคาบเวลา 00-03, 03-06, 06-09, 09-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-24

Period	Rainrate (mm/h)									
	30	10	3	1	0.3	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
00-03 LT.	<2.7	2.7	21	68	90	110	120	122	125	130
03-06 LT.	3	7.2	14	20	27	37	38	38	38	38
06-09 LT.	1	1.5	6	38	52	60	61	62	64	65
09-12 LT.	<6	6	60	82	110	120	150	150	150	150
12-15 LT.	3.8	25	50	80	100	135	180	190	195	208
15-18 LT.	7.3	37	67	89	108	140	185	200	210	230
18-21 LT.	1.3	10	53	100	120	145	170	190	200	200
21-24 LT.	1.7	4.6	20	55	80	104	120	130	135	140



รูปที่ 5.11 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 00-03, 03-06, 06-09, 09-12



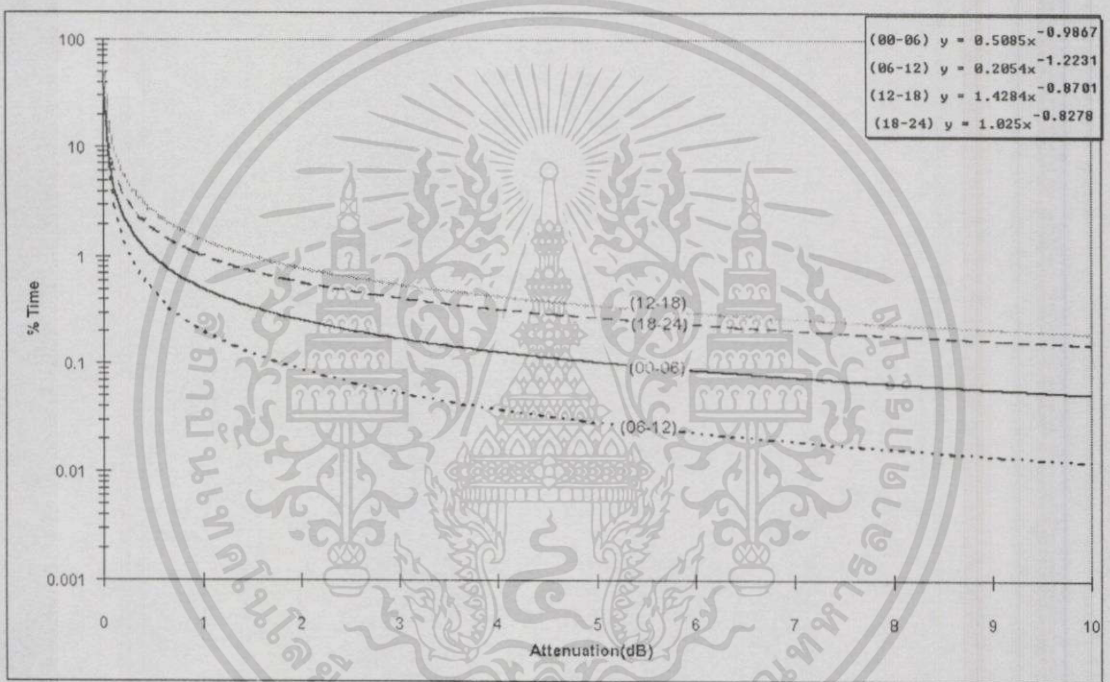
รูปที่ 5.12 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 12-15, 15-18, 18-21, 21-24

5.2.2 การแจกแจงสะสมที่เกิดขึ้นในทุกๆ คาบเวลา 6 ชั่วโมงและ 12 ชั่วโมง

ค่าการแจกแจงสะสมอัตราการตกและแจกแจงสะสมการลดทอนที่เกิดขึ้นในทุกๆ 6 ชั่วโมง (00-06, 06-12, 12-18, 18-24) สามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 5.8 และ รูปที่ 5.13 ตามลำดับ โอกาสของการเกิดฝนและการลดทอนในทุกๆ คาบเวลา 6 ชั่วโมง จะมีมากในช่วงเวลาบ่ายและค่ำ (12-18, 18-24) โดยเฉพาะในช่วงเวลา 12-18 นาฬิกา สำหรับตั้งแต่ช่วงเวลาที่เข้าไปจนถึงตอนเที่ยงวัน (06-12) มีฝนตกและการลดทอนไม่บ่อยนักเพียงแต่เพื่อค่าการลดทอนไว้ 1.8 dB ก็สามารถรักษาคุณภาพการให้บริการได้ตามเกณฑ์สากล ส่วนในตารางที่ 5.9 และรูปที่ 5.14 เป็นการแสดงค่าแจกแจงสะสมอัตราการตกและแจกแจงสะสมการลดทอนในทุกๆ 12 ชั่วโมง (00-12, 12-24) จะเห็นว่าตั้งแต่เที่ยงวันจนถึงเวลาเที่ยงคืน (12-24 นาฬิกา) เป็นช่วงที่มีฝนตกและการลดทอนเกิดขึ้นบ่อยกว่าในช่วงเวลาเที่ยงคืนถึงเที่ยงวันมาก (00-12 นาฬิกา) เช่นที่เปอร์เซ็นต์เวลาสะสม 0.1% มีการลดทอนในช่วงเวลา 00-12 นาฬิกาเพียง 3 dB แต่ในช่วงเวลา 12-24 นาฬิกามีการลดทอนมากกว่า 10 dB จะเห็นว่าทั้งสองช่วงเวลา ณ. เปอร์เซ็นต์อัตราการตกเดียวกันจะมีการลดทอนที่แตกต่างกันมาก

ตารางที่ 5.8 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในคาบเวลา 00-06, 06-12, 12-18, 18-24

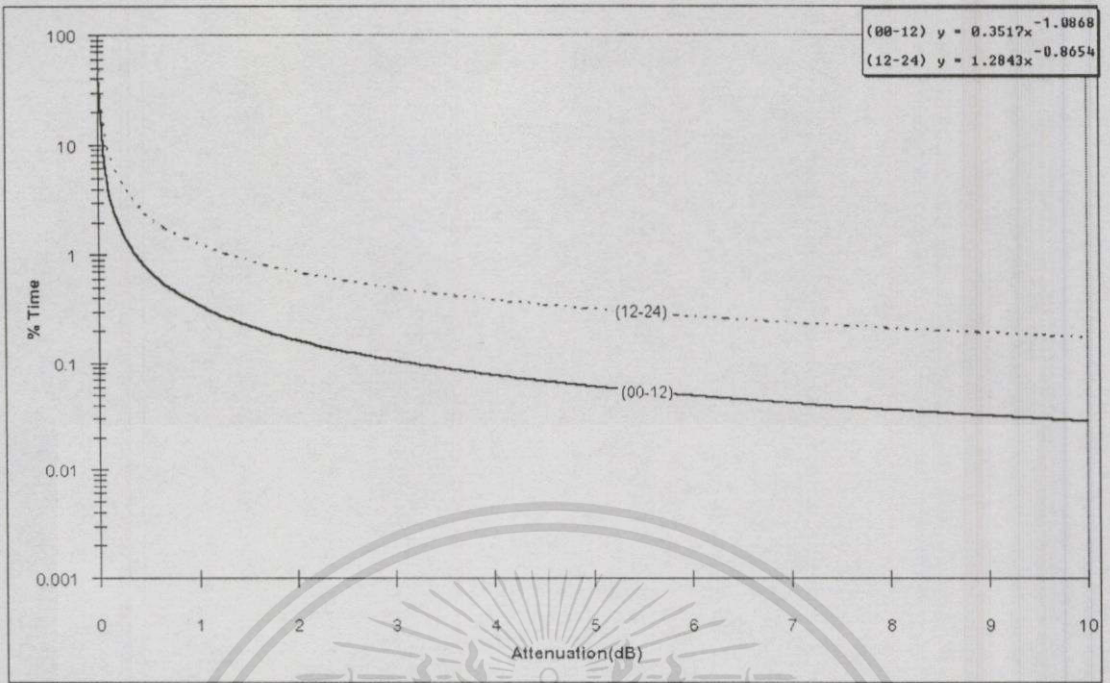
Period	Rainrate (mm/h)									
	30	10	3	1	0.3	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
00-06 LT.	1.1	6	20	50	85	100	118	122	134	138
06-12 LT.	<1	1	20	47	80	100	107	120	128	132
12-18 LT.	4.5	36	70	100	120	155	180	200	220	250
18-24 LT.	1.6	6	40	85	103	125	155	180	190	200



รูปที่ 5.13 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 00-06, 06-12, 12-18, 18-24

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในคาบเวลา 00-12, 12-24

Period	Rainrate (mm/h)									
	30	10	3	1	0.3	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
00-12 LT.	1	5.2	20	58	87	107	120	130	140	155
12-24 LT.	1.1	17	53	94	110	130	170	175	200	220



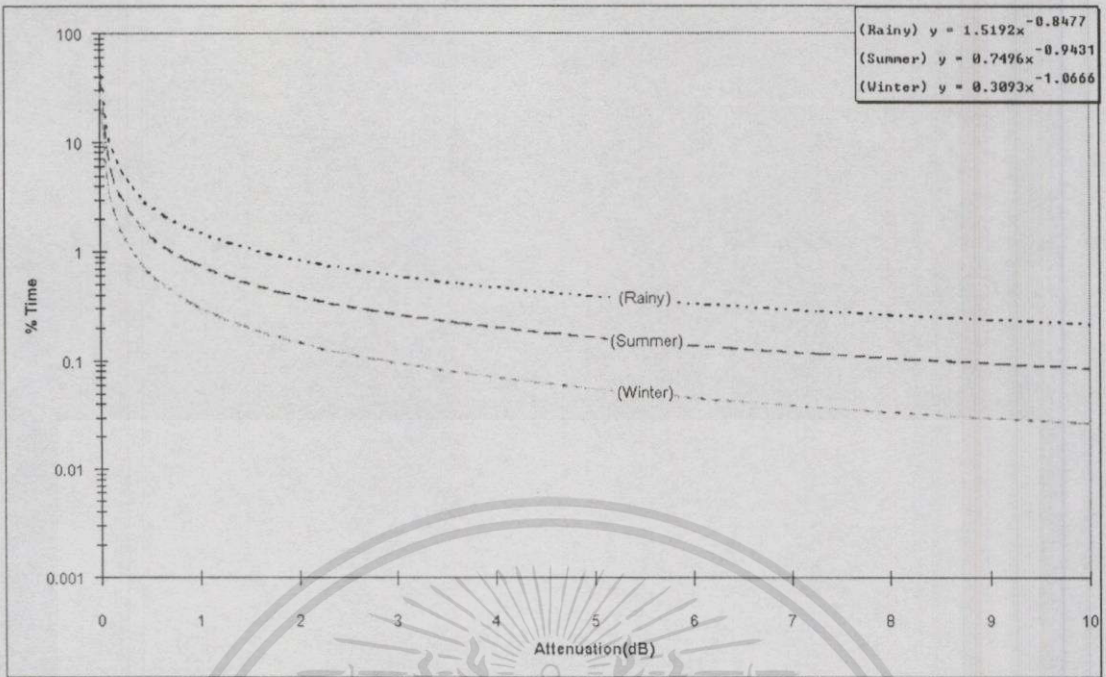
รูปที่ 5.14 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในคาบเวลา 00-12, 12-24

5.2.3 การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายฤดู

เปอร์เซ็นต์เวลาการตกสะสมที่เกิดช่วงฤดูฝนจะสูงกว่าช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาวตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5.10 ดังนั้นในการออกแบบระบบเพื่อชดเชยการลดทอนของสัญญาณที่ค่า Availability 99.9% ต้องเผื่อการลดทอนไว้ไม่น้อยกว่า 10 dB, 8.5 dB และ 2.8 dB ในฤดูฝน, ฤดูร้อนและฤดูหนาวตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.15

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงฤดูฝน ฤดูร้อน ฤดูหนาว

Period	Rainrate (mm/h)									
	30	10	3	1	0.3	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
Rainy	1.5	12	50	80	102	120	160	185	200	210
Summer	1.7	6.3	38	90	115	140	148	170	180	200
Winter	3.7	17	60	92	105	130	132	135	138	140



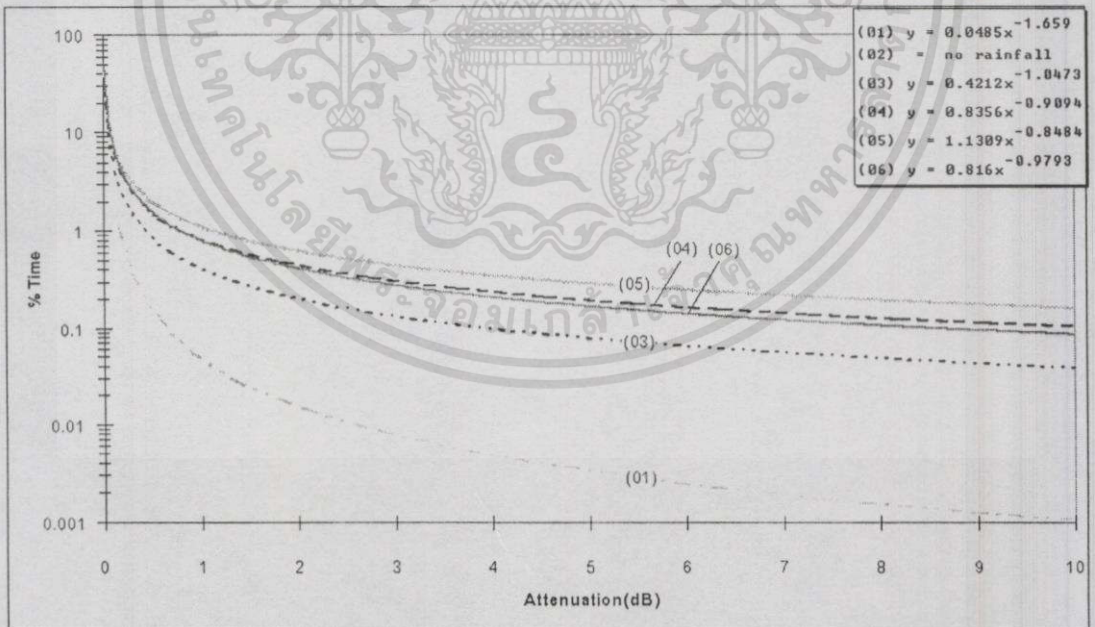
รูปที่ 5.15 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงฤดูฝน ฤดูร้อน ฤดูหนาว

5.2.4 การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายเดือน

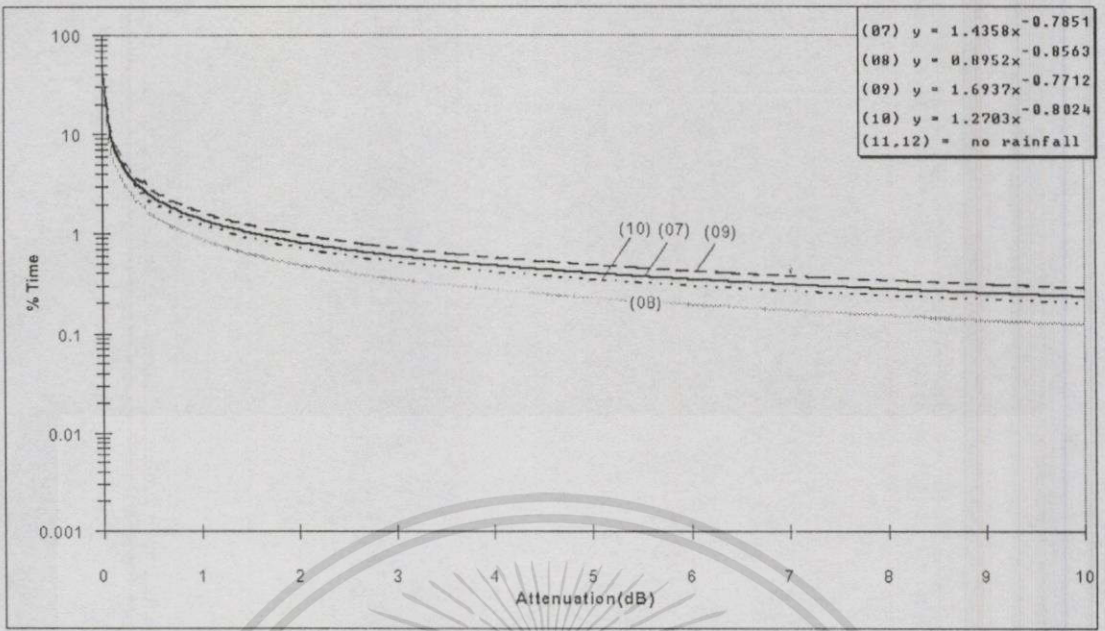
ในตารางที่ 5.11 เป็นการแสดงค่าแจกแจงสะสมอัตราการตกที่เกิดขึ้นในแต่ละเดือน (ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม) ในขณะที่เดือนกุมภาพันธ์, พฤษภาคม และ ธันวาคมเป็นช่วงเวลาที่ "ไม่มีการเกิดฝนและพบว่าในเดือนกันยายนเป็นช่วงที่มีฝนตกน้อยกว่าช่วงเดือนอื่นๆของรอบปีเดียวกันรองลงมาคือเดือนกรกฎาคมและตุลาคมตามลำดับ และเดือนมกราคมก็เป็นอีกเดือนหนึ่งที่มีฝนตกค่อนข้างน้อยมาก ส่วนในรูปที่ 5.16 และ รูปที่ 5.17 เป็นค่าการแจกแจงสะสมการลดทอนที่เกิดจากฝนในแต่ละเดือนโดยเฉพาะเดือนที่อยู่ในช่วงครึ่งปีหลังได้แก่ เดือนพฤษภาคม กรกฎาคม สิงหาคม กันยายน ตุลาคม เป็นช่วงที่มีเวลาการลดทอนสะสมสูงเกินกว่า 0.1% โดยเฉพาะในช่วงเดือนกันยายนซึ่งถือเป็นช่วงเวลาที่มีการลดทอนเกิดขึ้นน้อยกว่าเดือนอื่นๆหากจะคิดที่ค่า Availability 99.9 % จะต้องมีค่าการลดทอนไว้ไม่น้อยกว่า 10 dB

ตารางที่ 5.11 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงรายเดือน มกราคม ถึง ธันวาคม

Period	Rainrate (mm/h)									
	30	10	3	1	0.3	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
01 (Jan)	2	7	55	70	80	82	90	90	90	90
02 (Feb)	<----- no rainfall ----->									
03 (Mar)	<4	4	33	51	90	92	100	103	105	105
04 (Apr)	1.7	7	23	70	100	105	107	110	117	120
05 (May)	3	9	44	80	100	103	120	124	130	135
06 (Jun)	1	7	41	63	85	100	105	110	115	120
07 (Jul)	2.8	20	60	90	118	125	130	137	143	145
08 (Aug)	9	32	55	73	90	95	106	112	118	122
09 (Sep)	1	4	50	105	125	160	180	194	200	215
10 (Oct)	3.5	17	48	85	108	110	130	135	138	150
11 (Nov)	<----- no rainfall ----->									
12 (Dec)	<----- no rainfall ----->									



รูปที่ 5.16 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงเดือน มกราคม, กุมภาพันธ์, มีนาคม, เมษายน, พฤษภาคม, มิถุนายน



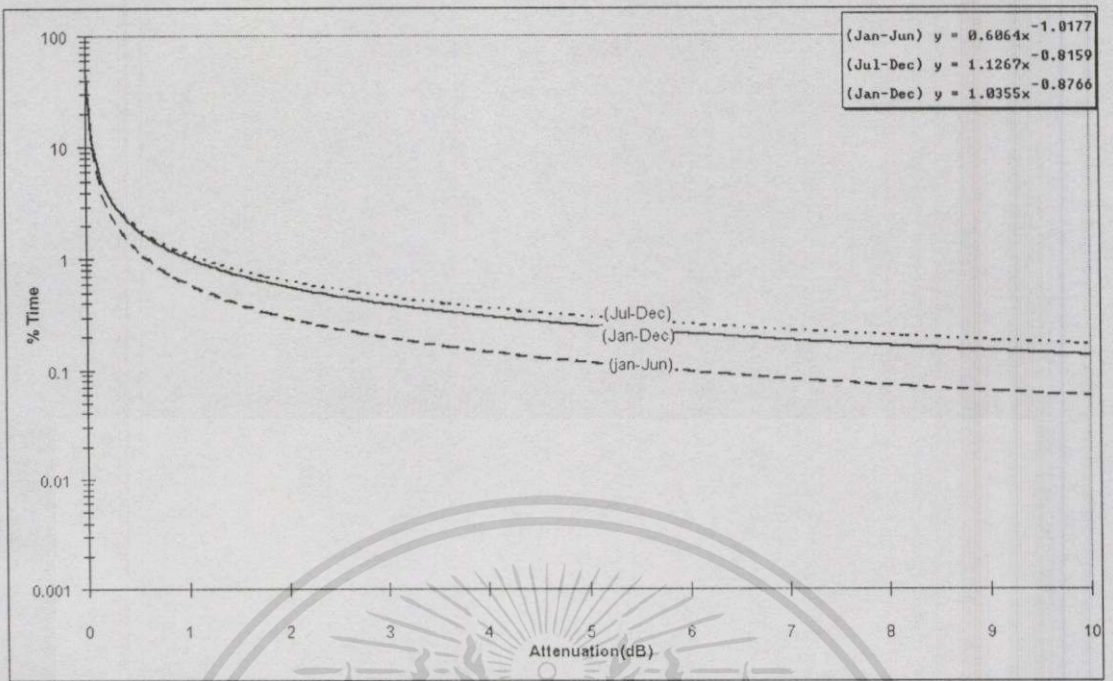
รูปที่ 5.17 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงเดือน กรกฎาคม, สิงหาคม, กันยายน, ตุลาคม, พฤศจิกายน, ธันวาคม

5.2.5 การแจกแจงสะสมที่เกิดขึ้นรายครึ่งปีและรายปี

ตารางที่ 5.12 และ รูปที่ 5.18 เป็นการแสดงค่าแจกแจงสะสมอัตราการตกของฝนและค่าการแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงครึ่งปีแรก (มกราคม ถึง มิถุนายน), ครึ่งปีหลัง (กรกฎาคม ถึง ธันวาคม), และรายปี (มกราคม ถึง ธันวาคม) โดยในช่วงครึ่งปีหลังจะมีเปอร์เซ็นต์สะสมการตกและเปอร์เซ็นต์สะสมการลดทอนสูงกว่าในช่วงรายปี, รายครึ่งปีแรกตามลำดับ ซึ่งในช่วงครึ่งปีหลังและช่วงรายปีจะมีเปอร์เซ็นต์การลดทอนสะสมที่ใกล้เคียงกันมากและหากคิดที่ค่า Availability 99.9% ในช่วงครึ่งปีหลังและช่วงเวลาทั้งปีต้องเผื่อค่าการลดทอนไว้ไม่น้อยกว่า 10 dB ขณะที่การลดทอนในช่วงรายครึ่งปีแรกจะต้องเผื่อค่าการลดทอนไว้ไม่น้อยกว่า 6 dB

ตารางที่ 5.12 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงรายปี (มกราคม ถึง ธันวาคม), รายครึ่งปีแรก (มกราคม ถึง มิถุนายน) และรายครึ่งปีหลัง (กรกฎาคม ถึง ธันวาคม)

Period	Rainrate (mm/h)									
Percent Time(%)	30	10	3	1	0.3	0.1	0.03	0.01	0.003	0.001
Jan-Dec	1.6	11	45	78	102	122	158	187	203	220
Jan-Jun	1.4	7	40	75	100	125	158	184	196	200
Jul-Dec	2.1	12	47	80	104	130	160	190	210	225



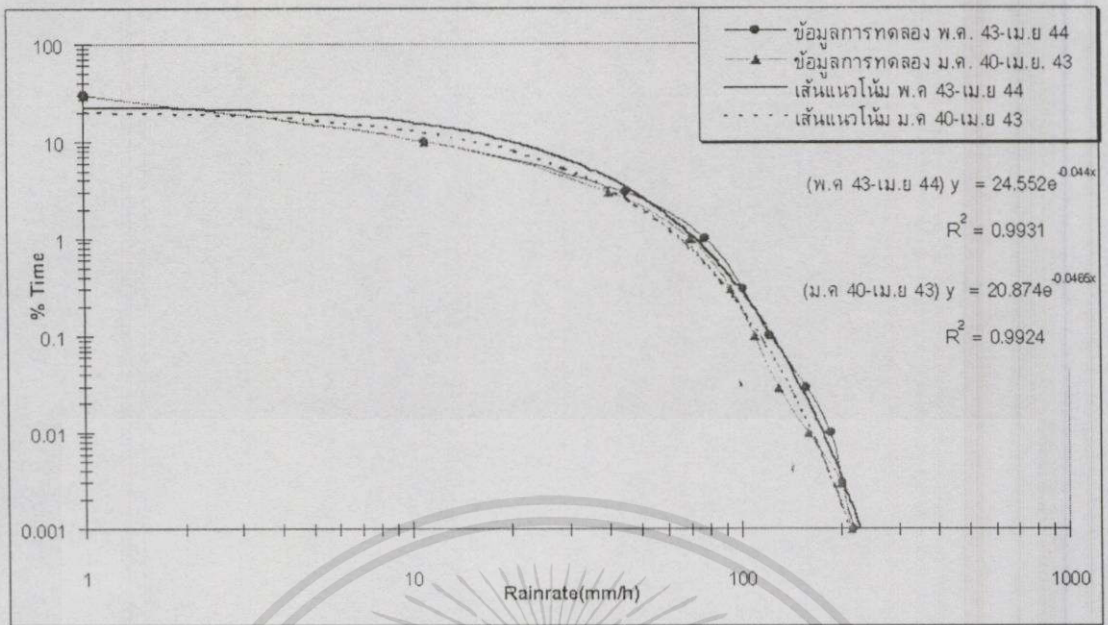
รูปที่ 5.18 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงรายปี (มกราคม ถึง ธันวาคม), รายครึ่งปีแรก (มกราคม ถึง มิถุนายน) และรายครึ่งปีหลัง (กรกฎาคม ถึง ธันวาคม)

5.3 ลักษณะการทดลองที่มุม 60 องศา กับ 90 องศา

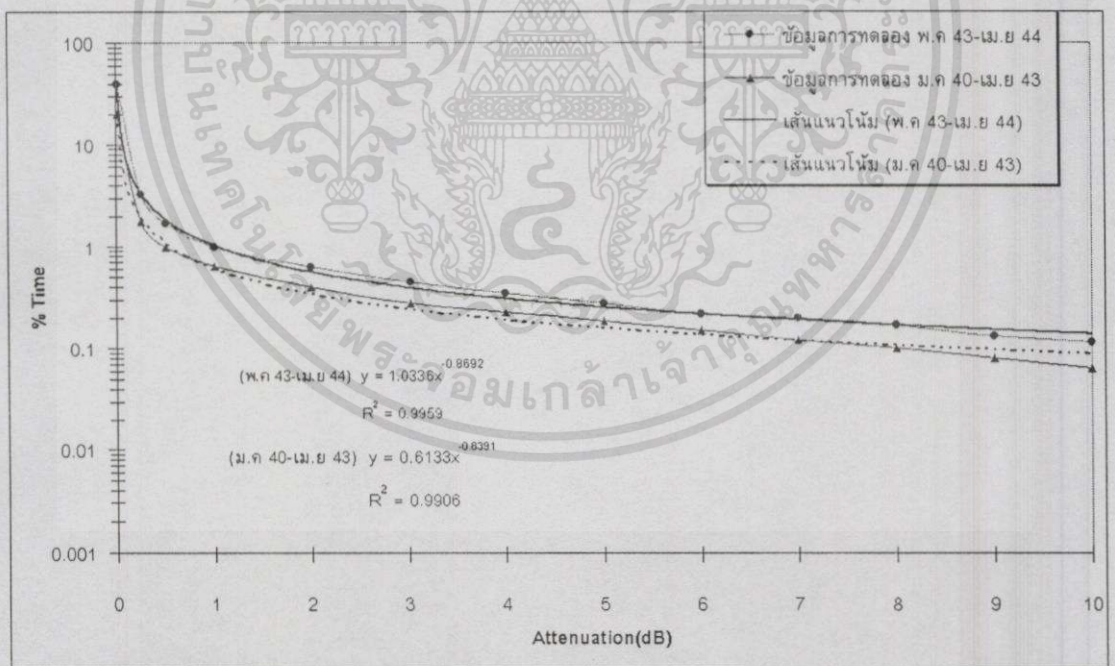
จะเป็นการนำเอาข้อมูลในช่วงรายปีระหว่างเดือนมกราคม 2540 ถึงเดือนเมษายน 2543 (ช่วงการทดลองที่มุม 90 องศา) กับ เดือนพฤษภาคม 2543 ถึง เดือนเมษายน 2544 (ช่วงการทดลองที่มุม 60 องศา) มาทำการหาเส้นแนวโน้มถดถอยสำหรับเป็นแนวทางในการทำงานการทดสอบและการลดทอนสะสม ตามรายละเอียดรูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 ตามลำดับพบว่า การแจกแจงสะสมการตกเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและการแจกแจงสะสมการลดทอนเป็นแบบเลขยกกำลัง นอกจากนั้นแล้วยังสามารถกำหนดเป็นสมการเพื่อใช้สำหรับการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์สะสมการตกและเปอร์เซ็นต์สะสมการลดทอนพร้อมสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (Correlation Coefficient: COR) ของทั้งสองช่วงเวลา ดังรายละเอียดในตารางที่ 5.13 จะเห็นว่าทั้งสองช่วงเวลามีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันมาก

สำหรับเหตุการณ์ในช่วงเวลาการแจกแจงสะสมการตกและการแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงเวลาอื่นๆนอกจกช่วงรายปีตามที่กล่าวข้างต้นสามารถพิจารณาได้ในทำนองเช่นเดียวกันนี้ แต่ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์อาจจะค่ามีความสัมพันธ์กันน้อยกว่าเหตุการณ์ในช่วงรายปี โดยเฉพาะในช่วงรายคาบ 3 ชั่วโมงเนื่องจากเหตุการณ์ที่เกิดในช่วงรายปีย่อมมีจำนวนครั้ง (Event) ของการฝนตกและการลดทอนมากกว่าเหตุการณ์ที่เกิดในรายคาบ 3 ชั่วโมงหรือ 6 ชั่วโมงเป็นต้น (ตามที่เคยกล่าวมาแล้วว่ายังมีข้อมูลที่ใช้สำหรับการประมวลผลมากย่อมจะทำให้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 แสดงค่าแจกแจงสะสมการตกในช่วงรายปีที่อยู่ในช่วงเดือน มกราคม 2540 ถึง เดือนเมษายน 2543 และเดือนพฤษภาคม 2543 ถึง เดือนเมษายน 2544



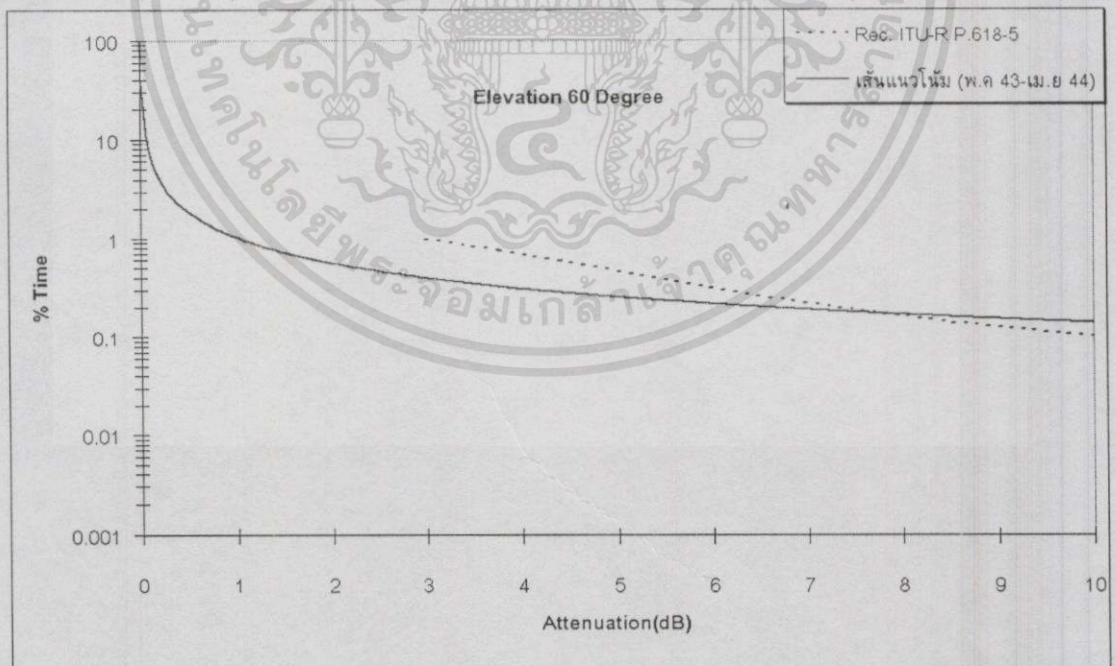
รูปที่ 5.20 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในช่วงรายปีที่นุ่ม 90 องศา (เดือนมกราคม 2540 ถึง เดือนเมษายน 2543) และนุ่ม 60 องศา (เดือนพฤษภาคม 2543 ถึง เดือนเมษายน 2544)

ตารางที่ 5.13 แสดงสมการเปอร์เซ็นต์สะสมการตกและการลดทอนที่เกิดในช่วงรายปี

Detail	Elevation 90 Degree	Elevation 60 Degree
% Time (Rainrate)	$20.874 e^{-(0.0465 \times \text{Rainrate})}$	$24.552 e^{-(0.044 \times \text{Rainrate})}$
COR.		0.99293
% Time (Attenuation)	$0.6133 \times (\text{Attenuation})^{-0.8391}$	$1.0336 \times (\text{Attenuation})^{-0.8692}$
COR.		0.99996

5.4 ลักษณะการทดลองที่มุม 60 องศา กับผลของ ITU-Model

ในรูปที่ 5.21 เป็นการแสดงถึงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนในอัตราการตกของฝนเดียวกันที่มุม 60 องศา จากผลการทดลองในช่วงเดือนพฤษภาคม 2543 ถึง เมษายน 2544 กับผลการศึกษาของ ITU-Model ในช่วงการลดทอน 10 dB จะเห็นว่าจากผลการทดลองที่การลดทอนเท่ากับ 7.5 dB นั้นมีเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมเกิดขึ้นประมาณ 0.17 % เท่ากับผลการศึกษาของ ITU-Model ส่วนที่การลดทอน 3 dB ถึง 7.5 dB ผลการศึกษาของ ITU-Model มีเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมเกิดขึ้นนานกว่าผลที่ได้จากผลการทดลองเล็กน้อย ในขณะที่การลดทอน 7.5 dB ถึง 10 dB ผลการศึกษาของ ITU-Model มีเปอร์เซ็นต์เวลาสะสมเกิดขึ้นใกล้เคียงกับผลของการทดลอง



รูปที่ 5.21 แสดงค่าแจกแจงสะสมการลดทอนที่มุม 60 องศา (เดือนพฤษภาคม 2543 ถึง เดือนเมษายน 2544) เปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ ITU-Model

บทที่ 6

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลวิจัย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ผ่านมาทั้งหมดจะเห็นว่าจากข้อมูลการแจกแจงสะสมการตกของฝนจะสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่าการแจกแจงสะสมการลดทอนคือเมื่อมีฝนตกมากค่าการลดทอนจะมากแต่เมื่อฝนตกน้อยการลดทอนที่เกิดขึ้นจะน้อยตามไปด้วยเช่นกัน ซึ่งสิ่งนี้คือสิ่งที่ยืนยันให้ทราบว่าที่ความถี่ในย่าน Ku-band ฝนคือสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการศึกษาทดลองนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบระบบการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุโทรทัศนผ่านดาวเทียม (Broadcasting Satellite) หรือจะเป็นการส่งสัญญาณแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point) โดยเฉพาะระบบเครือข่ายเชื่อมโยง (Link) ที่มีขนาดความเร็วสูงมากๆ เมื่อการออกแบบการชดเชยสัญญาณการลดทอนไม่ถูกต้องจนทำให้เครือข่ายไม่สามารถทำงานได้ตามมาตรฐานแม้จะเป็นเพียงช่วงเวลาสั้นๆก็ตาม แต่สำหรับข้อมูลที่มีการรับ-ส่งกันด้วยความเร็วสูงๆ (High Speed Data) แล้วช่วงเวลาเพียงสั้นๆจะทำให้ข้อมูล (Data) มีการขาดหายไปเป็นจำนวนมาก หากข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญสูงก็ย่อมจะส่งผลให้เกิดความเสียหายเป็นทวีคูณตามมา หรือในบางระบบอาจจะมีการออกแบบให้มีการส่งข้อมูลซ้ำได้เพื่อชดเชยข้อมูลในช่วงที่มีการสูญหายก็ตาม แต่นั่นก็หมายความว่า การรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วที่ควรจะเป็นกลับจะต้องมีความล่าช้าเกิดขึ้นเป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่เราจะต้องทราบค่าการลดทอนที่เกิดจากฝนในแต่ละช่วงเวลาเพื่อจะได้เป็นข้อมูลในการป้องกันและชดเชยสัญญาณที่จะถูกลดทอนหรือสูญหายไปในขณะที่ฝนตกในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างถูกต้อง

ดังนั้น ITU จึงได้กำหนดค่ามาตรฐานขึ้นมาค่าหนึ่งเพื่อเป็นการประกันคุณภาพของระบบเครือข่ายสำหรับการให้บริการ ด้วยเหตุนี้เราจึงต้องทราบข้อมูลสถิติการลดทอนในช่วงเวลาต่างๆ เนื่องมาจากการออกแบบระบบสื่อสารให้ได้คุณภาพที่อยู่ในมาตรฐานกำหนดนั้นจะอย่างไรถึงจะเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด โดยเฉพาะการให้บริการสื่อสารผ่านดาวเทียมระบบ DBS (Direct Broadcast Satellite) ผู้ออกแบบหรือผู้ที่ประกอบกิจการด้านการให้บริการหรือองค์กรต่างๆ จะต้องเป็นผู้พิจารณาว่าจะให้ความสำคัญกับกลุ่มเป้าหมายหรือกลุ่มผู้ใช้บริการมากเป็นพิเศษในช่วงเวลาใด ยกตัวอย่างเช่นข้อมูลสถิติการลดทอนที่เกิดในแต่ละวันพบว่ามีการลดทอนเกิดขึ้นบ่อยในช่วงเวลาบ่ายถึงค่ำและกินเวลานาน หรือการลดทอนที่เกิดในรายฤดูพบว่าค่าการลดทอนจะเกิดขึ้นบ่อยในช่วงฤดูฝนซึ่งอยู่ในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมส่วนในช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาวการลดทอนเกิดขึ้นไม่บ่อย จึงทำให้ค่าการแจกแจงสะสมการลดทอนที่เกิดในฤดูฝนมากกว่าฤดูร้อนและฤดูหนาว ดังนั้นผู้ออกแบบก็ไม่จำเป็นจะต้องเผื่อการชดเชยสัญญาณ (System margin) ไว้มากใน

ช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาว หรือหากจะมองถึงข้อมูลสถิติในช่วงรายครึ่งปีก็ในทำนองเดียวกันถ้าจะให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยก็ไม่จำเป็นจะต้องเผื่อค่าการชดเชยสัญญาณไว้มากในช่วงครึ่งปีแรก ซึ่งการเผื่อค่าการชดเชยสัญญาณไว้น้อยเท่าไรก็หมายความว่าค่าใช้จ่ายย่อมจะน้อยตามไปด้วยเช่นกัน

6.2 ข้อเสนอแนะและอุปสรรค

จากผลการศึกษาโดย ITU-Model ที่มีอยู่ในขณะนี้ เป็นข้อมูลที่หายากเกินไปเนื่องจากเราไม่สามารถทราบถึงค่าการแจกแจงการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่วงรายคาบเวลาอื่น ๆ นอกจากคาบเวลารายปี ซึ่งจะมีผลให้การออกแบบระบบการชดเชยการลดทอนของสัญญาณได้ไม่ถูกต้องเท่าที่ควร ตามการเปลี่ยนแปลงการตกของฝนในช่วงเวลาต่างๆ เช่นในช่วงรายฤดู รายเดือน รายชั่วโมง เป็นต้น และผลการทดลองในครั้งนี้จะเป็นอีกข้อมูลหนึ่งที่สามารถนำไปพิจารณาประกอบการศึกษาออกแบบระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมในเรื่องการลดทอนที่เกิดจากฝนย่านความถี่ Ku-band ในเขตภาคกลางของประเทศไทย เพื่อจะได้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบชดเชยการสูญหายของสัญญาณได้ถูกต้องตามช่วงเวลาการตกของฝน โดยจะพิจารณาค่าแจกแจงสะสมที่เกิดขึ้นในช่วงทุก ๆ คาบเวลาต่าง ๆ ดังนี้

1. คาบเวลาราย 3 ชั่วโมง
2. คาบเวลาราย 6 ชั่วโมงและ 12 ชั่วโมง
3. คาบเวลารายฤดู
4. คาบเวลารายเดือน
5. คาบเวลารายครึ่งปีและรายปี

การวิเคราะห์ข้อมูลในเชิงสถิติอาจจะมีผลผิดพลาดขึ้นได้เสมอหากข้อมูลที่นำมาทำการวิเคราะห์ไม่มากพอ ดังนั้นจากข้อมูลการทดลองในครั้งนี้จึงเป็นที่แน่ชัดว่าที่มุม 60 องศาจะมีความผิดพลาดขึ้นได้มากกว่าที่มุม 90 องศา และเมื่อพิจารณาในรายละเอียดย่อยลงไปอีกก็จะทราบว่าความผิดพลาดจะมีมากที่การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายคาบ 3 ชั่วโมง, การแจกแจงสะสมรายคาบ 6 ชั่วโมง, การแจกแจงสะสมรายคาบ 12 ชั่วโมง, การแจกแจงสะสมที่เกิดในรายเดือน, การแจกแจงสะสมรายฤดู, การแจกแจงสะสมรายครึ่งปีตามลำดับ โดยเฉพาะมุม 60 องศาที่การแจกแจงสะสมในรายคาบ 3 ชั่วโมงบางช่วงเวลามีฝนตกเพียงครั้งเดียว (1 Event) จึงเป็นเหตุให้ได้ข้อมูลเพื่อนำมาทำการวิเคราะห์น้อยมาก หากข้อมูลที่นำมาทำการวิเคราะห์มีระยะเวลาในการเก็บข้อมูลที่ยาวนานพอสมควรจะทำให้ได้การวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความแม่นยำมากกว่านี้

และการจะเปรียบเทียบหาความแตกต่างของการลดทอนที่มุมต่าง ๆ กันนั้นควรจะต้องมีเครื่องมือวัดหลายๆ ชุดสำหรับการเก็บข้อมูลรวมทั้งต้องวางเครื่องวัดไว้ในตำแหน่งและทำการวัดเก็บข้อมูลในเวลาเดียวกันด้วยถึงจะสามารถบอกได้ว่าที่การลดทอนในมุมต่าง ๆ นั้นมีการลดทอนมากน้อยต่างกันอย่างไร

สำหรับในประเทศไทยความถี่ในย่าน Ku-band จะถูกลดทอนค่อนข้างมากและกินเวลานาน แต่เนื่องจากอุปกรณ์ Radiometer ที่ใช้ในการศึกษามีพิสัยในการวัดค่าการลดทอนไม่เกิน 10 dB ทำให้การศึกษาลดทอนสัญญาณที่มากกว่า 10 dB ไม่สามารถทำได้ อีกทั้งการวัดการลดทอนของสัญญาณด้วยอุปกรณ์ Radiometer อาจเกิดความผิดพลาดได้มากที่การลดทอนสูง ๆ (6 ถึง 10 dB) ดังนั้นการใช้วิธีวัดแบบ Radiometer ร่วมกับเครื่องรับดาวเทียมนำร่องจะให้การวิเคราะห์การลดทอนเนื่องจากฝนที่ระดับการลดทอนสูง ๆ ได้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. R. Lekkla, P. Prapinmongkolkarn, P. Hetrakul, and K.S. McCormick "Results of 92-94 Ku-band site diversity experiment at low elevation angle in Thailand." Proceeding of 2nd Asia-Pacific Conference on Communications, Osaka, Japan, 1995. pp. 720-725.
2. รัชชัย พฤกษ์วัน. ฝน. กรุงเทพฯ : กรมอุตุนิยมวิทยา. 2534
3. จงกลณี อยู่สบาย. พายุฟ้าคะนองในประเทศไทย. กรุงเทพฯ : กรมอุตุนิยมวิทยา. 2536
4. วิไลลักษณ์ ตั้งเจริญ. อุตุนิยมวิทยา. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์พิทยวีสุทธ. 2540
5. J.E. Allnutt. Satellite-to-Ground Radiowave Propagation. London United Kingdom : Peter Peregrinus Ltd. 1989
6. Recommendations 838. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. 1997
7. Recommendations ITU-R PN.837-1. Characteristics of precipitation for propagation modelling. 1997
8. Recommendations ITU-R P.618-5. Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication system. 1997
9. R. Lekkla, P. Prapinmongkolkarn, and K.S. McCormick. "Analysis of rain intensity Asia over 3-years." Proceeding of URSI Commission F Open Symposium on Climatic Parameters in Radiowave Propagation Prediction. Ottawa, Canada, 1998. pp. 223-226.
10. Pratt, Timothy. Satellite communications. United State of America : John Wiley & Sons, Inc. 1986.
11. N. Skou. Microwave radiometer System. United State of America : Artech hour, Inc. 1989
12. Diversitel Communication Inc. Propagation measurement system [Data Book]. 1991
13. สมพงษ์ เหลืออมแก้ว. "การทำนายการลดทอนสัญญาณย่านเคยูแบนด์เนื่องจากฝนระหว่าง พื้นดินกับดาวเทียมที่มุมเงยต่ำแบบจำลองฝน 2 เซล." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2542.

คาบภายในปี

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : RAINRATE (MM/H)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Percent Time(%)	01/01/97-31/12/97	01/05/99-30/04/00
30	1.5	2
10	9	11
3	40	43
1	74	70
0.3	100	90
0.1	120	102
0.03	160	120
0.01	200	150
0.003	210	160
0.001	210	165



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาบภายใน

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : ATTENUATION (DB)

PERIOD (DIM/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Period	Percent Time(%)											
	0.01 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	4 dB	5 dB	6 dB	7 dB	8 dB	9 dB	10 dB
01/01/97-31/12/97	16	0.7	0.42	0.27	0.2	0.17	0.12	0.11	0.1	0.085	0.07	0.06
01/05/99-30/04/00	22	1.6	0.9	0.6	0.41	0.33	0.27	0.21	0.16	0.12	0.09	0.065

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : RAINRATE (MM/H)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Percent Time(%)	01/01/97-30/06/97	01/07/97-31/12/97	01/05/99-30/04/00	01/07/99-31/12/99
30	1.8	1.5	1.9	1.9
10	9	11	10	11
3	25	48	40	40
1	43	80	70	70
0.3	68	102	90	90
0.1	76	125	100	100
0.03	100	170	120	118
0.01	105	200	125	130
0.003	120	210	134	142
0.001	120	240	140	155
	ครึ่งปีแรก	ครึ่งปีหลัง	ครึ่งปีแรก	ครึ่งปีหลัง

หมายเหตุ

01/05/99-30/04/00 ปรากฏฝนช่วงช่วงเวลา 01/05/99-30/06/99 และ 01/01/00-30/04/00

คาบรายครึ่งปี

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : ATTENUATION (DB)

PERIOD (DIM/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Period	Percent Time(%)											
	0.015 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	4 dB	5 dB	6 dB	7 dB	8 dB	9 dB	10 dB
01/01/97-30/06/97	10	0.4	0.22	0.13	0.09	0.07	0.055	0.05	0.042	0.04	0.038	0.032
01/07/97-31/12/97	18	1.3	0.78	0.5	0.39	0.3	0.27	0.21	0.19	0.16	0.12	0.1
01/05/99-30/04/00	22	1.2	0.8	0.43	0.37	0.28	0.21	0.15	0.12	0.1	0.08	0.068
01/07/99-31/12/99	21	1.4	1	0.6	0.41	0.34	0.26	0.22	0.16	0.11	0.09	0.07

หมายเหตุ

01/05/99-30/04/00 ประกอบด้วยช่วงเวลา 01/05/99-30/06/99 และ 01/01/00-30/04/00

ELEVATION 90 DEGREE

คาบรายฤดู

BANGKOK : RAINRATE(M M/H)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Percent Time(%)	15/02/97-14/05/97	15/05/97-14/10/97	15/10/97-14/02/97	01/05/99-30/04/00	15/05/99-14/10/99	15/10/99-14/02/00
30	2.7	3	20	1.3	2	1.6
10	12	9	43	4.6	14	4
3	28	45	60	28	47	20
1	48	80	70	51	75	40
0.3	84	108	73	75	92	60
0.1	100	117	80	88	104	70
0.03	106	160	82	100	126	95
0.01	117	200	82	102	140	100
0.003	120	210	82	104	150	110
0.001	120	230	82	104	160	120

ฤดูร้อน(15/02-14/05)

ฤดูฝน(15/05-14/10)

ฤดูร้อน(15/10-14/02)

ฤดูฝน(15/05-14/10)

ฤดูหนาว(15/10-14/02)

หมายเหตุ

15/10/97-14/02/97 ประกอบด้วยช่วงเวลา 01/01/97-14/02/97 และ 15/10/97-31/12/97

01/05/99-30/04/00 ประกอบด้วยช่วงเวลา 01/05/99-14/05/99 และ 15/02/00-30/04/00

15/10/99-14/02/00 ประกอบด้วยช่วงเวลา 15/10/99-31/12/99 และ 01/01/00-14/02/00

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : ATTENUATION (DB)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/10/00-30/04/00

Period	Percent Time (%)											
	0.015 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	4 dB	5 dB	6 dB	7 dB	8 dB	9 dB	10 dB
15/02/97-14/06/97	9	0.45	0.27	0.18	0.08	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.008	0.0075
15/05/97-14/10/97	18	1.1	0.7	0.4	0.35	0.31	0.28	0.25	0.22	0.2	0.17	0.15
15/10/97-14/02/97	20	0.45	0.26	0.11	0.07	0.06	0.05	0.037	0.025	0.014	0.007	0.004
01/05/99-30/04/00	25	0.7	0.4	0.2	0.15	0.11	0.08	0.06	0.042	0.021	0.012	0.005
15/05/99-14/10/99	22	1.9	1.1	0.75	0.54	0.4	0.32	0.28	0.21	0.15	0.12	0.09
15/10/99-14/02/00	21	1	0.4	0.2	0.12	0.1	0.08	0.06	0.04	0.025	0.014	0.007

หมายเหตุ

15/10/97-14/02/97 ประกอบด้วยช่วงเวลา 01/01/97-14/02/97 และ 15/10/97-31/12/97

01/05/99-30/04/00 ประกอบด้วยช่วงเวลา 01/05/99-14/05/99 และ 15/02/00-30/04/00

15/10/99-14/02/00 ประกอบด้วยช่วงเวลา 15/10/99-31/12/99 และ 01/01/00-14/02/00

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : RAINRATE (MM/H)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Percent Time(%)	01/97	02/97	03/97	04/97	05/97	06/97	07/97	08/97	09/97	10/97	11/97	12/97
30	^	3	1.7	3	1.5	1	-	1.1	2	2.1	22	^
10		10	7	17	4	14	5	7	20	24	44	
3		17	11	35	11	32	40	50	50	67	60	
1		28	14	59	20	50	83	80	90	95	70	
0.3		40	16	90	28	70	100	102	170	130	74	
0.1		52	16	110	32	78	138	126	175	170	78	
0.03		70	16	105	32	80	165	130	196	180	80	
0.01		70	16	140	32	82	170	138	230	185	80	
0.003		70	16	145	32	83	200	140	250	195	80	
0.001		70	16	145	32	83	210	150	270	200	81	

ตามรายละเอียด (ต่อ)

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : RAINRATE (MM/H)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Percent Time(%)	05/99	06/99	07/99	08/99	09/99	10/99	11/99	12/99	01/00	02/00	03/00	04/00
30	0.8	1.2	1.3	1.8	1.7	1	1.3	no rainfall	no rainfall	no rainfall	Loss of data	2.2
10	12	8	9	18	10.5	6.4	4	no rainfall	no rainfall	no rainfall	no rainfall	13
3	40	44	40	50	40	40	6.7	no rainfall	no rainfall	no rainfall	no rainfall	60
1	64	74	60	73	73	70	40	no rainfall	no rainfall	no rainfall	no rainfall	82
0.3	83	90	80	90	90	92	47	no rainfall	no rainfall	no rainfall	no rainfall	90
0.1	91	108	85	100	110	103	50	no rainfall	no rainfall	no rainfall	no rainfall	100
0.03	100	115	92	105	125	107	70	no rainfall	no rainfall	no rainfall	no rainfall	102
0.01	115	120	104	107	130	110	78	no rainfall	no rainfall	no rainfall	no rainfall	105
0.003	115	124	106	120	150	112	80	no rainfall	no rainfall	no rainfall	no rainfall	107
0.001	115	130	107	120	160	118	80	no rainfall	no rainfall	no rainfall	no rainfall	107

ค่าปรายเทียบ

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : ATTENUATION (DB)

PERIOD (D/M/Y) : 01/10/197-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/10/00-30/04/00

Period	Percent Time(%)											
	0.01 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	4 dB	5 dB	6 dB	7 dB	8 dB	9 dB	10 dB
01/97	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
02/97	10	0.21	0.11	0.09	0.052	0.023	0.009	0.0014	-	-	-	-
03/97	10	0.24	0.06	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-
04/97	10	0.9	0.5	0.27	0.14	0.11	0.08	0.06	0.036	0.028	0.022	0.018
05/97	10	0.8	0.21	0.008	-	-	-	-	-	-	-	-
06/97	10	0.5	0.3	0.2	0.15	0.09	0.06	0.04	0.035	0.03	0.02	0.01
07/97	20	0.45	0.3	0.2	0.14	0.11	0.085	0.07	0.06	0.055	0.047	0.04
08/97	17	1	0.55	0.32	0.3	0.25	0.2	0.18	0.16	0.12	0.09	0.07
09/97	23	2.9	1.6	1.1	0.8	0.65	0.6	0.5	0.42	0.4	0.35	0.29
10/97	27	3	1.7	1.3	1	0.7	0.4	0.33	0.3	0.29	0.2	0.18
11/97	5	0.3	0.2	0.09	0.06	0.05	0.04	0.023	0.018	0.009	0.001	-
12/97	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จําบรายเตียน (ตอ)

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : ATTENUATION (DB)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Period	Percent Time(%)											
	0.015 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	4 dB	5 dB	6 dB	7 dB	8 dB	9 dB	10 dB
05/99	21	1.8	0.9	0.55	0.4	0.3	0.22	0.16	0.13	0.09	0.07	0.05
06/99	20	1.4	0.8	0.5	0.4	0.31	0.25	0.2	0.16	0.13	0.11	0.09
07/99	21	1	0.65	0.42	0.3	0.22	0.2	0.14	0.11	0.08	0.06	0.05
08/99	23	2	1.1	0.7	0.6	0.38	0.31	0.3	0.24	0.19	0.13	0.1
09/99	30	2	1.7	1	0.8	0.7	0.55	0.45	0.31	0.22	0.17	0.13
10/99	30	2.7	1.2	0.77	0.6	0.42	0.34	0.28	0.19	0.11	0.07	0.05
11/99	20	0.6	0.3	0.2	0.17	0.12	0.11	0.1	0.08	0.041	0.03	0.013
12/99	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
01/00	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
02/00	57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
03/00	40	3	1.7	0.6	0.53	0.43	0.38	0.3	0.21	0.15	0.13	0.1
04/00												

← Loss of data →

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : RAINRATE (MM/H)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Percent Time(%)	00-12hr/97	12-24hr/97	00-12hr/99/00	12-24hr/99/00
30	1	1.3	1.7	2.2
10	5	8.5	5.6	15
3	22	40	35	43
1	64	70	62	64
0.3	90	90	90	92
0.1	110	102	107	102
0.03	120	120	140	110
0.01	130	160	150	120
0.003	130	165	152	125
0.001	130	200	165	130



ศป.ภายใน 12 ชั่วโมง

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : ATTENUATION (DB)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/10/00-30/04/00

Period	Percent Time(%)											
	0.015 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	4 dB	5 dB	6 dB	7 dB	8 dB	9 dB	10 dB
00-12hr/97	15	0.23	0.12	0.08	0.05	0.04	0.03	0.024	0.021	0.017	0.014	0.013
12-24hr/97	13	0.85	0.5	0.28	0.2	0.14	0.11	0.09	0.07	0.054	0.038	0.03
00-12hr/99/00	24	1	0.6	0.4	0.3	0.23	0.19	0.14	0.1	0.08	0.05	0.038
12-24hr/99/00	23	2	1.3	0.8	0.6	0.43	0.37	0.3	0.21	0.16	0.12	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาบภายใน 6 ชั่วโมง

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : RAINRATE (MM/H)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Percent Time(%)	00-06hr/97	06-12hr/97	12-18hr/97	18-24hr/97	00-06hr/99/00	06-12hr/99/00	12-18hr/99/00	18-24hr/99/00
30	-	1.2	2.1	1.3	0.7	7	4	1.9
10	1.1	8.7	27	4.2	6	10	23	10
3	34	20	63	20	30	50	67	42
1	98	42	89	50	60	80	74	80
0.3	106	86	100	80	85	95	100	100
0.1	113	100	104	102	108	104	108	110
0.03	118	107	110	120	120	115	125	120
0.01	122	125	115	170	132	120	130	130
0.003	125	125	120	180	148	122	135	140
0.001	132	125	122	200	160	122	140	150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาบภายใน 6 ชั่วโมง

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : ATTENUATION (DB)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Period	Percent Time(%)											
	0.015 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	4 dB	5 dB	6 dB	7 dB	8 dB	9 dB	10 dB
00-06hr/97	6	0.12	0.08	0.04	0.037	0.036	0.035	0.03	0.028	0.027	0.0265	0.02
06-12hr/97	18	0.23	0.15	0.1	0.06	0.04	0.021	0.017	0.012	0.01	0.009	0.008
12-18hr/97	17	0.7	0.47	0.27	0.2	0.15	0.11	0.09	0.06	0.052	0.032	0.028
18-24hr/97	15	0.7	0.4	0.17	0.14	0.1	0.08	0.07	0.06	0.04	0.03	0.023
00-06hr/99/00	17	1.6	0.7	0.5	0.38	0.3	0.21	0.19	0.13	0.1	0.07	0.046
06-12hr/99/00	30	0.6	0.4	0.27	0.22	0.2	0.16	0.12	0.08	0.06	0.033	0.026
12-18hr/99/00	30	2	1.3	0.9	0.7	0.5	0.4	0.32	0.26	0.18	0.13	0.1
18-24hr/99/00	20	2.4	1.3	0.7	0.5	0.4	0.3	0.23	0.2	0.13	0.11	0.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาบภายใน 3 ชั่วโมง

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : RAINRATE (MM/H)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Percent Time(%)	00-03hr/97	03-06hr/97	06-09hr/97	09-12hr/97	12-15hr/97	15-18hr/97	18-21hr/97	21-24hr/97
30	-	-	2.4	1	2	5	1.2	-
10	1.63	1.5	10	8	18	32	15	1.8
3	3.1	2.1	15	22	37	60	40	10.7
1	10	2.1	18	50	45	90	70	50
0.3	30	2.1	18	70	60	100	85	78
0.1	35	2.1	18	90	67	104	100	85
0.03	53	2.1	19	100	80	110	102	95
0.01	53	2.1	19	110	80	120	105	102
0.003	53	2.1	19	110	80	122	105	105
0.001	53	2.1	19	110	80	125	105	108

ตารางรายชื่อ 3 ชั่วโมง (ต่อ)

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : RAINRATE (MM/H)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Percent Time(%)	00-03hr/99/00	03-06hr/99/00	06-09hr/99/00	09-12hr/99/00	12-15hr/99/00	15-18hr/99/00	18-21hr/99/00	21-24hr/99/00
30	1.6	1.7	2.8	2.2	4	2.6	1.8	
10	10	4.2	14	20	27	14	6	
3	42	9	60	60	68	37	30	
1	65	17	72	80	80	57	60	
0.3	100	33	80	100	95	80	83	
0.1	115	60	85	101	110	90	92	
0.03	128	80	90	105	122	95	100	
0.01	140	90	95	106	130	100	110	
0.003	150	90	100	117	135	105	115	
0.001	150	90	105	117	140	105	115	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

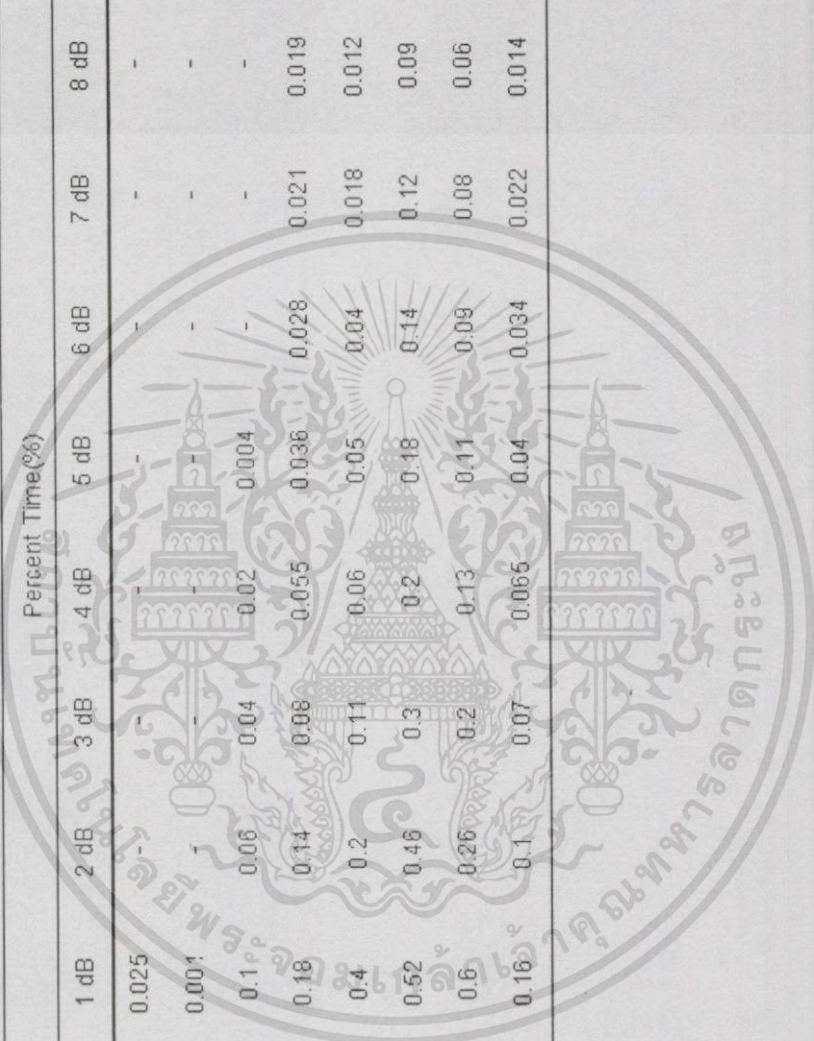
คาบภายใน 3 ชั่วโมง

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : ATTENUATION (DB)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/10/100-30/04/100

Period	Percent Time (%)											
	0.015 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	4 dB	5 dB	6 dB	7 dB	8 dB	9 dB	10 dB
00-03hr/97	6	0.07	0.025	-	-	-	-	-	-	-	-	-
03-06hr/97	7	0.03	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-
06-09hr/97	5.5	0.13	0.1 PP	0.06	0.04	0.02	0.004	-	-	-	-	-
09-12hr/97	25	0.27	0.18	0.14	0.08	0.055	0.036	0.028	0.021	0.019	0.015	0.011
12-15hr/97	20	0.6	0.4	0.2	0.11	0.06	0.05	0.04	0.018	0.012	0.009	0.006
15-18hr/97	9	0.7	0.52	0.46	0.3	0.2	0.18	0.14	0.12	0.09	0.06	0.04
18-21hr/97	13	1.4	0.6	0.26	0.2	0.13	0.11	0.09	0.08	0.06	0.055	0.05
21-24hr/97	10	0.3	0.16	0.1	0.07	0.065	0.04	0.034	0.022	0.014	0.008	0.006



ศตวรรษ 3 ชั่วโมง (ต่อ)

ELEVATION 90 DEGREE

BANGKOK : ATTENUATION (DB)

PERIOD (D/M/Y) : 01/01/97-31/12/97, 01/05/99-31/12/99, 01/01/00-30/04/00

Period	Percent Time(%)											
	0.01 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	4 dB	5 dB	6 dB	7 dB	8 dB	9 dB	10 dB
00-03hr/99/00	18	2	1.2	0.91	0.7	0.55	0.42	0.38	0.26	0.2	0.14	0.1
03-06hr/99/00	15	1	0.14	0.022	0.01	0.001	-	-	-	-	-	-
06-09hr/99/00	22	0.28	0.21	0.18	0.17	0.16	0.14	0.11	0.07	0.06	0.028	0.02
09-12hr/99/00	30	1	0.5	0.27	0.2	0.17	0.12	0.09	0.067	0.05	0.03	0.01
12-15hr/99/00	32	2	1.1	0.76	0.51	0.41	0.3	0.22	0.2	0.14	0.11	0.09
15-18hr/99/00	20	2.2	1.8	1.1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.17	0.12
18-21hr/99/00	20	2.8	1.6	0.9	0.6	0.47	0.34	0.28	0.19	0.13	0.1	0.078
21-24hr/99/00	20	2	1	0.5	0.39	0.3	0.28	0.22	0.2	0.17	0.12	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายดุสิต โบศรี เกิดเมื่อวันที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2510 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาจากสถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2538

ผลงานวิชาการที่ได้ยอมรับการตีพิมพ์ ได้แก่

1. ดุสิต โบศรี, ณรงค์ เหมกรณ์. “การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนในย่าน Ku-band ที่มุม 90 องศา.” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 15, ฉบับที่ 2, ธันวาคม 2541. หน้า 99-104.
2. ดุสิต โบศรี, ณรงค์ เหมกรณ์. “วิเคราะห์การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนในย่าน Ku-band ด้วยอุปกรณ์ เรดิโอมิเตอร์ ที่มุมซันิท.” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17, ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2543. หน้า 41-46.
3. ดุสิต โบศรี, ณรงค์ เหมกรณ์. “วิเคราะห์การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนในย่าน Ku-band ที่มุม 90 องศา.” การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 38 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กุมภาพันธ์ 2543.

ประวัติการทำงาน

ปี พ.ศ. 2530 เข้าทำงานที่บริษัทวิทยุการบิน มีหน้าที่รับผิดชอบการผลิตแผ่นพิมพ์วงจร และปี พ.ศ. 2531 เข้าทำงานที่การสื่อสารแห่งประเทศไทย ตำแหน่งนายช่างโทรคมนาคม ระดับ 2 มีหน้าที่รับผิดชอบดูแลเครือข่ายระบบเคเบิลใต้น้ำ และปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกร ระดับ 7 มีหน้าที่รับผิดชอบเกี่ยวกับระบบวิทยุไมโครเวฟและวงจรให้เข้าความเร็วสูง (Least Line Circuit) ภายในประเทศ