การทำนายการลดทอนสัญญาณดาวเทียม 12 GHz เนื่องจากฝน ที่มุมเงยต่ำของสถานีภาคพื้นดินในประเทศไทย

นายพงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์ไพบูลย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2538

ISBN 974-631-379-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16760234X

12 GHz RAIN ATTENUATION PREDICTION AT LOW EARTH STATION ANGLE IN THAILAND

Pongsak Susampanpaiboon

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-631-379-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทำนายการลดทอนสัญญาณดาวเทียม 12 GHz เนื่องจากฝนที่มุมเงยต่ำของสถานีภาคพื้นดินในประเทศไทย

โดย นายพงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์ไพบูลย์

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสิทธิ์ ทีฆพุฒิ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

---------- คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---------- ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ อยู่ถนอม)

---------- อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสิทธิ์ ทีฆพุฒิ)

---------- กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว)

---------- กรรมการ

(คุณเกรียงไกร ตินตะสุวรรณ)

---------- กรรมการ

(ดร. สมศรี ฮั่นตระกูล)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

พงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์ไพบูลย์ : การทำนายการลดทอนสัญญาณดาวเทียม 12 GHz เนื่องจากฝนที่มุมเงยต่ำของสถานีภาคพื้นดินในประเทศไทย(12 GHz RAIN ATTENUATION PREDICTION AT LOW EARTH STATION ANGLE IN THAILAND) อ. ที่ปรึกษา: ผศ. ดร. ประสิทธิ์ ทีฆพุฒิ, 199 หน้า. ISBN 974-631-379-7

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายที่จะเสนอวิธีการคำนวณค่าประมาณการของการลดทอนสัญญาณดาวเทียมที่ความถี่ 12 GHz เนื่องจากฝน ที่คาดว่าจะถูกเกินที่ระดับความเป็นไปได้ที่ต้องการ(ซึ่งหมายถึงระดับเปอร์เซ็นต์ของช่วงเวลาเฉลี่ย 1 ปี) จากสถิติการแจกแจงสะสมของอัตราฝนตก ณ ที่ตั้งสถานีภาคพื้นดิน สำหรับใช้งานในประเทศไทย โดยทำการพิจารณาที่มุมเงยต่ำของจานสายอากาศ ซึ่งเป็นกรณีเลวร้ายที่สุด

รูปแบบการคำนวณได้พัฒนาจากแบบจำลองเซลฝนที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งมีอัตราฝนตกภายในสม่ำเสมอโดยได้มีการปรับพารามิเตอร์ทางกายภาพของเซลฝน เช่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย และความสูงเฉลี่ยของเซลฝน ให้เหมาะสมสำหรับประเทศไทย ผลการคำนวณโดยวิธีที่เสนอนี้และโดยวิธีอื่น ได้ถูกเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดโดยเรดิโอมิเตอร์แบบดิคกี้ในประเทศไทย, สิงค์โปร์ และ อินโดนีเซีย และพบว่าวิธีที่เสนอนี้ได้ให้ผลใกล้เคียงมากที่สุดโดยเฉพาะที่ระดับความเป็นไปได้ต่ำ และมีความใกล้เคียงอย่างสม่ำเสมอในแต่ละระดับความเป็นไปได้ รวมทั้งมีแนวโน้มทางสถิติที่ไปด้วยกัน วิธีที่เสนอนี้จะให้ค่าทางสถิติ(ค่าเฉลี่ย, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า rms)ของตัวแปรทดสอบ ต่ำกว่า 10 % ที่ระดับความเป็นไปได้ไม่เกิน 0.4 % ขณะที่วิธีการอื่นให้ค่าทางสถิติแตกต่างกันออกไปมาก นอกจากนี้ยังได้แสดงผลการคำนวณโดยวิธีที่เสนอจากการใช้สถิติอัตราฝนตกที่เสนอโดย CCIR(International Radio Consultative Committee) ซึ่งก็ให้ผลที่สามารถยอมรับได้สำหรับใช้งานในประเทศไทย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ไฟฟ้าสื่อสาร ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

บทคัดย่อและบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C515628 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: 12 GHz RAIN ATTENUATION / LOW EARTH STATION ANGLE / THAILAND

PONGSAK SUSAMPANPAIBOON : 12 GHz RAIN ATTENUATION PREDICTION AT LOW EARTH STATION ANGLE IN THAILAND. THESIS ADVISOR : ASSI. PROF. PRASIT TEEKAPUT, Ph. D. 199 pp.

ISBN 974-631-379-7

The objective of this thesis is to establish the rain attenuation prediction model for 12 GHz on slant path at low elevation angle in Thailand. The estimated attenuation exceeded for required probability level (time percentage of an average year) and calculated by using point rainfall rate cumulative distribution at earth station is provided.

This proposed model was developed from cylindrical rain cell model having uniform rain rate and suitable physical parameters such as average rain cell size and average rain height for Thailand. The cumulative attenuation distribution of the proposed method and others were compared with measured statistics obtained from Dicke radiometers in Thailand, Singapore and Indonesia. The proposed method gives very good results, especially at low probability level and rather closely at each probability level including to have same trend with measured statistics. The proposed method gives statistic values(mean, standard deviation and rms values) of test variable below 10 % at probability level not exceeded 0.4 %. On the other hand, other methods give the statistic values more differently. Additionally, the estimated attenuation of the proposed method calculated by using CCIR(International Radio Consultative Committee) rainfall rate statistic remain to give acceptable results for using in Thailand.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ไฟฟ้าสื่อสาร ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร. ประสิทธิ์ ทีฆพุฒิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. ณรงค์ อยู่ถนอม, ดร. ทับทิม อ่างแก้ว, คุณเกรียงไกร ตินตะสุวรรณ และ ดร. สมศรี ฮั่นตระกูล จากกรมอุตุนิยมวิทยา ที่ได้ให้คำแนะนำและวิจารณ์สิ่งที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณราชันย์ เหล็กกล้า จากกองพัฒนาธุรกิจและบริการโทรคมนาคมการสื่อสารแห่งประเทศไทย, คุณคำนึง เมืองโคตร จากกองตรวจอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา รวมทั้งเจ้าหน้าที่ของกรมอุตุนิยมวิทยา และเจ้าหน้าที่ของสำนักงานปฏิบัติการฝนหลวง ท่านอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ที่ได้มีส่วนช่วยให้คำปรึกษาทางวิชาการ, คำแนะนำ และ ความช่วยเหลือต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ จนกระทั่งสำเร็จไปได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฌ

บทที่

1. บทนำ 1
2. พื้นฐานทางทฤษฎี 3

แนวทางการทำนายการลดทอนสัญญาณ 3

1. การลดทอนเฉพาะ 4

1.1 ผลกระทบจากรูปร่างของเม็ดฝน 4

1.2 ผลกระทบจากการแจกแจงขนาดเม็ดฝน 5

1.3 ผลกระทบจากอุณหภูมิของเม็ดฝน 7

1.4 ผลกระทบจากการกระจัดกระจายของสัญญาณจากเม็ดฝน 9

2. การแจกแจงอัตราฝนตก ณ จุดทำการวัด 11

3. เซลฝน 16

3.1 การก่อตัวของพายุฟ้าคะนอง 16

3.2 การกระจายของหยาดน้ำฟ้าแต่ละชนิดในเมฆฟ้าคะนอง 20

3.3 การเปลี่ยนแปลงทางแนวดิ่ง 21

3.4 การเปลี่ยนแปลงทางแนวราบ 23

การวัดค่าอุณหภูมิสัญญาณรบกวนจากฟ้าโดยเรดิโอมิเตอร์ 26

1. การวัดโดยเรดิโอมิเตอร์แบบแอ็คทีฟ 29

2. การวัดโดยเรดิโอมิเตอร์แบบพาสซีฟ 30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3. การคำนวณการลดทอนสัญญาณจากอุณหภูมิของจานสาอากาศ 32
3. การทดลองและผลการทดลอง 36
การทดลอง 36
ผลการทดลอง 39
4. การทำนายการลดทอนสัญญาณโดยวิธีต่างๆ 48
การทำนายการลดทอนสัญญาณโดยวิธีของ CCIR 48
1. ข้อดีของวิธีการของ CCIR 51
2. ข้อเสียของวิธีการของ CCIR 51
การทำนายการลดทอนสัญญาณโดยวิธี Global model 56
1. ข้อดีของ Global model 65
2. ข้อเสียของ Global model 65
การทำนายการลดทอนสัญญาณโดยวิธี SAM 66
1. ข้อดีของ SAM 73
2. ข้อเสียของ SAM 73
5. การทำนายการลดทอนสัญญาณโดยวิธีที่เสนอ 74
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลฝน 74
ความสูงเฉลี่ยของเซลฝน 84
แฟคเตอร์ของเวลาสะสม 92
ความยาวเส้นทางยังผลที่ได้รับผลกระทบจากฝน 94
ค่าการลดทอนสัญญาณจากฝน 96
ผลการคำนวณ 96
6. การทดสอบวิธีการที่ใช้ทำนายการลดทอนสัญญาณจากฝน 105
การทดสอบ 105
ผลการทดสอบ 111

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7. สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ 116

รายการอ้างอิง 118

ภาคผนวก ก 123

ภาคผนวก ข 138

ประวัติผู้เขียน 199

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับการประมาณการลดทอนเฉพาะในสมการ (2.1) 10

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ u สำหรับย่านต่างๆ 13

ตารางที่ 2.3 ย่านภูมิอากาศของฝนกับอัตราฝนตกที่ถูกเกิน(mm/h) 13

ตารางที่ 2.4 ความผิดพลาดของค่าการลดทอนที่คำนวณได้กับค่าอุณหภูมิตัวกลางยังผล 35

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของสถานีที่ตั้งของเรดิโอมิเตอร์ 39

ตารางที่ 3.2 การแจกแจงสะสมของอัตราฝนตก ที่สิงค์โปร์(ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) และบันดุง(ก.พ. 2535 - ต.ค. 2535) 40

ตารางที่ 3.3 การแจกแจงสะสมของการลดทอนสัญญาณ ที่สิงค์โปร์(ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) และบันดุง(ก.พ. 2535 - ต.ค. 2535) 40

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำนายการลดทอนสัญญาณ 12 GHz โดยวิธี CCIR 50

ตารางที่ 4.2 ค่าการแจกแจงอัตราฝนตก(mm/h) 57

ตารางที่ 4.3 ค่า P, H(P) และ ค่าคงที่ a, b สำหรับแต่ละสถานี 60

ตารางที่ 5.1 ค่าทางสถิติของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลฝน(km)ในแต่ละระดับฝน 77

ตารางที่ 5.2 ค่าควอนไทล์ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลฝน(km)ในแต่ละระดับฝน 78

ตารางที่ 5.3 การแจกแจงความถี่ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลฝน(km)ในแต่ละระดับฝน 79

ตารางที่ 5.4 ค่า MLE ของการแจกแจงที่ถูกปรับแล้ว 80

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าควอนไทล์ของการแจกแจงที่ถูกปรับแล้วสำหรับฝนแต่ละระดับ 81

ตารางที่ 5.6 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลฝนและอัตราฝนตก ในประเทศไทย 84

ตารางที่ 5.7 ค่าทางสถิติของความสูงระดับเยือกแข็ง(km)ในแต่ละจังหวัด 85

ตารางที่ 5.8 ค่าควอนไทล์ของความสูงระดับเยือกแข็ง(km)ในแต่ละจังหวัด 86

ตารางที่ 5.9 การแจกแจงความถี่ของความสูงระดับเยือกแข็ง ในแต่ละจังหวัด 87

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบค่าควอนไทล์ของการแจกแจงที่ถูกปรับแล้วสำหรับกรุงเทพฯ (n = 2895) 89

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณการลดทอนสัญญาณ(dB)โดยวิธีต่างๆ สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 106

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณการลดทอนสัญญาณ(dB)โดยวิธีต่างๆ สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2536 - ม.ค. 2537) 107

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณการลดทอนสัญญาณ(dB)โดยวิธีต่างๆ สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2537) 107

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณการลดทอนสัญญาณ(dB)โดยวิธีต่างๆ สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 108

ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณการลดทอนสัญญาณ(dB)โดยวิธีต่างๆ สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2536 - ม.ค. 2537) 109

ตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบผลการคำนวณการลดทอนสัญญาณ(dB)โดยวิธีต่างๆ สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2537) 109

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบผลการคำนวณการลดทอนสัญญาณ(dB)โดยวิธีต่างๆ สำหรับสิงค์โปร์ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 110

ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบผลการคำนวณการลดทอนสัญญาณ(dB)โดยวิธีต่างๆ สำหรับบันดุง (ก.พ. 2535 - ต.ค. 2535) 110

ตารางที่ 6.9 ค่าเฉลี่ย(%)ของตัวแปรทดสอบที่ระดับเปอร์เซ็นต์ของเวลาต่างๆ สำหรับวิธีการทำนายแบบต่างๆ 112

ตารางที่ 6.10 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(%)ของตัวแปรทดสอบที่ระดับเปอร์เซ็นต์ของเวลาต่างๆ สำหรับวิธีการทำนายแบบต่างๆ 112

ตารางที่ 6.11 ค่า rms (%)ของตัวแปรทดสอบที่ระดับเปอร์เซ็นต์ของเวลาต่างๆ สำหรับวิธีการทำนายแบบต่างๆ 113

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การลดทอนเฉพาะสำหรับเม็ดฝนแบบทรงกลมถูกเปรียบเทียบกับการลดทอนของคลื่นโพลาไรซ์แนวดิ่งและแนวราบที่ถูกกระจัดกระจายโดยเม็ดฝนแบบทรงกลมแป้น 5

รูปที่ 2.2 การลดทอนเฉพาะของฝนจาก 1 ถึง 1000 GHz ที่อัตราฝนตก 2.5, 12.5, 50 และ 150 mm/h สำหรับการแจกแจงขนาดเม็ดฝนของ Laws และ Parsons, ของ Marshall และ Palmer และ ของ Joss โดยอุณหภูมิฝนเท่ากับ 20°C 6

รูปที่ 2.3 ส่วนจริง m_r ลบหนึ่งของดัชนีหักเหเชิงซ้อน ที่ถูกคูณด้วย 10^6 $[(m_r-1)10^6]$ สำหรับตัวกลางที่ประกอบด้วยเม็ดของน้ำในที่ว่าง โดยอุณหภูมิเท่ากับ 20°C และการแจกแจงของ Laws และ Parsons 7

รูปที่ 2.4 ส่วนจินตภาพ m_i ของดัชนีหักเหเชิงซ้อน ที่ถูกคูณด้วย 10^6 $[m_i x10^6]$ สำหรับตัวกลางเช่นเดียวกับในรูปที่ 2.3 8

รูปที่ 2.5 การลดทอนเฉพาะเป็นฟังก์ชั่นของความถี่ สำหรับการแพร่ของคลื่นต่อเนื่องตลอดฝนที่สม่ำเสมอ 8

รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงลักษณะการกระจัดกระจายแบบหลายทาง 9

รูปที่ 2.7 แผนที่แสดงเส้นอัตราฝนตก 0.01 % ($R_{0.01}$) 14

รูปที่ 2.8 แผนที่แสดงย่านภูมิอากาศ 15

รูปที่ 2.9 ระยะเริ่มก่อตัวเป็นเมฆคิวมูลัสในระยะแรกของการเกิดพายุฟ้าคะนอง มีกระแสอากาศไหลขึ้นเพียงอย่างเดียว 17

รูปที่ 2.10 ระยะเจริญเติบโตเต็มที่ของพายุฟ้าคะนอง มีกระแสอากาศไหลขึ้นและไหลลง 18

รูปที่ 2.11 ระยะสลายตัวของพายุฟ้าคะนอง มีแต่กระแสอากาศไหลลงอย่างเดียว จนกระทั่งสลายตัว 19

รูปที่ 2.12 แสดงการกระจายของหยาดน้ำฟ้าในเมฆฟ้าคะนอง 21

รูปที่ 2.13 ความสูง 0°C isotherm เฉลี่ยในช่วงฤดูร้อน 23

รูปที่ 2.14 แผนภาพของเซลฝนที่เกิดจากการพาความร้อน โดยวางตัวอย่างมีระเบียบในบรรยากาศที่มีเสถียรภาพ ส่วนทึบเป็นบริเวณที่อากาศร้อนลอยตัวขึ้น และส่วนพื้นที่สีขาวเป็นบริเวณที่อากาศจมตัวลง 24

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.15 ผลการสังเกตทางเรดาร์ของลักษณะฝนในวันที่เกิดพายุฟ้าคะนองแบบมวลอากาศ ส่วนทึบเป็นบริเวณที่อากาศร้อนลอยตัวขึ้น และส่วนพื้นที่สีขาวเป็นบริเวณที่อากาศจมตัวลง 24
รูปที่ 2.16 ผลการสังเกตทางเรดาร์ของลักษณะฝนในวันที่เกิดพายุฟ้าคะนองในแนวสควอลล์ ส่วนทึบเป็นบริเวณที่อากาศร้อนลอยตัวขึ้น และส่วนพื้นที่สีขาวเป็นบริเวณที่อากาศจมตัวลง 25
รูปที่ 2.17 ผลการสังเกตทางเรดาร์ของโครงสร้างเซลฝนที่ Millstone 26
รูปที่ 2.18 แผนภาพแสดงความสูญเสียของสัญญาณและอุณหภูมิที่แผ่ออกมา เนื่องจากตัวกลางดูดกลืนที่มีค่าการส่งพลังงาน σ 27
รูปที่ 2.19 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนจากภายนอกบรรยากาศ 28
รูปที่ 2.20 แผนภาพแสดงการสลับเปลี่ยนทิศทางการวัดของเรดิโอมิเตอร์แบบแอ็คทีฟ 29
รูปที่ 2.21 แผนภาพและบล็อคไดอะแกรมแสดงความแตกต่างระหว่าง (ก) เรดิโอมิเตอร์ แบบกำลังงานรวม และ (ข) เรดิโอมิเตอร์แบบดิคกี้ 31
รูปที่ 2.22 ภาพ plan-view แสดงผลของความไม่สม่ำเสมอของฝนที่เรดิโอมิเตอร์ได้รับ (ก) เรดิโอมิเตอร์อยู่นอกพายุฝน (ข) เรดิโอมิเตอร์อยู่ในใจกลางของพายุฝน 33
รูปที่ 3.1 การจัดรูปลักษณ์ของระบบการวัดในประเทศไทย 37
รูปที่ 3.2 อุณหภูมิของจานสายอากาศและอัตราฝนตก ที่วัดได้ตลอด 24 ชั่วโมง เมื่อวันที่ 23 กันยายน 2535 ที่กรุงเทพฯ 43
รูปที่ 3.2 อุณหภูมิของจานสายอากาศและอัตราฝนตก ที่วัดได้ตลอด 24 ชั่วโมง เมื่อวันที่ 23 กันยายน 2535 ที่ศรีราชา 43
รูปที่ 3.4 การแจกแจงสะสมของอัตราฝนตก ที่กรุงเทพฯ 44
รูปที่ 3.5 การแจกแจงสะสมของค่าการลดทอนสัญญาณ ที่กรุงเทพฯ 44
รูปที่ 3.6 การแจกแจงสะสมของอัตราฝนตก ที่ศรีราชา 45
รูปที่ 3.7 การแจกแจงสะสมของค่าการลดทอนสัญญาณ ที่ศรีราชา 45
รูปที่ 3.8 การแจกแจงสะสมของอัตราฝนตก ที่สิงค์โปร์ 46
รูปที่ 3.9 การแจกแจงสะสมของค่าการลดทอนสัญญาณ ที่สิงค์โปร์ 46

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.10 การแจกแจงสะสมของอัตราฝนตก ที่บันดุง 47
รูปที่ 3.11 การแจกแจงสะสมของค่าการลดทอนสัญญาณ ที่บันดุง 47
รูปที่ 4.1 ภาพแสดงเส้นทางการแพร่ของสัญญาณดาวเทียม และ
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำนายการลดทอนโดย CCIR 49
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีของ CCIR
กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 52
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีของ CCIR
กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2536 - ม.ค. 2537) 52
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีของ CCIR
กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2537) 53
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีของ CCIR
กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 53
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีของ CCIR
กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2536 - ม.ค. 2537) 54
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีของ CCIR
กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2537) 54
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีของ CCIR
กับที่ได้จากการวัด สำหรับสิงค์โปร์ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 55
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีของ CCIR
กับที่ได้จากการวัด สำหรับบันดุง (ก.พ. 2535 - ต.ค. 2535) 55
รูปที่ 4.10 แผนที่แสดงย่านภูมิอากาศของฝน 56
รูปที่ 4.11 แผนที่แสดงย่านภูมิอากาศของฝนในสหรัฐอเมริกา 57
รูปที่ 4.12 ความสูง $0^{\circ}C$ isotherm 58

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี Global model กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 61

รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี Global model กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2536 - ม.ค. 2537) 61

รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี Global model กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2537) 62

รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี Global model กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 62

รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี Global model กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2536 - ม.ค. 2537) 63

รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี Global model กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2537) 63

รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี Global model กับที่ได้จากการวัด สำหรับสิงค์โปร์ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 64

รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี Global model กับที่ได้จากการวัด สำหรับบันดุง (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 64

รูปที่ 4.21 การกระจายอัตราฝนตกตามเส้นทางแนวราบ 66

รูปที่ 4.22 ภาพแสดงเส้นทางการแพร่ในแนวดิ่ง 67

รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี SAM กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 69

รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี SAM กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2536 - ม.ค. 2537) 69

รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี SAM กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2537) 70

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี SAM กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 70

รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี SAM กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2536 - ม.ค. 2537) 71

รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี SAM กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2537) 71

รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี SAM กับที่ได้จากการวัด สำหรับสิงค์โปร์ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 72

รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธี SAM กับที่ได้จากการวัด สำหรับบันดุง (ก.พ. 2535 - ต.ค. 2535) 72

รูปที่ 5.1 ภาพตัวอย่างการตรวจฝนด้วยเรดาร์ในเขตกรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 13 กันยายน 2536 เวลา 19.30 น. ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา 75

รูปที่ 5.2 ภาพตัวอย่างการตรวจฝนด้วยเรดาร์ในเขตกรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 5 กันยายน 2536 เวลา 16.30 น. ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา 76

รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบการแจกแจงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเซลฝน สำหรับฝนหนัก ที่กรุงเทพฯ 82

รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบการแจกแจงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเซลฝน สำหรับฝนปานกลาง ที่กรุงเทพฯ 82

รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบการแจกแจงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเซลฝน สำหรับฝนเล็กน้อย ที่กรุงเทพฯ 83

รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเซลฝนกับอัตราฝนตก 83

รูปที่ 5.7 การแจกแจงความสูงระดับเยือกแข็ง ที่กรุงเทพฯ 89

รูปที่ 5.8 การแจกแจงความสูงระดับเยือกแข็ง ที่เชียงใหม่ 90

รูปที่ 5.9 การแจกแจงความสูงระดับเยือกแข็ง ที่อุบลราชธานี 90

รูปที่ 5.10 การแจกแจงความสูงระดับเยือกแข็ง ที่สงขลา 91

รูปที่ 5.11 การแจกแจงความสูงระดับเยือกแข็ง ที่ภูเก็ต 91

รูปที่ 5.12 แสดง 3 เส้นทาง(A,B,C) ที่ได้รับผลกระทบของการลดทอนจากฝน 92

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.13 สถิติการลดทอนสัญญาณของ 3 เส้นทางในรูปที่ 5.12 93

รูปที่ 5.14 ภาพแบบจำลองเซลฝนที่นำเสนอ 94

รูปที่ 5.15 กราฟของความยาวเส้นทางที่อยู่ภายในเซลฝน[L(x)] เมื่อเซลฝน
อยู่ที่ตำแหน่ง x ต่างๆ สำหรับกรณีที่ $L_s \cos\theta < D_{cell}$ 95

รูปที่ 5.16 กราฟของความยาวเส้นทางที่อยู่ภายในเซลฝน[L(x)] เมื่อเซลฝน
อยู่ที่ตำแหน่ง x ต่างๆ สำหรับกรณีที่ $L_s \cos\theta > D_{cell}$ 95

รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ
กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 97

รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ
กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2536 - ม.ค. 2537) 97

รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ
กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2537) 98

รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ
กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 98

รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ
กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2536 - ม.ค. 2537) 99

รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ
กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2537) 99

รูปที่ 5.23 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ
กับที่ได้จากการวัด สำหรับสิงค์โปร์ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 100

รูปที่ 5.24 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ
กับที่ได้จากการวัด สำหรับบันดุง (ก.พ. 2535 - ต.ค. 2535) 100

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ (ใช้การแจกแจงอัตราฝนตกของ CCIR-N) กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 101

รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ (ใช้การแจกแจงอัตราฝนตกของ CCIR-N) กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2536 - ม.ค. 2537) 101

รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ (ใช้การแจกแจงอัตราฝนตกของ CCIR-N) กับที่ได้จากการวัด สำหรับกรุงเทพฯ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2537) 102

รูปที่ 5.28 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ (ใช้การแจกแจงอัตราฝนตกของ CCIR-N) กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 102

รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ (ใช้การแจกแจงอัตราฝนตกของ CCIR-N) กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2536 - ม.ค. 2537) 103

รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ (ใช้การแจกแจงอัตราฝนตกของ CCIR-N) กับที่ได้จากการวัด สำหรับศรีราชา (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2537) 103

รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ (ใช้การแจกแจงอัตราฝนตกของ CCIR-P) กับที่ได้จากการวัด สำหรับสิงค์โปร์ (ก.พ. 2535 - ม.ค. 2536) 104

รูปที่ 5.32 เปรียบเทียบการแจกแจงสะสมของการลดทอน ที่คำนวณโดยวิธีที่เสนอ (ใช้การแจกแจงอัตราฝนตกของ CCIR-P) กับที่ได้จากการวัด สำหรับบันดุง (ก.พ. 2535 - ต.ค. 2535) 104

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.1 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย(%)ของตัวแปรทดสอบ ที่ระดับเปอร์เซ็นต์ของเวลาต่างๆ สำหรับวิธีการทำนายแบบต่างๆ 114

รูปที่ 6.2 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(%)ของตัวแปรทดสอบ ที่ระดับเปอร์เซ็นต์ของเวลาต่างๆ สำหรับวิธีการทำนายแบบต่างๆ 114

รูปที่ 6.3 เปรียบเทียบค่า rms (%)ของตัวแปรทดสอบ ที่ระดับเปอร์เซ็นต์ของเวลาต่างๆ สำหรับวิธีการทำนายแบบต่างๆ 115

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย