

การคาดคะเนการสลับสถานะภาคพื้นดินเพื่อรับส่งสัญญาณดาวเทียม
ย่านความถี่เคเอเมื่อเกิดการลดทอนสัญญาณจากฝน

KA-BAND GROUND STATION SITE SWITCHING PREDICTION DUE TO
RAIN-INDUCED ATTENUATION

จิรัชญา พูลสวัสดิ์

JIRUTCHAYA POOLSAWUT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-EN-M-010-207

การคาดคะเนการสลับสถานีภาคพื้นดินเพื่อรับส่งสัญญาณดาวเทียม
ย่านความถี่เคเอเมื่อเกิดการลดทอนสัญญาณจากฝน
KA-BAND GROUND STATION SITE SWITCHING PREDICTION DUE TO
RAIN-INDUCED ATTENUATION



T138759

จิรัชญา พูลสวัสดิ์

JIRUTCHAYA POOLSAWUT

เลขทမ်း
เลขทะเบียน 138759
วันเดือนปี 6 ต.ค. 2558

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2557

KMITL-2014-EN-M-010-207

KA-BAND GROUND STATION SITE SWITCHING PREDICTION DUE TO
RAIN-INDUCED ATTENUATION

JIRUTCHAYA POOLSAWUT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

KMITL-2014-EN-M-010-207

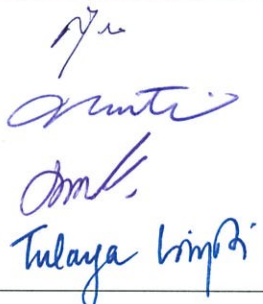
COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

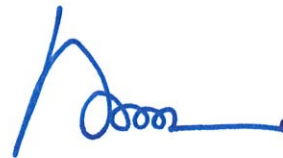
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การคาดคะเนการสลับสถานีภาคพื้นดินเพื่อรับส่งสัญญาณดาวเทียมย่านความถี่เคเอเมื่อเกิดการลดทอนสัญญาณจากฝน
Thesis Title KA-Band Ground Station Site Switching Prediction Due to Rain-Induced Attenuation
นักศึกษา นางสาวจิรัชญา พูลสวัสดิ์
รหัสประจำตัว 55611902
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ตุลยา ลิมปิติ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-010-207

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธิชีวกภาค	
ดร.ณัฐกานต์	พุทธรักษ์	
ศ.ดร.ประยุทธ์	อัครเอกมาลิน	
ผศ.ดร.ตุลยา	ลิมปิติ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2557 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ห้อง E12-302

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การคาดคะเนการสลับสถานะภาคพื้นดินเพื่อรับส่งสัญญาณดาวเทียมย่านความถี่เคเอเมื่อเกิดการลדתอนสัญญาณจากฝน
นักศึกษา	นางสาวจิรัชญา พูลสวัสดิ์
รหัสประจำตัว	55611902
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ตุลยา ลิมปิติ

บทคัดย่อ

ปัจจัยทางสภาพภูมิอากาศต่างๆ เช่น ฝน ความหนาของชั้นเมฆ ปริมาณไอน้ำของชั้นบรรยากาศ หรือความเร็วลมส่งผลกระทบต่อการใช้งานระบบการสื่อสารในย่านความถี่สูงที่มีแนวการแพร่คลื่นระหว่างพื้นโลกและอวกาศ เช่น ระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมในย่านความถี่เคเอหรือเคเอส่งผลให้เกิดการด้อยคุณภาพของสัญญาณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบต่ออันเนื่องมาจากฝน พบว่าเป็นสาเหตุหลักของการเกิดการลדתอนสัญญาณในแนวการแพร่คลื่น การศึกษาลักษณะความสัมพันธ์และผลกระทบของอัตราการตกของฝนต่อการลדתอนสัญญาณดาวเทียม จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมให้มีประสิทธิภาพ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเวลาของอัตราการตกของฝนต่อการลדתอนสัญญาณดาวเทียม โดยใช้ข้อมูลสัญญาณนำร่องของดาวเทียมไทยคม 4 (IPSTAR) ในย่านความถี่เคเอ พบว่าอัตราการตกของฝนในบริเวณสถานีภาคพื้นดิน มีความสัมพันธ์กับระดับการลדתอนสัญญาณแบบเป็นเชิงเส้น โดยมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามเป็นบวกและมีค่าสูง รวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนโดยใช้อัตราการตกของฝนจากข้อมูลเรดาร์ของประเทศญี่ปุ่น เพื่อประโยชน์ในการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน ความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างอัตราการตกของฝนและการลדתอนสัญญาณดาวเทียมที่สังเกตได้ถูกนำมาพัฒนาการทำนายระดับการลדתอนสัญญาณโดยใช้แบบจำลอง Linear Dynamical System Response จากนั้นผลการทำนายระดับการลדתอนสัญญาณล่วงหน้าด้วยแบบจำลองดังกล่าว ซึ่งอาศัยเพียงข้อมูลอัตราการตกของฝนที่บันทึกได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบคานกระดกที่ติดตั้ง ณ สถานีภาคพื้นดินไทยคม (แคราย) ถูกใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบอัลกอริธึมการสลับสถานะดาวเทียมภาคพื้นดิน จากผลงานวิจัยพบว่าอัลกอริธึมที่นำเสนอสามารถให้ผลลัพธ์ในการเพิ่มคุณภาพของสัญญาณให้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับคุณภาพสัญญาณเดิมที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการสลับสถานะภาคพื้นดิน

Thesis	Study on Ka-band Ground Station Site Switching Prediction Due to Rain-induced Attenuation
Student	Miss Jirutchaya Poolsawut
Student ID.	55611902
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Tulaya Limpiti

ABSTRACT

Various climatological factors such as rain, cloud thickness, water vapor, or wind speed, may affect the high frequency earth-to-space millimeter wave communications, for example the satellite data transmissions in Ku- and Ka-bands. It is known that rain is one of the main causes of signal attenuation. Therefore, the relationship between rainfall rate and signal degradation is extremely useful for designing a reliable satellite communication system. This thesis investigates the temporal relationship between rainfall rate and satellite signal attenuation using beacon data of the IPSTAR satellite. It is observed that the rainfall rates measured at the satellite ground station are highly correlated with signal attenuations. Furthermore, spatial correlations of rainfall rates are calculated, using radar-derived rainfall rates in Japan as a case study. The information is beneficial in selecting the locations of the ground stations. The observed statistical relationships motivates the use of the linear dynamical system response model to predict the signal attenuation, using only the rainfall rate available from the tipping bucket rain gauge installed at Kaerai satellite ground station (Thaicom PLC.). The predicted signal attenuation is utilized to develop a real-time site switching technique. The experimental results show the capability of the proposed algorithm to improve satellite service availability.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ตุลยา ลิมปิติ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่คอยให้คำชี้แนะและสั่งสอนในทุกๆ ระดับชั้นการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณธนันท์ คณะเจริญ รวมทั้งรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อนๆ ในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมที่คอยให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยและเป็นกำลังใจที่ดีมาตลอด

ขอขอบพระคุณ คุณบรรพต เคลือบวงพิต คุณฉัตรเพชร บุญยกตุ ตลอดจนเจ้าหน้าที่จาก บริษัท ไทยคม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลสัญญาณนำร่องดาวเทียมที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์และคำนวณในงานวิจัยฉบับนี้ ตลอดจนคำแนะนำในมุมมองของงานใช้งานเชิงอุตสาหกรรม

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สำหรับเงินทุนการศึกษาวิจัยในระดับปริญญาโท

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

จิรัชญา พูลสวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ระบบสื่อสารดาวเทียมและผลกระทบอันเนื่องมาจากฝน.....	6
2.1 ระบบสื่อสารดาวเทียม.....	6
2.1.1 โครงสร้างของระบบสื่อสารดาวเทียม.....	7
2.1.2 การแบ่งประเภทของดาวเทียมตามรูปแบบการใช้งาน.....	9
2.1.3 วงโคจรดาวเทียม.....	10
2.1.4 ความถี่สัญญาณดาวเทียม.....	11
2.1.5 ดาวเทียมไทยคม 4.....	13
2.1.6 ความเข้มของสัญญาณในระบบสื่อสารดาวเทียม.....	15
2.1.7 การตรวจสอบคุณภาพสัญญาณดาวเทียม.....	16
2.2 การวัดปริมาณน้ำฝน, วิเคราะห์ และคำนวณอัตราการตกของฝน.....	18
2.2.1 เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบคานกระดก (Tipping bucket).....	19
2.2.2 การวิเคราะห์และคำนวณอัตราการตกของฝน.....	20
2.3 ผลกระทบของฝนต่อการลดทอนกำลังงานสัญญาณดาวเทียม.....	20
2.3.1 การดูดกลืน (Absorption).....	20
2.3.2 การกระจาย (Scattering).....	20
2.3.3 การเบี่ยงเบน (Depolarization).....	21
2.4 การทำนายการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝน.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 การทำนายการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝน ตามแบบจำลองของ Crane.....	21
2.4.2 การทำนายการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝน ตามแบบจำลองของ ITU-RP.618-11.....	26
2.5 เทคนิคการแก้ไขปัญหาการเกิดการลดทอนสัญญาณดาวเทียม.....	29
2.5.1 การควบคุมกำลังส่งประสิทธิผล (EIRP control techniques).....	29
2.5.2 การเปลี่ยนเทคนิคการส่งข้อมูล (Adaptive transmission techniques).....	30
2.5.3 การแก้ปัญหาโดยอาศัยเทคนิคความหลากหลาย (Diversity protection schemes).....	31
บทที่ 3 ความสัมพันธ์ทางสถิติของอัตราการตกของฝนและระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียม.....	34
3.1 ลักษณะทางกายภาพของอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณดาวเทียม.....	34
3.2 เปรียบเทียบผลการทำนายการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝนจาก แบบจำลองและค่าที่วัดได้จริง.....	41
3.3 ความสัมพันธ์เชิงเวลาระหว่างอัตราการตกของฝนและระดับการลดทอน สัญญาณดาวเทียม.....	44
3.4 ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน.....	47
บทที่ 4 แบบจำลองการประมาณค่าระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝน.....	54
4.1 แบบจำลองข้อมูล (Data model).....	54
4.2 วิธีการคาดหมาย – การหาค่าสูงสุด.....	55
4.2.1 ขั้นตอนการคาดหมาย (E-Step).....	56
4.2.2 ขั้นตอนการหาค่าสูงสุด (M-Step).....	58
4.2.3 ผลการจำลองการทำงานของ EM-algorithm.....	59
4.2.4 การทำนายค่าระดับการลดทอนสัญญาณจาก EM-algorithm.....	60
4.3 การทำนายคุณภาพสัญญาณดาวเทียม.....	63
บทที่ 5 การคาดคะเนการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน.....	65
5.1 เทคนิคการคาดคะเนการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินที่เวลาล่วงหน้า.....	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 การเลือกค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริธึม.....	69
5.2.1 การหาค่า Window size ที่เหมาะสม.....	69
5.2.2 การหาค่า Holding time ที่เหมาะสม.....	70
5.2.3 การหาค่า Advanced time ที่เหมาะสม.....	71
5.3 การทดสอบการทำงานของเทคนิคที่นำเสนอ.....	72
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
6.3 ทิศทางการวิจัยในอนาคต.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก. สมการการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าในขั้นตอนการหาค่าสูงสุด จาก EM-algorithm.....	83
ภาคผนวก ข. MATLAB source code สำหรับเทคนิคการคาดคะเนการสลับ สถานีภาคพื้นดิน.....	86
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	102

สารบัญญัตินี้

ตารางที่	หน้า
2.1 รายละเอียดดาวเทียมไทยคม 4.....	14
2.2 การแจกแจงอัตราการตกของฝน (R_p) ในเขตสภาพภูมิอากาศต่างๆ เทียบกับช่วงเวลา ร้อยละต่อปีที่อัตราการตกของฝนมากกว่าค่านั้นๆ.....	23
2.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าการลดทอนจำเพาะ $a = \alpha R_p^\beta$ (เดซิเบลต่อกิโลเมตร).....	24
3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองของ Crane สำหรับการคำนวณค่าการลดทอน สัญญาณดาวเทียมในบริเวณพื้นที่ประเทศไทย.....	41
3.2 อัตราการตกของฝนในบริเวณพื้นที่ประเทศไทยตามแบบจำลองของ Crane.....	41
3.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง ITU-R P.618 สำหรับการคำนวณค่าการลดทอน สัญญาณดาวเทียมในบริเวณพื้นที่ประเทศไทย.....	42
4.1 ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของความผิดพลาดจากการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า จาก EM-algorithm.....	59
4.2 ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า.....	62
4.3 ร้อยละของผลการทำนายคุณภาพสัญญาณที่ถูกต้องและคลาดเคลื่อน.....	64
5.1 ช่วงเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า.....	70
5.2 ช่วงเวลาการใช้งานการติดต่อสื่อสารที่สถานีสำรองที่เหมาะสม.....	70
5.3 ช่วงเวลาการทำนายล่วงหน้าที่เหมาะสม.....	71
5.4 คุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิมหลังการสลับสถานีภาคพื้นดิน.....	74

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนภาพการรับ-ส่งสัญญาณผ่านระบบสื่อสารดาวเทียม.....	1
1.2 ค่าการลดทอนกำลังงานสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ อันเนื่องมาจากปัจจัยในชั้นบรรยากาศ.....	2
2.1 ตำแหน่งของดาวเทียมแบบโคจรอยู่กับที่.....	7
2.2 แผนภาพระบบสื่อสารดาวเทียม.....	8
2.3 สเปคตรัมของความถี่ในย่านต่างๆ.....	11
2.4 ย่านความถี่ไมโครเวฟ.....	13
2.5 ดาวเทียมไทยคม 4 หรือ IPSTAR.....	13
2.6 งานสายอากาศสำหรับรับสัญญาณดาวเทียมไทยคม 4.....	14
2.7 พื้นที่ให้บริการของดาวเทียมไทยคม 4.....	15
2.8 โครงสร้างภายในเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบคานกระดก.....	19
2.9 การแบ่งเขตสภาพภูมิอากาศของโลกตามสภาพฝนจากแบบจำลองของ Crane.....	22
2.10 ระดับความสูงของเส้น 0 องศาเซลเซียสที่ช่วงเวลาร้อยละต่างๆ.....	24
2.11 แผนภาพแสดงระยะทางของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณการประมาณค่า การลดทอนอันเนื่องมาจากฝนจากแบบจำลอง ITU-R.....	27
2.12 ระยะห่างระหว่างสถานีภาคพื้นดินของเทคนิคการสลับสถานีภาคพื้นดิน.....	32
2.13 หลักการของการสลับวงโคจรดาวเทียม.....	33
3.1 ตัวอย่างข้อมูลปริมาณน้ำฝนในรูปแบบไฟล์ .csv ที่บันทึกได้.....	35
3.2 ปริมาณน้ำฝนสะสมในปี พ.ศ.2554.....	35
3.3 อัตราการตกของฝนในปี พ.ศ.2554.....	36
3.4 อัตราการตกของฝนสูงสุดในแต่ละชั่วโมงในปี พ.ศ.2554.....	36
3.5 ตัวอย่างข้อมูลสัญญาณนำร่องดาวเทียมไทยคม 4.....	37
3.6 ที่ตั้งของสถานีภาคพื้นดินไทยคมแครายและลาดหลุมแก้ว.....	37
3.7 ระดับสัญญาณนำร่องจากดาวเทียมไทยคม 4 และระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียม ไทยคม 4 ในปี พ.ศ. 2554.....	38
3.8 ระดับการลดทอนสัญญาณสถานีดาวเทียมไทยคม.....	39
3.9 แผนภาพการบันทึกข้อมูลสัญญาณนำร่องดาวเทียมและปริมาณน้ำฝน.....	40
3.10 ตัวอย่างกราฟข้อมูลปริมาณน้ำฝนและสัญญาณนำร่องดาวเทียมย่านความถี่เคเอ.....	40
3.11 เปรียบเทียบการลดทอนสัญญาณดาวเทียมจากแบบจำลองและระดับที่วัดได้จริง บริเวณสถานีแคราย.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 เปรียบเทียบการลดทอนสัญญาณดาวเทียมจากแบบจำลองและระดับที่วัดได้จริง บริเวณสถานีลาดหลุมแก้ว.....	43
3.13 ตัวอย่างอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณ.....	45
3.14 ตัวอย่างค่าสหสัมพันธ์ข้ามของอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณ.....	46
3.15 ฮิสโทแกรมค่าสหสัมพันธ์ข้ามจากเหตุการณ์การเกิดฝนที่สนใจ (90 เหตุการณ์).....	47
3.16 ฮิสโทแกรมค่าหน่วยเวลาระหว่างอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณ ที่เกิดจากค่าสหสัมพันธ์ข้ามสูงสุดจากเหตุการณ์การเกิดฝนที่สนใจ (90 เหตุการณ์).....	47
3.17 พื้นที่ของประเทศญี่ปุ่นที่ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน.....	48
3.18 แผนผังการคำนวณหาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน.....	49
3.19 ตัวอย่างเหตุการณ์การเกิดฝนอย่างน้อยร้อยละ 70 ของเมทริกซ์ฝนที่พิจารณา.....	49
3.20 ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน.....	50
3.21 ค่าอัตสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ในทิศทางต่างๆ แนวเหนือ - ใต้และตะวันตก - ตะวันออก.....	51
3.22 ค่าอัตสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ในทิศทางต่างๆ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือและทิศตะวันตกเฉียงเหนือ.....	52
4.1 แบบจำลองข้อมูลของ EM-algorithm.....	56
4.2 ตัวอย่างผลการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าตามหลักการของ EM-algorithm.....	60
4.3 เปรียบเทียบผลการทำนายค่าการลดทอนสัญญาณจากวิธีการที่นำเสนอกับค่าการลดทอนจริง.....	61
4.4 ลักษณะการลู่เข้าจากการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า.....	62
4.5 ฮิสโทแกรมของค่าที่ได้จากการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจากเหตุการณ์ การเกิดฝนที่สนใจ.....	63
4.6 ระดับการลดทอนสัญญาณที่ใช้กำหนดคุณภาพของสัญญาณดาวเทียม.....	64
5.1 ผังการทำงานของทดลองใช้เทคนิคการสลับสถานีดาวเทียม.....	65
5.2 คุณภาพของสัญญาณที่เพิ่มขึ้นในกรณีที่มีการสลับสถานีภาคพื้นดิน.....	66
5.3 แผนภาพการทำงานของการทำนายการสลับสถานีภาคพื้นดินที่นำเสนอ.....	67
5.4 ผังงานการทำนายการสลับสถานีภาคพื้นดินที่นำเสนอ.....	68
5.5 ปริมาณน้ำฝนสะสมในแต่ละเดือนในปี พ.ศ.2554.....	69
5.6 ช่วงเวลาการเกิดการลดทอนกำลังงานสัญญาณ.....	71
5.7 คุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิมหลังการสลับสถานีภาคพื้นดิน วันที่ 17-20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	72
5.8 คุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิมหลังการสลับสถานีภาคพื้นดิน วันที่ 2-5 มิถุนายน พ.ศ. 2554.....	72

สารบัญรูป (ต่อ)

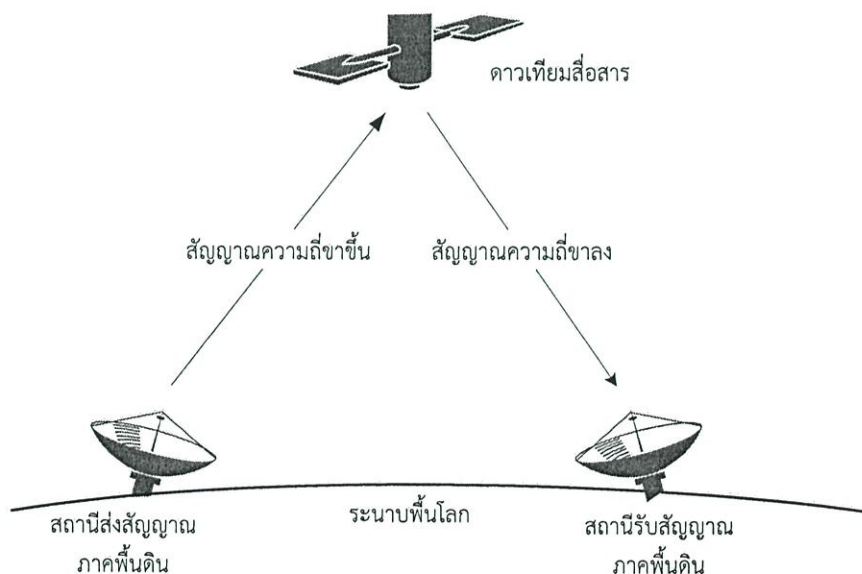
รูปที่	หน้า
5.9 คุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิมหลังการสลับสถานีภาคพื้นดิน วันที่ 11-14 กรกฎาคม พ.ศ. 2554.....	73
5.10 คุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิมหลังการสลับสถานีภาคพื้นดิน วันที่ 26-29 สิงหาคม พ.ศ. 2554.....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

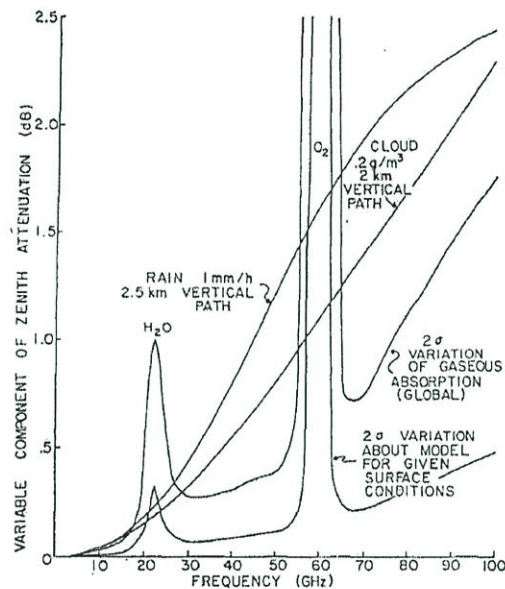
การสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นรูปแบบการสื่อสารทางโทรคมนาคมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการสื่อสารผ่านดาวเทียมมีพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารเป็นบริเวณกว้าง และสามารถรองรับการให้บริการที่หลากหลาย โดยระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนได้แก่ ดาวเทียมในอวกาศ, ระบบควบคุมและสั่งการ และสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน โดยหลักการทำงานของระบบการรับส่งสัญญาณผ่านระบบดาวเทียมแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 คือ สถานีภาคพื้นดินทำการส่งสัญญาณความถี่ขาขึ้น (Uplink) ที่มีกำลังงานส่งสูงผ่านจานสายอากาศภาคพื้นดินไปยังจานสายอากาศบนสถานีดาวเทียมในอวกาศ จากนั้นสถานีดาวเทียมในอวกาศจะทำการขยายสัญญาณรวมทั้งแปลงความถี่เพื่อส่งเป็นสัญญาณความถี่ขาลง (Downlink) ผ่านชั้นบรรยากาศมายังจานสายอากาศของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน และอุปกรณ์รับสัญญาณภาคพื้นดินจะทำการขยายสัญญาณที่ได้และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 1.1 แผนภาพการรับ-ส่งสัญญาณผ่านระบบสื่อสารดาวเทียม

วงโคจรสำหรับดาวเทียมเพื่อกิจการทางโทรคมนาคมจะมีระดับความสูงอยู่ที่ 35,786 กิโลเมตร และโคจรอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรสำหรับดาวเทียมสื่อสาร หากพิจารณาเส้นทางการแพร่คลื่นระหว่างภาคพื้นโลกและสถานีดาวเทียมในอวกาศจะพบว่าแนวการแพร่คลื่นของสัญญาณ

ดาวเทียมนั้นจะมีลักษณะเป็นแนวเอียง (Slant path) Robert K. Crane [1] ได้อธิบายถึงการลดทอนกำลังงานสัญญาณอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ในชั้นบรรยากาศของคลื่นไมโครเวฟ ดังรูปที่ 1.2 พบว่าปัจจัยหลักจากสภาพภูมิอากาศและชั้นบรรยากาศที่ส่งผลต่อการลดทอนกำลังงานสัญญาณในย่านความถี่ต่างๆ ของสัญญาณดาวเทียม เช่น C-band (4 - 8 กิกะเฮิรตซ์), Ku-band (12 - 18 กิกะเฮิรตซ์) และ Ka-band (27 - 40 กิกะเฮิรตซ์) คือ ฝน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับประเทศไทยที่มีพื้นที่ตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตร ลักษณะสภาพภูมิอากาศเป็นแบบร้อนชื้น จึงทำให้พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยมีฝนตกชุก การศึกษาลักษณะและพฤติกรรมของฝน และผลกระทบของฝนต่อการลดทอนสัญญาณดาวเทียมจึงมีความสำคัญเพื่อรักษาคุณภาพของสัญญาณดาวเทียมสำหรับผู้ใช้งาน



รูปที่ 1.2 ค่าการลดทอนกำลังงานสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ อันเนื่องมาจากปัจจัยในชั้นบรรยากาศ [1]

วิธีการที่ผู้ให้บริการการสื่อสารผ่านดาวเทียมนำมาใช้ในการรักษาความต่อเนื่องของการสื่อสาร เมื่อสัญญาณไมโครเวฟเกิดการจางหายอันเนื่องมาจากการเกิดฝน (Rain fading) นั้นมีด้วยกันหลากหลายวิธี [2] เช่น การเพิ่มจำนวนสถานีรับและเลือกใช้งานสถานีรับที่ได้รับผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนที่ต่ำกว่า (Site Diversity) [3]-[4], การเปลี่ยนการรับส่งสัญญาณไปยังดาวเทียมดวงอื่น (Orbital Diversity) [5]-[6], การเปลี่ยนย่านความถี่ในการใช้งานมาใช้งานในช่วงความถี่ที่ได้รับผลกระทบจากการจางหายที่ต่ำกว่า (Frequency Diversity) [7]-[8] และการส่งข้อมูลซ้ำ (Time Diversity) [9]-[10] เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วการรักษาความต่อเนื่องของระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม นั้น จำเป็นที่จะต้องอาศัยข้อมูลการทำนายช่วงเวลาการเกิดฝนที่จะส่งผลกระทบต่อการสื่อสารผ่านดาวเทียม ในอดีตที่ผ่านมา มีการนำเสนอแบบจำลองสำหรับการทำนายค่าการลดทอนอันเนื่องมาจากฝน ตัวอย่างเช่น

แบบจำลองของ Crane [11], แบบจำลอง ITU-R [12], แบบจำลอง DAH [13] หรือในงานวิจัยของ Lin [14] โดยอาศัยข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสมแบบรายปี ซึ่งวิธีการนี้มีข้อจำกัด คือ ปริมาณของข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลนั้นต้องมีปริมาณมากเพียงพอต่อการทำนายการเกิดการลดทอนกำลังงานสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนในแต่ละปีเพื่อให้เกิดความแม่นยำ, การแบ่งเขตพื้นที่สภาพภูมิอากาศที่ไม่ครอบคลุมและไม่สอดคล้องกับตำแหน่งที่ตั้งของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินที่ใช้งานอยู่ในพื้นที่จริง, ความผิดพลาดอันเนื่องมาจากเครื่องมือที่ใช้ในการบันทึก และนอกจากนี้แบบจำลองดังกล่าวยังไม่สามารถนำมาประมวลผลในระบบค่าเวลาจริงได้ (Real Time Processing) แต่สามารถให้การประมาณค่าการลดทอนสัญญาณแบบรายปีเพื่อใช้ในการออกแบบระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมให้สามารถทนต่อการรบกวนสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนในพื้นที่นั้นๆ ได้ ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยที่ทำการศึกษาลักษณะของฝนต่อการรับ-ส่งสัญญาณในแนวแพร่คลื่นสำหรับประเทศไทย [15] ซึ่งเป็นการศึกษาการทำนายการลดทอนสัญญาณจากดาวเทียมไทยคม 5 แบบรายปี ซึ่งเป็นปริมาณทางสถิติแบบระยะยาว และทำการเปรียบเทียบค่าการลดทอนที่ได้จากแบบจำลองการทำนายการลดทอนสัญญาณและค่าที่วัดได้จริงในพื้นที่ หรืองานวิจัยที่ทำการศึกษาในพื้นที่ประเทศมาเลเซีย [16] ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบการประมาณการลดทอนสัญญาณดาวเทียมในย่านความถี่เคยู จากแบบจำลองต่างๆ คือ Bryant, Garcia และ Crane เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานในพื้นที่

ในการใช้งานระบบการสื่อสารในย่านความถี่สูง เช่น การใช้งานระบบการสื่อสารดาวเทียมในย่านความถี่เคเอ ซึ่งฝนมีผลกระทบต่อคุณภาพของระดับสัญญาณดาวเทียมเป็นอย่างมาก การทำนายค่าการลดทอนสัญญาณในระบบเวลาจริงในช่วงเวลาการเกิดฝนจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการออกแบบระบบสำหรับการรักษาคุณภาพสัญญาณดาวเทียม มีการนำเสนอการประมาณค่าการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝนในระบบเวลาจริง [17] - [19] โดยในงานวิจัย [17] นำเสนอแบบจำลองการทำนายระดับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้งานในย่านความถี่เคเอหรือในย่านความถี่ที่สูงขึ้นไป โดยให้ผลการประมาณค่าที่ดีสำหรับช่วงเวลาที่ระดับสัญญาณเป็นปกติ แต่ในช่วงเวลาที่เกิดฝนและเกิดการลดทอนสัญญาณยังให้ผลการทำนายที่ไม่ดีมากนัก ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากช่วงเวลาการเกิดฝนและการลดทอนสัญญาณเกิดในเวลาที่แตกต่างกัน ส่วนในงานวิจัย [18] และ [19] นำเสนอการใช้เทคนิค Synthetic storm ในการแปลงอัตราการตกของฝนในเชิงเวลาเป็นระดับการลดทอนสัญญาณ การใช้เทคนิคการประมาณค่าแบบ Synthetic storm มีพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบคือ ระยะทางการแพร่คลื่นผ่านกลุ่มฝน, ความเร็วของกลุ่มฝน และอัตราการตกของฝนที่สถานีภาคพื้นดินที่สนใจ เทคนิคนี้มีข้อจำกัดในด้านของความเร็วของกลุ่มฝนที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่ ดังผลการวิเคราะห์จากงานวิจัย [19]

วิธีการรักษาความต่อเนื่องของการสื่อสารดาวเทียมที่เป็นที่น่าสนใจ คือ การสลับสถานีรับภาคพื้นดิน เนื่องจากเป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย ได้ผลดี และเหมาะสมกับทรัพยากรของผู้ให้บริการในประเทศไทย ในการใช้เทคนิคการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน หากผู้ให้บริการสามารถทำนาย

ระดับการลดทอนสัญญาณที่เวลาล่วงหน้าได้ และทำการสลับการรับ-ส่งสัญญาณดาวเทียมไปใช้งานที่สถานีสำรอง เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบอันเนื่องมาจากฝนที่ทำให้สัญญาณด้อยคุณภาพลง จะส่งผลให้ระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างข้อมูลอัตราการตกของฝนและค่าการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมในพื้นที่ประเทศไทย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการทำนายช่วงเวลาของความไม่ต่อเนื่องของการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยวิธีการที่นำเสนออยู่ในวิทยานิพนธ์นี้อาศัยเทคนิคการประมวลสัญญาณทางสถิติ (Statistical Signal Processing) มาใช้ในการทำนายอัตราการลดทอนกำลังงานสัญญาณดาวเทียมที่เวลาล่วงหน้า เพื่อประโยชน์ในการคาดคะเนการสลับสถานีภาคพื้นดิน (Ground station site switching) ในการใช้งานเพื่อรับส่งสัญญาณในช่วงเวลาก่อนฝนตกหนักจนเกิดการด้อยคุณภาพของสัญญาณดาวเทียม เพื่อรักษาคุณภาพของสัญญาณดาวเทียมให้ยังคงสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องไม่เกิดการติดขัดหรือจางหาย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษาลักษณะและพฤติกรรมของฝน ณ สถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน
- 2) เพื่อศึกษาลักษณะความสัมพันธ์และผลกระทบของฝนต่อการลดทอนสัญญาณดาวเทียมในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่
- 3) เพื่อศึกษาและออกแบบเทคนิคการประมาณค่าระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝน
- 4) เพื่อพัฒนาเงื่อนไขการคาดคะเนการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินเพื่อรักษาคุณภาพของสัญญาณ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเวลาระหว่างอัตราการตกของฝนและระดับการลดทอนสัญญาณนำร่องจากดาวเทียมไทยคม 4 ย่านความถี่เคเอ ในระยะเวลาทั้งสิ้น 1 ปี (พ.ศ. 2554) ณ สถานีดาวเทียมภาคพื้นดินไทยคมแควрай และศึกษาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน ซึ่งมีผลต่อการตั้งสถานีสำรอง โดยใช้ข้อมูลอัตราการตกของฝนในรูปแบบของข้อมูลเรดาร์บริเวณพื้นที่ Kanto, Kansai และ Kyushu ของประเทศญี่ปุ่นเป็นกรณีศึกษา จากนั้นได้พัฒนาเทคนิคการประมาณค่าระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมทั้งนำเสนออัลกอริธึมการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน ในกรณีที่การรับ-ส่งสัญญาณดาวเทียมที่สถานีภาคพื้นดินหลักเกิดการด้อยคุณภาพของสัญญาณดาวเทียมอันมีสาเหตุมาจากฝนในบริเวณพื้นที่

ดังกล่าว โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการทำนายค่าการลดทอนสัญญาณที่เวลาส่งหน้าที่ได้พัฒนาขึ้น โดยที่ มาและวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้ถูกอธิบายไว้ในบทที่ 1 เนื้อหาในบทที่ 2 เป็นการอธิบายถึงพื้นฐานของระบบการสื่อสารดาวเทียม, การวัดรวมถึงการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนและผลกระทบจากฝนที่มีต่อการสื่อสารผ่านระบบดาวเทียม รวมทั้งอธิบายขั้นตอนการคำนวณคาดคะเนการลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนโดยใช้แบบจำลองที่นิยมใช้งานโดยทั่วไป คือ แบบจำลองของ Crane และแบบจำลอง ITU-R P.618 นอกจากนี้ในส่วนท้ายจะมีการกล่าวถึงเทคนิคการรักษาคุณภาพสัญญาณดาวเทียมต่างๆ ที่ผู้ให้บริการการสื่อสารผ่านดาวเทียมนำมาใช้งาน ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงลักษณะทางกายภาพของอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณดาวเทียม รวมทั้งความสัมพันธ์ทางสถิติในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนต่อการลดทอนสัญญาณดาวเทียม โดยมีการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะนำมาอธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณทั้งสองในเชิงสถิติและใช้สำหรับการทำนายค่าการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝน บทที่ 4 เป็นส่วนของแบบจำลองการประมาณค่าระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝน โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ บทที่ 5 จะกล่าวถึงวิธีการคาดคะเนการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินที่นำเสนอ รวมทั้งผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวิธีดังกล่าว ในส่วนสุดท้าย คือ การสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะจะกล่าวถึงในบทที่ 6

บทที่ 2

ระบบสื่อสารดาวเทียมและผลกระทบอันเนื่องมาจากฝน

2.1 ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม

การรับส่งข้อมูลเพื่อใช้ในการสื่อสารแบบไร้สาย เป็นการสื่อสารที่อาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นสื่อกลางในการนำส่งข้อมูลผ่านตัวกลางที่เป็นชั้นบรรยากาศไปยังจุดหมายที่ต้องการ โดยทั่วไปแล้วการสื่อสารไร้สายภาคพื้นดิน (Terrestrial communication) จะอาศัยการส่งสัญญาณแบบแนวเส้นสายตา (Line of sight) เพื่อป้องกันไม่ให้ส่วนโค้งของโลกมากีดขวางแนวการแพร่สัญญาณ ดังนั้นจึงส่งผลให้การสื่อสารไร้สายภาคพื้นดิน ไม่สามารถใช้รับหรือส่งสัญญาณในระยะทางที่ไกลมากๆ ได้ ซึ่งแตกต่างจากการสื่อสารผ่านระบบดาวเทียม (Satellite communication)

ดาวเทียม คือ สิ่งประดิษฐ์ที่มนุษย์คิดค้นขึ้น เพื่อทำหน้าที่เป็นสถานีทวนสัญญาณ (Repeater) ในการรับ-ส่งข้อมูล การโคจรรอบโลกของดาวเทียมนั้นจะอาศัยแรงดึงดูดของโลกส่งผลให้สามารถโคจรรอบโลกได้ในลักษณะเดียวกันกับที่ดวงจันทร์โคจรรอบโลกหรือโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ทางการทหาร การสื่อสาร การรายงานสภาพอากาศ การวิจัยทางวิทยาศาสตร์ เช่น การสำรวจทางธรณีวิทยา สังเกตการณ์สภาพของอวกาศ โลก ดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ และดาวอื่นๆ รวมถึงการสังเกตวัตถุ และดวงดาว กาแล็กซีต่างๆ วงโคจรของดาวเทียมอาจเป็นวงกลมหรือวงรีก็ได้ ดาวเทียมที่ส่งไปโคจรเหนือผิวโลก แบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ได้แก่

1) ดาวเทียมแบบโคจรตามขั้วขั้ว

เป็นดาวเทียมรุ่นแรกๆ ที่มนุษย์ส่งขึ้นไปโคจรเหนือพื้นผิวโลก ในสมัยนั้นระบบการส่งและการควบคุมยังไม่ดีเท่าที่ควร ดาวเทียมแบบนี้แต่ละดวงมีวงโคจรของตัวเองแตกต่างจากดวงอื่นๆ ระดับความสูงแต่ละดวงจะแตกต่างกัน เป็นดาวเทียมที่บังคับวงโคจรและระดับความสูงไม่ได้

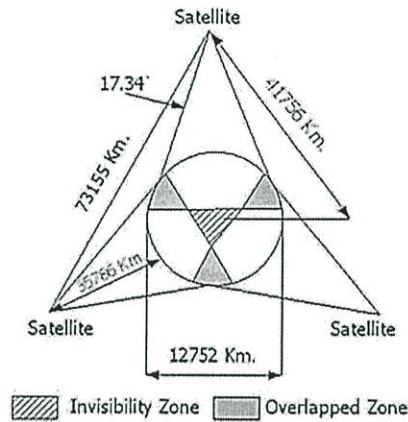
2) ดาวเทียมแบบเฟส

เป็นดาวเทียมที่มีแนวทางโคจรแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ที่จะให้ดาวเทียมโคจรผ่านตำแหน่งใด เช่น โคจรตามแนวเส้นศูนย์สูตร โคจรเอียงเป็นมุม 30 องศาเทียบกับเส้นศูนย์สูตร โคจรผ่านขั้วโลก เป็นต้น ดาวเทียมแบบนี้เป็นระบบดาวเทียมที่บังคับเส้นทางโคจรได้ เช่น ดาวเทียมสำรวจทรัพยากร ดาวเทียมทำจารกรรม เป็นต้น

3) ดาวเทียมแบบโคจรอยู่กับที่

เป็นดาวเทียมที่ใช้เพื่อการสื่อสาร โดยส่งขึ้นไปให้มีระดับความสูงประมาณ 35,860 กิโลเมตร โคจรตามแนวเส้นศูนย์สูตรไปทางทิศตะวันออก มีความเร็วในการโคจรรอบโลกครบ 1 รอบเท่ากับที่โลกหมุนรอบตัวเองหนึ่งรอบ ดังนั้นเมื่อสังเกตดูดาวเทียมจากพื้นโลก ณ จุดใดจุดหนึ่ง จึงดูเหมือนว่า

ดาวเทียมลอยนิ่งอยู่กับที่จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ดาวเทียมค้างฟ้า ดาวเทียมแบบนี้เป็นดาวเทียมที่ใช้เพื่อการสื่อสาร ถ้ามีดาวเทียมเพียง 3 ดวง ณ ตำแหน่งเหนือมหาสมุทรแอตแลนติก มหาสมุทรแปซิฟิก และมหาสมุทรอินเดีย ก็จะสามารถครอบคลุมการสื่อสารได้ทั่วโลก ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตำแหน่งของดาวเทียมแบบโคจรอยู่กับที่ [20]

2.1.1 โครงสร้างของระบบสื่อสารดาวเทียม

ในระบบการสื่อสารดาวเทียมจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ดาวเทียม, ระบบควบคุมและสั่งการ และสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน โดยมีหลักการทำงานพื้นฐานดังรูปที่ 2.2 คือ สถานีภาคพื้นดินจะส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink) กำลังสูงผ่านจานสายอากาศไปยังจานสายอากาศของดาวเทียม จากนั้นดาวเทียมจะทำการขยายสัญญาณให้กำลังสูงและแปลงความถี่ก่อนส่งสัญญาณผ่านจานสายอากาศเป็นสัญญาณขาลง (Downlink) มายังจานสายอากาศรับสถานีภาคพื้นดิน สถานีรับจะทำการขยายสัญญาณแล้วดำเนินการวิธีนำข้อมูลต่างๆ ไปใช้งาน

โดยโครงสร้างของระบบสื่อสารดาวเทียมจะสามารถแบ่งส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

2.1.1.1 สถานีภาคพื้นดิน (Earth Station)

ประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือระบบจานสายอากาศ, ระบบการส่ง, ระบบการรับ และอุปกรณ์ช่องสัญญาณ โดยมีภาคย่อยที่สำคัญ คือ

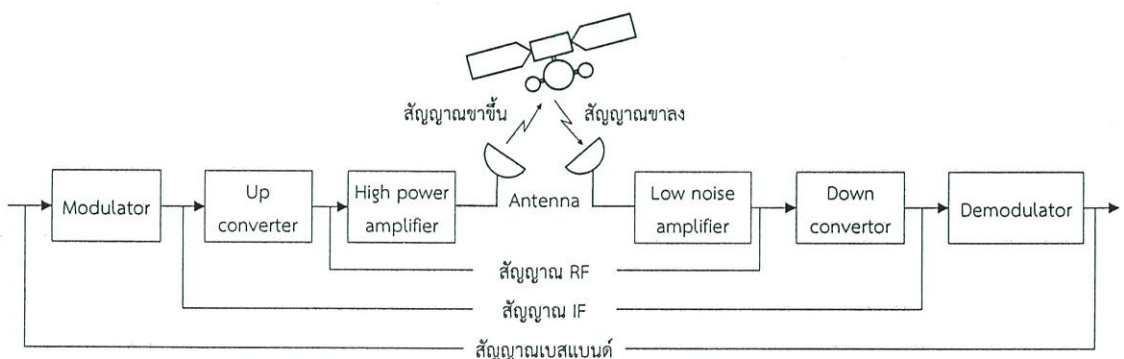
- 1) จานสายอากาศ (Antenna) ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นสัญญาณขาขึ้นไปยังดาวเทียมและทำหน้าที่รับคลื่นสัญญาณขาลงมาเข้าเครื่องรับจานสายอากาศที่ดีต้องมีคุณสมบัติ อัตราขยายกำลังสูง, ลำคลื่น (Beamwidth) แคบ, ลำคลื่นข้าง (Sidelobe) ต่ำ, ค่า Noise Temperature ต่ำ และมีความเที่ยงตรงสูง สามารถปรับทิศทางไปยังตำแหน่งดาวเทียมได้ตามต้องการ ปกตินิยมใช้สายอากาศแบบพาราโบลาโดยเป็นตัวสะท้อนสัญญาณ (Reflector) เพื่อให้รวมลำคลื่นได้แคบ ขนาดของจานสายอากาศโดยทั่วไปขึ้นกับความถี่ใช้งาน ความถี่ยิ่งสูงขนาดจานสายอากาศยิ่งเล็ก เช่น จานสายอากาศย่านความถี่ Ku-band จะเล็กกว่าย่านความถี่ C-band

นอกจากนี้ยังขึ้นกับอัตราขยายกำลัง (Gain) ของสายอากาศ ถ้าต้องการอัตราขยายกำลังขยายสูง งานสายอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถติดตามตำแหน่งดาวเทียมได้แม่นยำงานสายอากาศจะต้องมีระบบควบคุมการหันของงานสายอากาศทั้งทางมุมกวาด (Azimuth) และทางมุมเงย (Elevation) ค่า G/T หรืออัตราขยาย (Gain) ต่อ สัญญาณรบกวนจากอุณหภูมิ (Thermal noise) จะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของงานสายอากาศ

2) ภาคขยายกำลังสูง (High Power Amplifier: HPA) ทำหน้าที่ขยายกำลังสัญญาณให้สูงก่อนส่งออกอากาศ โดยใช้หลอด Klystron, TWT (Travelling Wave Tube) หรือ Solid State เป็นภาคขยายกำลัง หลอด Klystron จะให้กำลังขยายค่อนข้างสูงแต่ค่อนข้างยุ่งยากส่วนการใช้งาน TWT คลื่นจะถูกขยายโดยที่มีความถี่เท่าเดิม แต่มีขนาดใหญ่ขึ้น TWT เป็นอุปกรณ์ที่มีช่วงความถี่กว้าง ซึ่งการนำไปใช้ในบางอย่างอาจเกิดปัญหาขึ้นได้ บางครั้งจึงมีการต่อร่วมกับตัวกรอง (Filter) เพื่อลดระดับของสัญญาณรบกวนลง ส่วนการใช้งานแบบ Solid State ที่เรียกว่า SSPA (Solid State Power Amplifier) ให้กำลังขยายไม่สูงนักแต่สะดวกในการใช้งาน ส่วนภาคขยายปานกลางและมีใช้งานมากพอสมควร

3) ภาคขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise Amplifier: LNA) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณกำลังต่ำมากๆ ที่เครื่องรับรับได้เพื่อให้มีกำลังพอที่จะนำมาใช้งาน โดยให้มีสัญญาณรบกวนต่ำที่สุดซึ่งจะดูคุณสมบัติได้จากอุณหภูมิของสัญญาณรบกวน (Noise Temperature) มีหน่วยเป็นเคลวิน

4) ภาคแปลงความถี่ขาขึ้น (Up Converter) และภาคแปลงความถี่ขาลง (Down Converter) ภาคแปลงความถี่ขาขึ้นทำหน้าที่แปลงความถี่ Intermediate frequency (IF) ให้เป็นความถี่ในย่านที่ใช้ในการส่งสัญญาณ



รูปที่ 2.2 แผนภาพระบบสื่อสารดาวเทียม

2.1.1.2 ดาวเทียม (Satellite)

ดาวเทียมมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือระบบควบคุมตำแหน่งและวงโคจร, ระบบตรวจจับและสั่งการดาวเทียม, ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า, ระบบสื่อสารของดาวเทียมและระบบสายอากาศดาวเทียม

1) ระบบควบคุมตำแหน่งและวงโคจรดาวเทียมปกติจะประกอบด้วยมอเตอร์จรวดที่คอยทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนวงโคจรดาวเทียม ให้อยู่ในวงโคจรที่ถูกต้องเมื่อเกิดการคลาดเคลื่อนมายังตำแหน่งบนพื้นโลกอย่างถูกต้อง ระบบการควบคุมตำแหน่งอาจใช้ตัวดาวเทียมหมุนที่เรียกว่า Spinners หรือใช้ Momentum wheels ช่วย วิธีหลังเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เพราะทำให้ลดขนาดแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cells) ลงได้ถึง 1/3 เท่า ส่วนระบบควบคุมวงโคจรนั้นจะใช้ Gas Jet ควบคุมวงโคจรให้อยู่ในระนาบเส้นศูนย์สูตร

2) ระบบตรวจจับและสั่งการดาวเทียม (Telemetry, Tracking and Command: TT&C) ระบบนี้มีทั้งส่วนที่อยู่บนดาวเทียมและบนพื้นดินทำงานสัมพันธ์กัน โดย Telemetry จะส่งข้อมูลได้จากการตรวจจับ (Sensor) สัญญาณควบคุมต่างๆ บนดาวเทียม แล้วส่งกลับมายังสถานีภาคพื้นดิน ระบบ Tracking บนภาคพื้นดินจะติดตามดาวเทียมและรับสัญญาณจากระบบ Telemetry ส่งให้ระบบ Command นำเอาสัญญาณไปประมวลในระบบคอมพิวเตอร์เป็นสัญญาณสั่งการส่งไปยังดาวเทียม เพื่อปรับแก้ตำแหน่งวงโคจรและระบบควบคุมต่างๆ ในตัวดาวเทียมให้ถูกต้อง

3) ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าดาวเทียมทุกแบบได้รับพลังงานมาจากแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้ในระบบสื่อสารของดาวเทียมโดยเฉพาะภาคส่งพลังงานที่เหลือจะไปใช้ในส่วนอื่นๆ

4) ระบบสื่อสารดาวเทียมเป็นส่วนประกอบหลักของดาวเทียมสื่อสารระบบอื่นๆ เป็นเพียงส่วนสนับสนุนระบบนี้จะประกอบด้วยจานสายอากาศที่คอยรับส่งสัญญาณแบนด์กว้าง, ภาครับ-ส่ง และขยายกำลังของสัญญาณที่เรียกว่าทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ซึ่งเป็นหน่วยรับ-ส่งสัญญาณแต่ละช่องในตัวดาวเทียม

5) ระบบสายอากาศระบบนี้อาจถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของระบบสื่อสารดาวเทียมโดยแยกออกมาจากทรานสปอนเดอร์ ปัจจุบันดาวเทียมมีระบบจานสายอากาศที่ซับซ้อนเพื่อให้สามารถแยกลำคลื่น (Beam) ส่งมาครอบคลุมพื้นโลกในรูปแบบต่างๆ ได้ตามต้องการ

2.1.2 การแบ่งประเภทของดาวเทียมตามรูปแบบการใช้งาน

ดาวเทียมแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 5 ประเภท ดังนี้

2.1.2.1 ดาวเทียมระหว่างประเทศ (International Communication Satellite) เป็นดาวเทียมที่ใช้ในกิจการโทรคมนาคมระหว่างประเทศ เช่น ดาวเทียม INTELSAT

2.1.2.2 ดาวเทียมภายในประเทศหรือภูมิภาค (Domestic and regional Satellite) เป็นดาวเทียมที่ใช้ภายในแต่ละประเทศหรือภายในกลุ่มประเทศใกล้เคียงในภูมิภาคเดียวกัน เช่น ดาวเทียม PALAPA ของอินโดนีเซีย, ASIASAT ของฮ่องกง, THAICOM ของไทย เป็นต้น

2.1.2.3 ดาวเทียมทางทหาร (Military Communication Satellite) เป็นดาวเทียมเพื่อใช้ในทางทหารโดยเฉพาะปกติใช้ย่านความถี่ X-Band (8/7 กิกะเฮิรตซ์) เช่น ดาวเทียม DSCS (Defense Satellite Communication System) ของสหรัฐอเมริกาที่ใช้ในการสื่อสารทางทหารทั่วโลก เป็นต้น

2.1.2.4 ดาวเทียมสำหรับการส่งโทรทัศน์และความมุ่งหมายพิเศษ (Broadcast and Special purpose satellite) เป็นดาวเทียมที่ออกแบบมาใช้ทั้งภายในประเทศและภูมิภาคเพื่อส่งสัญญาณโทรทัศน์กำลังสูงมายังงานสายอากาศรับสัญญาณขนาดเล็กของผู้ชมจำนวนมาก นิยมใช้ย่านความถี่ Ku-Band ส่วนดาวเทียมที่ใช้ในความมุ่งหมายพิเศษ เช่น MARISAT หรือ INMARSAT ในปัจจุบันใช้ในการนำทาง (Navigation) ติดต่อกับยานพาหนะเคลื่อนที่ทางบก ทางเรือและทางเครื่องบิน

2.1.2.5 ดาวเทียมเพื่อการทดลองหรือใช้ในทางวิทยาศาสตร์ (Experimental Satellite) เป็นดาวเทียมที่ใช้ในการทดลองต่างๆ หรือเพื่อสำรวจอวกาศที่อยู่ไกลออกไป เช่น ดาวเทียมฮับเบิล (Hubble) ซึ่งเป็นเสมือนกล้องโทรทัศน์ขนาดใหญ่ที่โคจรรอบโลก

2.1.3 วงโคจรดาวเทียม

วงโคจรดาวเทียม (Satellite Orbit) สามารถแบ่งเป็นลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้

2.1.3.1 แบ่งประเภทตามเส้นทางวงโคจร สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ วงโคจรตามแนวเส้นศูนย์สูตร (Equatorial Orbit), วงโคจรเอียง (Inclined Orbit) ทำมุมกับเส้นศูนย์สูตร และวงโคจรขั้วโลก (Polar Orbit) ตามแนวขั้วโลกเหนือใต้

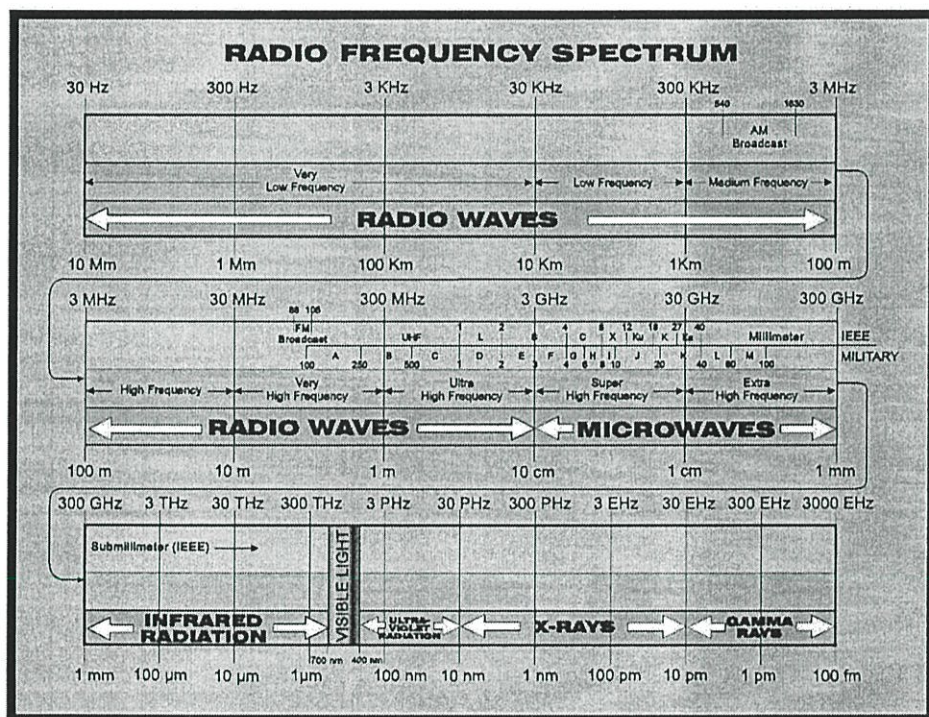
2.1.3.2 แบ่งประเภทตามรูปร่างลักษณะวงโคจร แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือวงโคจรวงกลม (Circular Orbit) ซึ่งระยะความสูงจากพื้นโลกใกล้เคียงกันโดยตลอด และวงโคจรรี (Elliptical Orbit) ซึ่งความสูงจากพื้นโลกต่างกันมากโดยระยะห่างจากโลกมากที่สุดเรียกว่า Apogee และระยะห่างจากโลกใกล้สุดเรียกว่า Perigee

2.1.3.3 แบ่งประเภทตามความสูงของวงโคจร แบ่งได้ 3 แบบ คือดาวเทียมวงโคจรค้างฟ้า (GEO Synchronous หรือ GEO Stationary Orbit: GEO) อยู่สูงจากพื้นโลกประมาณ 22,300 ไมล์ หรือประมาณ 36,000 กิโลเมตร, ดาวเทียมวงโคจรต่ำ (Low-Earth Satellite: LEO) ความสูงต่ำกว่า 1,250 ไมล์ และดาวเทียมวงโคจรปานกลาง (Medium-Earth Satellite: MEO) จะอยู่ระหว่างความสูงของวงโคจร LEO กับวงโคจร GEO

ปัญหาที่พบเกี่ยวกับวงโคจรดาวเทียมนั้นเกิดจากในปัจจุบันมีดาวเทียมเป็นจำนวนมากในอวกาศ ทำให้ตำแหน่งอาจทับซ้อนกันโดยเฉพาะดาวเทียมวงโคจรค้างฟ้า ดังนั้น International Telecommunication Union (ITU) จึงกำหนดให้ดาวเทียมประเภทนี้มีตำแหน่งในวงโคจรให้ห่างกันอย่างน้อย 2 องศา เพื่อไม่ให้สัญญาณรบกวนกัน

2.1.4 ความถี่สัญญาณดาวเทียม

ดาวเทียมแต่ละดวงนั้นเป็นเหมือนสถานีทวนสัญญาณ (Repeater) ซึ่งติดตั้งอยู่สูงถึง 35,860 กิโลเมตรจากพื้นโลก จึงต้องทำหน้าที่เป็นทั้งเครื่องรับและเครื่องส่งเพื่อติดต่อกับสถานีภาคพื้นดิน โดยสถานีภาคพื้นดินจะส่งสัญญาณในช่วง "ขาขึ้น" ที่ความถี่หนึ่งซึ่งเรียกว่า Uplink ไปให้ดาวเทียม เมื่อดาวเทียมได้รับก็จะทำการเปลี่ยนความถี่ที่รับได้ให้เป็นอีกความถี่หนึ่งและส่งกลับมาให้สถานีภาคพื้นดินอื่นๆ ซึ่งสัญญาณที่ส่งลงมาจากดาวเทียมจะเรียกว่า Downlink หรือความถี่ "ขาลง"



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของความถี่ในย่านต่างๆ [21]

ITU ได้ทำการจัดสรรและควบคุมการใช้ความถี่ในกิจการต่างๆ ทั้งในประเทศและระหว่างประเทศ เพื่อไม่ให้เกิดการทับซ้อนและรบกวนกัน ความถี่ที่ใช้กับดาวเทียมจะใช้หลักการเรียกชื่อคล้ายกับที่ใช้ในเรดาร์และไมโครเวฟ แต่ความถี่ใช้งานอาจแตกต่างกันบ้างตามภารกิจและวิธีการใช้งานความถี่นั้นๆ เช่น L-band, C-band, Ku-band, X-band และ Ka-band เป็นต้น ความถี่ที่นิยมใช้กันมากคือ ความถี่ย่าน C-band สัญญาณความถี่ขาขึ้นใช้ย่านความถี่ 6 กิกะเฮิรตซ์ และสัญญาณความถี่ขาลงใช้ย่านความถี่ 4 กิกะเฮิรตซ์ จึงนิยมเรียกว่า 6/4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งความถี่ C-band นี้อาจ

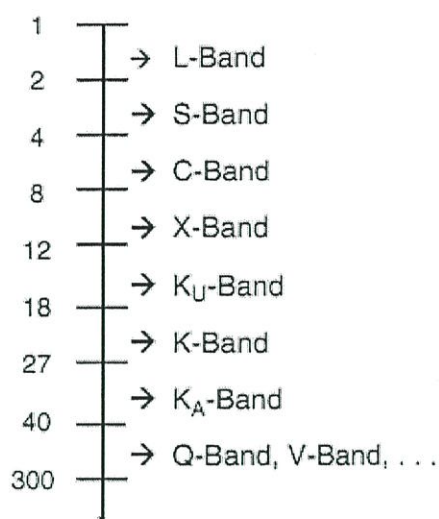
รบกวนกับการสื่อสารผ่านคลื่นไมโครเวฟบนภาคพื้นดินได้ง่าย ความถี่ที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน คือ Ku-band ใช้ความถี่ขาขึ้น 12-14 กิกะเฮิร์ตซ์ และใช้ความถี่ขาลง 11-18 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยประมาณ และ Ka-band ใช้ความถี่ขาขึ้น 30 กิกะเฮิร์ตซ์ และความถี่ขาลง 20 กิกะเฮิร์ตซ์ แต่มีข้อเสียหลักคือ สัญญาณจะถูกลดทอนกำลังงานจากเมฆฝนค่อนข้างมากโดยการแบ่งแถบแสดงความถี่ในย่านต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.3

ดาวเทียมทุกดวงที่ใช้อยู่นี้จะมีช่องสัญญาณซึ่งเรียกว่า ทรานสปอนเดอร์ ซึ่งมีหลายรูปแบบเพื่อใช้กับการสื่อสารลักษณะต่างๆ กัน ดาวเทียมแต่ละดวงสามารถจะมีทรานสปอนเดอร์ได้มากถึง 24 ช่อง หรือมากกว่านั้น เพื่อใช้ในงานต่างๆ ได้อย่างครบถ้วน โดยแต่ละช่องสามารถใช้ถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์ได้หนึ่งสัญญาณหรือสามารถรับ-ส่งสัญญาณโทรศัพท์พูดติดต่อกันได้เป็นจำนวนหลายพันคู่สายสัญญาณความถี่ในทุกๆ ทรานสปอนเดอร์จะมีการจัดขั้วของคลื่น (Polarization) เอาไว้ให้มีทั้งขั้วทางแนวตั้ง (Vertical) และขั้วทางแนวนอน (Horizontal) เพื่อให้เหมือนกับการขยายช่องสัญญาณจากย่านความถี่ที่มีจำนวนจำกัดให้ได้ช่องสัญญาณมากขึ้น ในการรับสัญญาณที่สถานีภาคพื้นดินนั้นสามารถแยกรับได้ด้วยตนเองว่าจะรับทางแนวตั้งหรือแนวนอนหรือจะรับทั้ง 2 แนวก็ได้ ซึ่งดาวเทียมจำนวนมาก จะมีทรานสปอนเดอร์ที่รับ-ส่งสัญญาณทางแนวตั้งและแนวนอนอย่างละ 12 ทรานสปอนเดอร์ และมีความถี่ซ้อนกันอยู่ แต่จะไม่เกิดการรบกวนของสัญญาณ (Interference) กันเอง

2.1.4.1 ย่านความถี่เคเอ (Ka-band)

ย่านความถี่เคเอครอบคลุมความถี่ 27-40 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยที่ Ka-band เป็นส่วนหนึ่งของ K-band ในย่านความถี่ไมโครเวฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยความถี่ขาขึ้นและขาลงอยู่ที่ 30/20 กิกะเฮิร์ตซ์ ในระบบการสื่อสาร Ka-band ให้การสื่อสารในแถบความถี่ (Bandwidth) กว้าง และมีแนวโน้มการใช้งานที่สูงขึ้นในอนาคตเนื่องจากการสื่อสารที่ใช้ความถี่สูงขึ้น จะทำให้สามารถส่งข้อมูลได้มากขึ้นและขนาดของจานสายอากาศรับสัญญาณมีขนาดเล็กลงแต่อย่างไรก็ตาม Ka-band จะมีผลกระทบจากสภาพภูมิอากาศมากกว่า C-band หรือ Ku-band โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากฝน ทำให้การสื่อสารขาดหายไปชั่วขณะในช่วงเวลาที่เกิดฝน

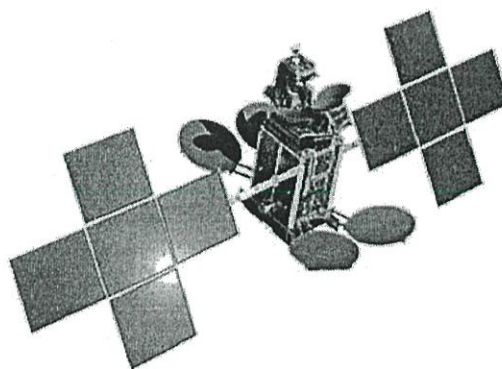
Frequency (GHz)



รูปที่ 2.4 ย่านความถี่ไมโครเวฟ [22]

2.1.5 ดาวเทียมไทยคม 4

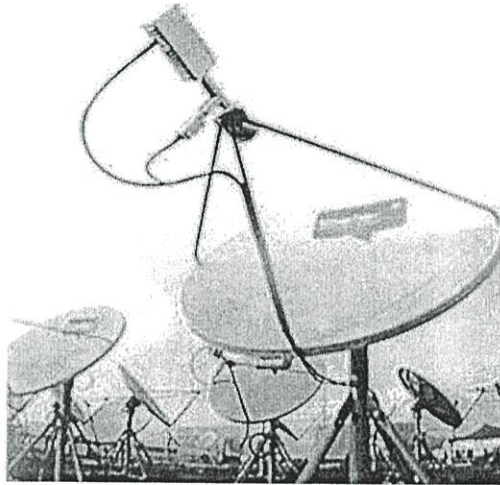
ดาวเทียมไทยคม 4 หรือไอพีสตาร์ (IPSTAR) [23] (รูปที่ 2.5) เป็นดาวเทียมแบบ Multiplespot beam-bent-pipe สามารถใช้งานบรอดแบนด์ได้ในทุกพื้นที่ที่ไม่สามารถเข้าถึงโครงสร้างพื้นฐานภาคพื้นดินและสามารถครอบคลุมพื้นที่จุดบอดได้



รูปที่ 2.5 ดาวเทียมไทยคม 4 หรือ IPSTAR [23]

ระบบดาวเทียมเพื่อส่งข้อมูลความเร็วสูงของดาวเทียมไทยคม 4 ประกอบด้วย สถานีภาคพื้นดินที่ทำหน้าที่ควบคุมสัญญาณดาวเทียมเพื่อให้บริการสื่อสารแบบ Broadband Packet-Switching ซึ่งถูกส่งไปยังงานรับสัญญาณขนาดเล็ก (รูปที่ 2.6) ของผู้ใช้งานจำนวนมากด้วยการกำหนดคุณสมบัติการเชื่อมโยงเครือข่ายแบบ STAR

ดาวเทียมไทยคม 4 เป็นดาวเทียมดวงแรก ที่สามารถรองรับปริมาณการใช้งานระดับสูงที่ถูกส่งขึ้นสู่วงโคจร เทคโนโลยีสำหรับดาวเทียมทั่วไปจะใช้ลำคลื่นเดี่ยวขนาดกว้างเพื่อครอบคลุมพื้นที่ทั่วทั้งทวีปและภูมิภาค แต่สำหรับดาวเทียมไทยคม 4 ใช้เทคโนโลยีการรับ-ส่งสัญญาณแบบหลายลำคลื่น จุดเน้นแคบ ผนวกกับเทคโนโลยีการนำคลื่นความถี่มาใช้ใหม่ (Frequency reuse) จึงสามารถใช้ประโยชน์จากความถี่ที่มีอยู่ในการส่งข้อมูลได้สูง ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการส่งข้อมูลขึ้นถึง 20 เท่าเมื่อเทียบกับดาวเทียมระบบ Ku-band ที่มีใช้อยู่ทั่วไป โดยรายละเอียดต่างๆ ของดาวเทียมไทยคม 4 แสดงในตารางที่ 2.1



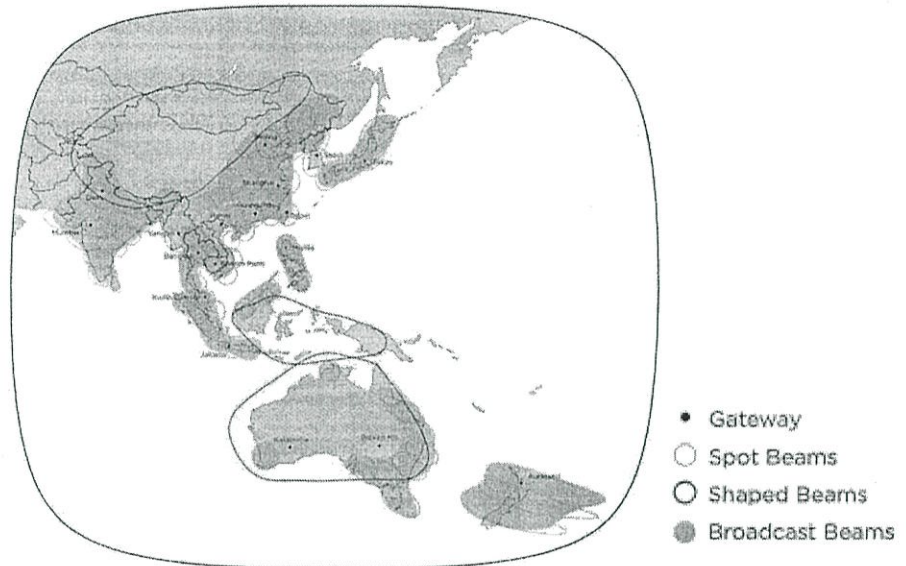
รูปที่ 2.6 งานสายอากาศสำหรับรับสัญญาณดาวเทียมไทยคม 4 [23]

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดดาวเทียมไทยคม 4

บริษัทที่ผลิตดาวเทียม	บริษัท สเปซ ซิสเต็มส์ ลอเรล ประเทศสหรัฐอเมริกา
ตำแหน่งวงโคจร	119.5 องศาตะวันออก
อายุการใช้งาน	15 ปี
Attitude Control	3-Axis Stabilized, Momentum-Bias System
มวลในวงโคจร	6,505 กิโลกรัม
วันที่ส่งขึ้นสู่วงโคจร	11 สิงหาคม 2548

ในการส่งสัญญาณจากดาวเทียม จะทำการส่งสัญญาณลงสู่พื้นโลกให้มีรูปร่างลักษณะเฉพาะตัวได้ โดยขึ้นอยู่กับกรอกแบบสายอากาศของดาวเทียมให้มีลำคลื่น (Beam) ครอบคลุมในพื้นที่ส่วนที่ต้องการได้ ลักษณะของลำคลื่นที่ออกแบบไว้ให้ครอบคลุมเฉพาะพื้นที่ที่ต้องการนี้เรียกว่า ฟุตพริ้นท์ (Footprint) โดยดาวเทียมแต่ละดวงจะมีฟุตพริ้นท์เป็นลักษณะเฉพาะของตัวเอง ซึ่งพื้นที่ที่

จะได้รับสัญญาณจากดาวเทียมได้ดีหรือแรงที่สุดจะอยู่ในส่วนที่เรียกว่า ศูนย์กลาง (Center) ของฟุตพริ้นท์ รูปที่ 2.7 แสดงฟุตพริ้นท์พื้นที่ให้บริการของดาวเทียมไทยคม 4 และยังมีการส่งสัญญาณขาขึ้นใน Ka-band อีก 10 ทราเนสปอนเดอร์



รูปที่ 2.7 พื้นที่ให้บริการของดาวเทียมไทยคม 4 [23]

2.1.6 ความเข้มของสัญญาณในระบบสื่อสารดาวเทียม

การส่งสัญญาณดาวเทียมจากจานสายอากาศของดาวเทียม ผ่านชั้นบรรยากาศมายังจานสายอากาศรับของสถานีภาคพื้นดิน กำลังส่งรวมของการแพร่กระจายสัญญาณ หรือที่เรียกว่า EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.1

$$EIRP = P_t - L_f + G_t \quad (2.1)$$

เมื่อ P_t คือกำลังส่งของดาวเทียม (เดซิเบล), L_f คือการสูญเสียที่เกิดจากระบบสายส่ง (เดซิเบล) และ G_t คืออัตราขยายของจานสายอากาศ (เดซิเบล) ส่วนกำลังขยายของสัญญาณที่ได้รับที่สถานีภาคพื้นดิน เขียนได้ดังสมการที่ 2.2

$$P_R = EIRP - L_{SL} - L_a - L_R + G_{LNB} + G_r - L_{fr} \quad (2.2)$$

เมื่อ L_{SL} คือการสูญเสียพลังงานของสัญญาณเมื่อส่งผ่านอากาศ (เดซิเบล), L_a คือการลดทอนของสัญญาณเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศ (เดซิเบล), L_R การลดทอนสัญญาณเมื่อผ่านฝน (เดซิเบล), G_{LNB} คือ

อัตราขยาย LNB ของจานสายอากาศภาครับ (เดซิเบล), G_r คืออัตราขยายของจานสายอากาศรับ (เดซิเบล) และ L_{fr} คือการสูญเสียที่เกิดจากระบบสายส่งของภาครับ (เดซิเบล)

การสูญเสียพลังงานของคลื่นเมื่อส่งผ่านอากาศ (Free space propagation loss) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.3

$$L_{SL} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ d คือระยะทางจากดาวเทียมถึงจานสายอากาศรับที่สถานีภาคพื้นดิน (เดซิเบล) และ λ คือความยาวคลื่น (เมตร)

2.1.7 การตรวจสอบคุณภาพสัญญาณดาวเทียม

พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับชี้วัดคุณภาพของการติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียม มีความจำเป็นสำหรับการออกแบบระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมรวมทั้งการประเมินประสิทธิภาพของระบบในกรณีที่มีการใช้งานที่หลากหลายมีดังนี้

2.1.7.1 อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน

อัตราส่วนระหว่างกำลังงานคลื่นพาห์เฉลี่ย c ต่อกำลังงานของสัญญาณรบกวน n ในช่วงความถี่เดียวกันแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน $\frac{c}{n}$ (Carrier - to - noise ratio) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หลักที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของระบบสื่อสาร และสามารถกำหนดได้ในทุกๆ จุดของการเชื่อมต่อ เช่น ที่สายอากาศรับ หรือที่อินพุตของภาคมอดูเลเตอร์ เป็นต้น อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนที่จานสายอากาศรับแสดงได้ดังสมการที่ 2.4

$$\frac{c}{n} = \frac{P_r}{N_r} \quad (2.4)$$

เมื่อ P_r คือ กำลังงานคลื่นพาห์ฝั่งภาครับ และ N_r คือ สัญญาณรบกวนฝั่งภาครับ หรือสามารถเขียนให้อยู่ในหน่วยเดซิเบลได้ดังนี้

$$\frac{c}{n} = EIRP + \left(\frac{G}{T} \right) - (L_{SL} + \sum \text{Other Losses}) - 228.6 - B_N \quad (2.5)$$

เมื่อ $EIRP$ อยู่ในหน่วยเดซิเบล, B_N (Noise bandwidth) อยู่ในหน่วยเดซิเบลเฮิรตซ์ (dBHz)

อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดตัวหนึ่งที่ใช้ในการอธิบายประสิทธิภาพการสื่อสารของระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม ยิ่งอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนมีค่ามาก ประสิทธิภาพการสื่อสารก็จะมีมากเช่นกัน ในระบบการสื่อสารทั่วไป อัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนที่สามารถยอมรับได้ในการใช้งานระบบการสื่อสารต้องมีค่าอย่างน้อย 6-10 เดซิเบล และประสิทธิภาพการเชื่อมต่อจะลดต่ำลงได้ด้วย 2 สาเหตุ คือ ในกรณีที่กำลังงานคลื่นพาห์ c ลดลง และ/หรือกำลังงานของสัญญาณรบกวน n เพิ่มขึ้น ปัจจัยทั้งสองจะถูกนำมาคำนวณเมื่อมีการประเมินประสิทธิภาพการเชื่อมต่อและการออกแบบระบบสื่อสาร

2.1.7.2 ความหนาแน่นคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนที่นิยมใช้ในการคำนวณคุณภาพสัญญาณคือ ความหนาแน่นคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (Carrier-to-noise density) หรืออัตราส่วนความหนาแน่นคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน $\frac{c}{n_0}$ จะอยู่ในรูปของความหนาแน่นของกำลังงานสัญญาณรบกวน n_0 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.6

$$\left(\frac{c}{n_0}\right) = \left(\frac{c}{n}\right) + b_N \text{ (dBHz)} \quad (2.6)$$

โดยอัตราส่วนความหนาแน่นคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนมีลักษณะคล้ายอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนในแง่ของประสิทธิภาพของระบบการสื่อสาร กล่าวคือ อัตราส่วนความหนาแน่นคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนแปรผันตรงกับประสิทธิภาพของระบบการสื่อสาร โดยแนวโน้มของอัตราส่วนความหนาแน่นคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนจะมีค่ามากกว่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนในหน่วยเดซิเบล เนื่องจาก B_N จะมีค่ามากในระบบการสื่อสาร

2.1.7.3 ความหนาแน่นพลังงานต่อบิตต่อสัญญาณรบกวน

ในระบบการสื่อสารแบบดิจิทัลพลังงานต่อบิต e_b มีประโยชน์ต่อการอธิบายประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารมากกว่ากำลังงานของคลื่นพาห์ โดยพลังงานต่อบิตสัมพันธ์กับกำลังงานคลื่นพาห์ดังนี้

$$e_b = cT_b \quad (2.7)$$

เมื่อ c คือกำลังงานของคลื่นพาห์และ T_b คือคาบบิต (วินาที)

อัตราส่วนความหนาแน่นพลังงานต่อบิตต่อสัญญาณรบกวน $\frac{e_b}{n_0}$ เป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้สำหรับอธิบายประสิทธิภาพการสื่อสารในระบบดิจิทัล และมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความหนาแน่นคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน ดังสมการที่ 2.8

$$\left(\frac{e_b}{n_0}\right) = T_b \left(\frac{c}{n_0}\right) = \frac{1}{R_b} \left(\frac{c}{n_0}\right) \quad (2.8)$$

เมื่อ R_b แทนอัตราบิตในหน่วยบิตต่อวินาที (bps)

และสมการที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบการคำนวณสมรรถนะของการสื่อสารทั้งในรูปแบบอะนาล็อกและดิจิทัล ที่อัตราการส่งข้อมูลต่างๆ สำหรับพารามิเตอร์ในระบบเดียวกัน

$$\left(\frac{e_b}{n_0}\right) = \frac{1}{R_b} \left(\frac{c}{n_0}\right) = \frac{b_N}{R_b} \left(\frac{c}{n}\right) \quad (2.9)$$

อัตราส่วน $\left(\frac{e_b}{n_0}\right)$ จะมีค่าเท่ากับ $\left(\frac{c}{n}\right)$ ในกรณีที่อัตราบิต (บิตต่อวินาที) มีค่าเท่ากับ b_N (เฮิร์ตซ์)

และเช่นเดียวกันอัตราส่วนความหนาแน่นพลังงานต่อบิตต่อสัญญาณรบกวนก็ยังคงแปรผันตรงกับสมรรถนะของระบบการสื่อสาร

2.2 การวัดปริมาณน้ำฝน, การวิเคราะห์ และการคำนวณอัตราการตกของฝน

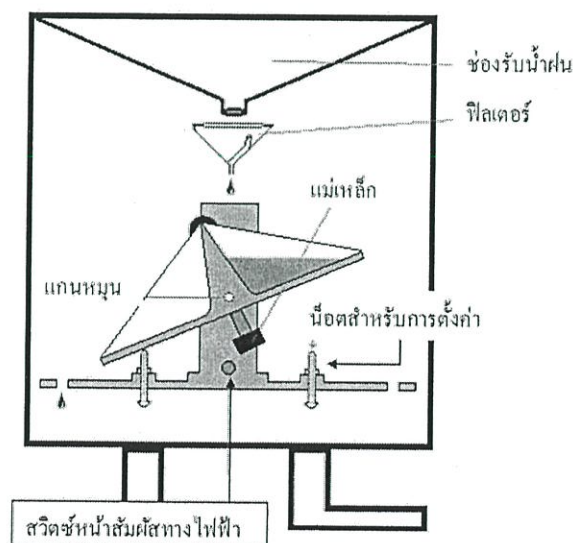
โดยทั่วไป ฝนจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ฝนที่เกิดจากเมฆแบบแผ่น (Stratiform rain) และฝนที่เกิดจากเมฆแบบชั้น (Convective rain) โดยลักษณะของฝนจะขึ้นอยู่กับฤดูกาลและตำแหน่งที่ตั้งของพื้นที่นั้นๆ ในกรณีของฝนที่เกิดจากเมฆแบบแผ่นจะมีอัตราการตกของฝนในระดับน้อย-ปานกลาง และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ส่วนในกรณีของฝนที่เกิดจากเมฆแบบชั้นจะประกอบด้วยกลุ่มฝนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 5 กิโลเมตร มีอัตราการตกของฝนในระดับสูง และกลุ่มฝนจะถูกล้อมรอบด้วยฝนที่เกิดจากเมฆแบบแผ่น

ปริมาณน้ำฝนเป็นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งทางอุตุนิยมวิทยา การวัดปริมาณน้ำฝนใช้วัดจากความสูงหรือความลึกจากน้ำฝนที่ตกลงมาจากท้องฟ้าสู่ภาชนะที่มีเนื้อที่จำกัด โดยไม่มีการคิดตัวแปรในรูปของการไหลซึมหรือระเหยของน้ำฝน ปัจจุบันเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดปริมาณน้ำฝนมีหลากหลายชนิด เช่น เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนชนิดธรรมดาหรือแบบแก้วตวง (Ordinary rain gauge), เครื่องวัดน้ำปริมาณฝนแบบคานกระดก (Tipping Bucket), เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบบันทึก (Recording rain gauge) เป็นชนิดที่มีปากกาเขียนด้วยหมึก ซึ่งมีทั้งแบบชั่ง (Weighing rain gauge) และแบบกาลักน้ำ (Siphon rain gauge) อย่างไรก็ตามเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนที่ใช้จะต้องมีหลักเกณฑ์ที่สำคัญคือ ในส่วนขอบด้านนอกของปากถังเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนจะต้องมีความคม โดยทำให้ส่วนของด้านในตั้งตรงเป็นแนวตั้ง ด้านนอกให้มีความลาดเอียงและตั้งชันมากหรือเป็นแนวตั้ง ต้องรู้พื้นที่ปากถังของ

เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนให้ใกล้เคียงไม่ต่ำกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์และเนื้อที่นี้จะต้องไม่เปลี่ยนแปลงตลอดจนสิ้นสุดช่วงการเก็บข้อมูลปริมาณน้ำฝน ต้องมีการออกแบบให้กันการกระเซ็นเข้าและออกของน้ำฝน กรวยรับน้ำฝนต้องมีความลาดเอียงไม่ต่ำกว่า 45 องศา ควรป้องกันการระเหยไปของน้ำฝนโดยตั้งรองรับน้ำฝนภายในควรทำให้เป็นคอแคบๆ

2.2.1 เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบคานกระดก (Tipping bucket)

เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบคานกระดก (Tipping Bucket) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.8 เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนนี้ใช้เพื่อวัดปริมาณของฝนที่ตกลงมาซึ่งสามารถติดตั้งไว้ภายนอกอาคารได้และอาจทำการต่อด้วยสายเคเบิลเข้าไปยังเครื่องบันทึกที่อยู่ภายในอาคารหรือมีหน่วยความจำภายใน เมื่อมีฝนตกน้ำฝนจะตกลงสู่กรวยรับน้ำฝนซึ่งมีรัศมีคงที่อยู่ค่าหนึ่ง จากนั้นน้ำฝนจะไหลลงสู่กรวยเล็กๆ ที่ติดกัน 2 อัน โดยมีปากของกระบวย ที่อยู่ตรงกันข้ามเพื่อสลับกันใส่และเทน้ำออกเมื่อข้างหนึ่งข้างใดเต็ม การกระดกของกระบวยรับน้ำจะมีเวลาที่แน่นอน (ประมาณ 0.2 วินาที) ซึ่งปริมาณน้ำฝนจากเครื่องวัดน้ำฝนชนิดนี้เท่ากับ nV เมื่อ V เป็นปริมาตรของกระบวยและ n คือจำนวนครั้งที่น้ำฝนถูกเทออก (จำนวนพัลส์) ในขณะที่กระบวยเทน้ำออกแท่งแม่เหล็กที่ติดอยู่กับกระบวยจะเคลื่อนที่ไปกระตุ้นการทำงานของสวิทช์หน้าสัมผัสทางไฟฟ้า (Reed switch) โดยการสวิทช์ของหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าจะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าด้วยชุดแปลงความถี่เป็นแรงดัน (F to V Converter) จากนั้นต่อเข้ากับเครื่องบันทึกสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้ามาบันทึกที่เครื่องวัดสัญญาณ ดังนั้นจึงทำให้ทราบถึงปริมาณน้ำฝนและอัตราการตกของฝน



รูปที่ 2.8 โครงสร้างภายในเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบคานกระดก [24]

2.2.2 การวิเคราะห์และคำนวณอัตราการตกของฝน

ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่บันทึกได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนจะมีหน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตร แต่สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากปริมาณน้ำฝนจะทำการเปรียบเทียบกับอัตราการตกของฝนที่อยู่ในหน่วยมิลลิเมตรต่อชั่วโมง จึงต้องทำการแปลงค่าเวลาเพื่อที่จะนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนไปใช้ในคำนวณได้ ซึ่งอัตราการตกของฝนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10

$$R = (r / t) * 60 \quad (2.10)$$

โดยที่ R คือ อัตราการตกของฝนในช่วงเวลานั้นๆ (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง), r คือ ปริมาณการตกของฝนในช่วงเวลานั้นๆ (มิลลิเมตร) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11 และ t คือ ระยะเวลาที่ฝนตกในช่วงเวลานั้นๆ (นาที)

$$r = \text{ปริมาณน้ำฝนสะสมสูงสุด} - \text{ปริมาณน้ำฝนสะสมต่ำสุด} \quad (\text{มิลลิเมตร}) \quad (2.11)$$

2.3 ผลกระทบของฝนต่อการลดทอนกำลังงานสัญญาณดาวเทียม

ข้อมูลปริมาณน้ำฝนเป็นข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ลักษณะความต่อเนื่องของการสื่อสาร เนื่องจากฝนเป็นหนึ่งในปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาในระบบการสื่อสาร โดยเฉพาะการลดทอนของสัญญาณในย่านความถี่สูง เช่น การสื่อสารผ่านระบบดาวเทียม โดยมีสาเหตุหลัก 3 ประการที่เกิดจากการลดทอนอันเนื่องมาจากฝน คือ

2.3.1 การดูดกลืน (Absorption)

ในช่วงความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งขนาดของความยาวคลื่นมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดฝน การลดทอนจากฝนจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งถ้าขนาดของเม็ดฝนมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้ งานผลกระทบก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น

2.3.2 การกระเจา (Scattering)

มีส่วนทำให้เกิดปัญหาในการเดินทางของคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นการสื่อสารแบบจุดต่อจุดหรือการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยจะแปรเปลี่ยนตามสภาพอากาศซึ่งมีความสลับซับซ้อนและไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในโลก การลดทอนชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อคลื่นเดินทางปะทะกับหยดน้ำหรืออนุภาคที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ ถ้าอนุภาคนี้นี้เล็กกว่าความยาวคลื่นผลกระทบเรียกว่า Rayleigh Scattering นั่นคือหยดน้ำหรืออนุภาคเล็กๆ จะสะท้อนกลับพลังงานที่มากกระทบกลับไป โดยการสะท้อนกลับขึ้นอยู่กับ

หลายสาเหตุ เช่น ขนาดของอัตราส่วนตัวสะท้อนและความยาวคลื่น, ความหนาแน่นต่อปริมาตรของชั้นบรรยากาศและระยะทางที่ต้องผ่านชั้นบรรยากาศที่มีตัวสะท้อนคลื่นเป็นต้น

2.3.3 การเบี่ยงเบนโพลาไรซ์ (Depolarization)

รูปทรงของหยดน้ำฝนในทางอุดมคตินั้นเป็นรูปทรงกลม ซึ่งจะลดพลังงานที่ทำให้หยดน้ำเกาะยึดไว้ด้วยกัน ยิ่งหยดน้ำขนาดเล็กก็จะยิ่งใกล้เคียงกับทรงกลมมากแต่หยดน้ำขนาดใหญ่เป็นรูปแบบที่ดีกว่า ซึ่งเป็นรูปทรงกลมแบนด้านล่างซึ่งเป็นผลจากความต้านทานของอากาศ ในความเป็นจริงตามหลักของการเคลื่อนที่ในอากาศเม็ดฝนที่ตกลงมาจะถูกทำให้เอียง ดังนั้นจึงเกิดมุมเอียงของเม็ดฝนแตกต่างกันไป การเดินทางของคลื่นแบบเชิงเส้น (Linear) แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบแนวตั้ง (Vertical) และแบบแนวนอน (Horizontal) เมื่อพิจารณาจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การเดินทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบแนวตั้งจะขนานกับแกนตั้งของเม็ดฝน ซึ่งจะปะทะกับน้ำฝนน้อยกว่าในแนวนอน ซึ่งจะเป็นผลให้การลดทอนและการเปลี่ยนแปลงของเฟสไม่เท่ากัน ซึ่งจะมีผลทำให้โพลาไรซ์เกิดการเบี่ยงเบนไป

2.4 การทำนายการลดทอนของสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝน

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ฝนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อการสื่อสารผ่านระบบดาวเทียมนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอบทความที่เกี่ยวข้องกับการคาดคะเนการลดทอนกำลังงานสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝน โดยอาศัยแบบจำลองที่ถูกนำมาใช้อ้างอิงอย่างแพร่หลาย คือ แบบจำลองของ Crane และแบบจำลอง ITU-R ซึ่งเป็นแบบจำลองกึ่งเชิงประจักษ์ (Semi-empirical) และอยู่บนพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างค่าการลดทอนจำเพาะ (Specific attenuation) $\gamma = aR^b$ (เดซิเบลต่อกิโลเมตร) และอัตราการตกของฝน R (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) และแบบจำลองทั้งสองเป็นแบบจำลองพื้นฐานที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในทุกพื้นที่ที่มีการเก็บบันทึกข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสมในพื้นที่นั้นๆ

2.4.1 การทำนายการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝนตามแบบจำลองของ Crane

Robert K. Crane [11] ได้นำเสนอแบบจำลองสำหรับการทำนายค่าการลดทอนกำลังงานสัญญาณในแนวการแพร่คลื่นภาคพื้นดิน (Terrestrial path) หรือแนวเอียงระหว่างพื้นโลกและอวกาศ (Slant path) อันเนื่องมาจากอิทธิพลของฝนโดยแบบจำลองนี้ได้อาศัยข้อมูลทางธรณีฟิสิกส์มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองและทดสอบเปรียบเทียบกับค่าการลดทอนกำลังงานจริงที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่ทำการทดสอบแบบจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในทุกพื้นที่ที่มีการเก็บบันทึกข้อมูลอัตราการตกของฝนที่มีจำนวนข้อมูลมากเพียงพอ โดยผลการทดสอบที่นำเสนอพบว่าผลการ

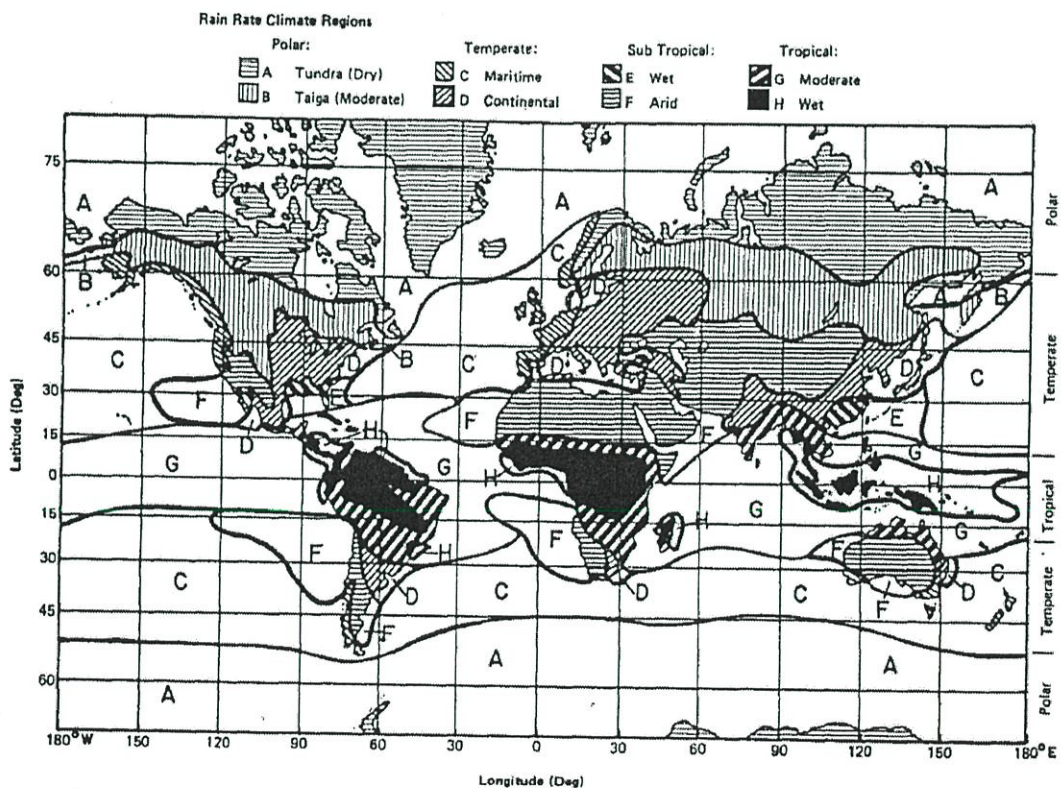
ทำนายที่ได้จากแบบจำลองของ Crane มีค่าความผิดพลาดน้อยกว่าส่วนเบี่ยงเบนแบบรากลำกล้องเฉลี่ยของค่าการลดทอนจริง

สำหรับการทำนายการลดทอนอันเนื่องมาจากฝนจากแบบจำลองของ Crane จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ f ความถี่ (กิกะเฮิร์ตซ์), θ มุมเงยของจานสายอากาศ (องศา), G ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน (กิโลเมตร) และ ϕ ตำแหน่งละติจูดของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน (องศา) และมีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณการแจกแจงอัตราการตกของฝน R_p

ก) พิจารณาจุดสิ้นสุดของระยะทางภาคพื้นดินหรือสถานีภาคพื้นดินในแผนที่ ดังรูปที่ 2.9 ว่าอยู่เขตพื้นที่สภาพภูมิอากาศเขตใด (A–H)

ข) หาค่าการแจกแจงของอัตราการตกของฝนจากตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.9 การแบ่งเขตสภาพภูมิอากาศของโลกตามสภาพฝนจากแบบจำลองของ Crane [11]

ตารางที่ 2.2 การแจกแจงอัตราการตกของฝน (R_p) ในเขตสภาพภูมิอากาศต่างๆ เทียบกับช่วงเวลา ร้อยละต่อปีที่อัตราการตกของฝนมากกว่าค่านั้นๆ

ช่วงเวลาร้อยละ ต่อปี	เขตสภาพภูมิอากาศ									
	A	B	C	D ₁	D ₂	D ₃	E	F	G	H
0.001	28	54	80	90	102	127	164	66	129	251
0.002	24	40	62	71	86	107	144	51	109	220
0.005	19	26	41	50	64	81	117	34	85	178
0.01	15	19	28	37	49	63	98	23	67	147
0.02	12	14	18	27	35	48	77	14	51	115
0.05	8	9.5	11	16	22	31	52	8	33	77
0.1	5.5	6.8	7.2	11	15	22	35	5.5	22	51
0.2	4	4.8	4.8	7.5	9.5	14	21	3.2	14	31
0.5	2.5	2.7	2.8	4	5.2	7	8.5	1.2	7	13
1.0	1.7	1.8	1.9	2.2	3	4	4	0.8	3.7	6.4
2.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.8	2.5	2	0.4	1.6	2.8
จำนวนสถานี ข้อมูล	0	25	44	15	99	18	12	20	2	11

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณระยะทางการแพร่คลื่นบนพื้นผิว D

ก) สำหรับการแพร่คลื่นภาคพื้นดินระยะทางการแพร่คลื่น D คือระยะห่างระหว่างงานสายอากาศ

ข) สำหรับการแพร่คลื่นในแนวเอียง (Slant path) ระยะทางการแพร่คลื่น D จะคำนวณจาก

$$D = (H - H_0) / \tan \theta \quad ; \theta \geq 10^\circ$$

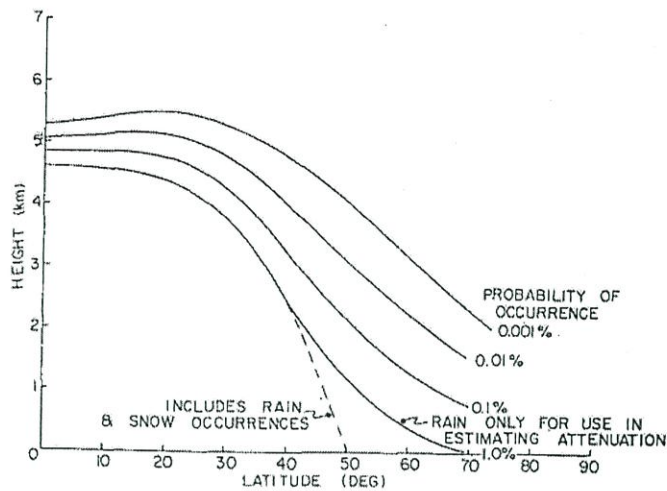
$$= E\psi, \psi \text{ in radians} \quad ; \theta < 10^\circ \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$\psi = \sin^{-1} \left[\frac{\cos \theta}{(H + E)} \left(\sqrt{(H_0 + E)^2 \sin^2 \theta + 2E(H - H_0)} \right) \right] \quad (2.13)$$

เมื่อ E คือ รัศมีประสิทธิผลของโลก มีค่าเท่ากับ 8,500 กิโลเมตร, θ คือ ขนาดของมุมเงยของงานสายอากาศ (องศา), H_0 คือ ความสูงของสถานีเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง

(กิโลเมตร) และ $H(P)$ คือ ระดับความสูงที่เส้น 0 องศาเซลเซียส (กิโลเมตร) ที่ร้อยละของเวลา P ที่สนใจ ซึ่งสามารถหาได้จากการประมาณค่าในช่วงจากรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระดับความสูงของเส้น 0 องศาเซลเซียสในช่วงเวลาร้อยละต่างๆ [11]

ค) ถ้า $D > 22.5$ กิโลเมตร ใช้ค่า $D_0 = 22.5$ กิโลเมตร และอัตราการตกของฝน ณ ตำแหน่งหนึ่งๆ ค่าใหม่ R'_p ในการปรับค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์

$$P' = P \left[\frac{D_0}{D} \right] \quad (2.14)$$

ขั้นตอนที่ 3 หาค่า α และ β สำหรับความถี่ที่สนใจ จากตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าการลดทอนจำเพาะ $a = \alpha R_p^\beta$ (เดซิเบลต่อ กิโลเมตร)

ความถี่ (กิกะเฮิรตซ์)	ตัวคูณ $\alpha(F)$	$\beta(F)$
1	0.00015	0.95
4	0.00080	1.17
5	0.00138	1.24
6	0.00250	1.28
7.5	0.00482	1.25
10	0.0125	1.18

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

ความถี่ (กิกะเฮิรตซ์)	ตัวคูณ $\alpha(F)$	$\beta(F)$
12.5	0.0228	1.145
15	0.0357	1.12
17.5	0.0524	1.105
20	0.0699	1.10
25	0.113	1.09
30	0.170	1.075
35	0.242	1.04
40	0.325	0.99
50	0.485	0.90
60	0.650	0.84
70	0.780	0.79
80	0.875	0.753
90	0.935	0.730
100	0.965	0.715

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าการลดทอนบนพื้นผิวโลก A จากค่า R_p และค่า D (หรือ R_p' และ D_0) โดย R_p คืออัตราการตกของฝนที่ได้จากค่าการแจกแจงของอัตราการตกของฝนที่ความน่าจะเป็น P ที่สนใจ

$$D = (H - H_0) / \tan \theta \quad ; \theta \geq 10^\circ$$

$$= E\psi, \psi \text{ in radians} \quad ; \theta < 10^\circ \quad (2.15)$$

$$A(R_p, D) = \alpha R_p^\beta \left[\frac{e^{u\beta d} - 1}{u\beta} - \frac{b^\beta e^{c\beta d}}{c\beta} + \frac{b^\beta e^{c\beta d}}{c\beta} \right] ; d \leq D \leq D_0 \quad (2.16)$$

$$A(R_p, D) = \alpha R_p^\beta \left[\frac{e^{u\beta d} - 1}{u\beta} \right] ; D < d \quad (2.17)$$

$$A(R_p, D) = (H(P) - H_0) \alpha R_p^\beta ; D = 0 (\theta = 90^\circ) \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$u = \frac{\ln [b e^{cd}]}{d} \quad (2.19)$$

$$b = 2.3R_p^{-0.17} \quad (2.20)$$

$$c = 0.026 - 0.03 \ln R_p \quad (2.21)$$

$$d = 3.8 - 0.6 \ln R_p \quad (2.22)$$

ขั้นตอนที่ 5 ปรับค่าการลดทอนตามความสูงในแนวเอียง A_s (สมการนี้ไม่สามารถใช้คำนวณค่าการลดทอนในแนวระนาบพื้นผิวโลกได้)

$$A_s = \frac{LA(R_p, D)}{D} = \frac{A(R_p, D)}{\cos \theta} ; \theta \geq 10^\circ \quad (2.23)$$

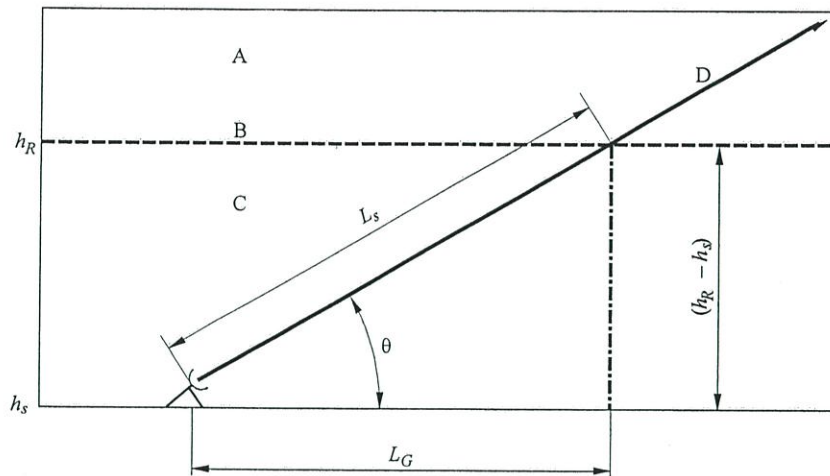
เมื่อ A_s คือค่าประมาณการลดทอนในแนวเอียง

2.4.2 การทำนายการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝนตามแบบจำลองของ ITU-R P.618-11

แบบจำลองการคาดคะเนค่าการลดทอนกำลังงานสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนดังที่นำเสนอในเอกสาร ITU-R P.618 [12] เป็นการประมาณค่าทางสถิติของการลดทอนกำลังงานสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนตามแนวการแพร่คลื่นในบริเวณต่างๆ ที่ความถี่ไม่เกิน 55 กิกะเฮิร์ตซ์

การทำนายค่าทางสถิติระยะยาวของการลดทอนกำลังงานสัญญาณอันเนื่องมาจากฝน จากอัตราการตกของฝน มีพารามิเตอร์ที่จำเป็นจะต้องทราบค่า ดังนี้ $R_{0.01}$ อัตราการตกของฝน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) ณ ตำแหน่งที่ทำการบันทึกในช่วงเวลาเฉลี่ยร้อยละ 0.01, h_s ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน (กิโลเมตร), θ มุมเงยของงานสายอากาศ (องศา), φ ตำแหน่งละติจูดของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน (องศา), f ความถี่ (กิกะเฮิร์ตซ์) และรัศมีประสิทธิผลของโลก (8,500 กิโลเมตร) และหากไม่ทราบความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางของสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินที่ต้องการใช้ในการคำนวณ สามารถใช้ค่าประมาณได้จากแผนที่แสดงระดับความสูงของภูมิประเทศจาก ITU-R P.1511 [25]

แผนภาพแสดงระยะทางของพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณการประมาณค่าการลดทอนอันเนื่องมาจากฝนแสดงดังรูปที่ 2.11 โดย A คือ ระดับความสูงของชั้นบรรยากาศที่ไอน้ำอยู่ในสถานะของแข็ง (Frozen precipitation), B คือ ระดับความสูงของฝน (Rain height), C คือ ระดับความสูงของชั้นบรรยากาศที่ไอน้ำอยู่ในสถานะของเหลว (Liquid precipitation) และ D แสดงแนวการแพร่คลื่นระหว่างสถานีภาคพื้นดินและอวกาศ (Earth-space path)



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงระยะทางของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณการประมาณค่าการลดทอนอันเนื่องมาจากฝนจากแบบจำลอง ITU-R [12]

มีลำดับการคำนวณการลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนดังขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดระดับความสูงฝน (h_R) จากแบบจำลอง ITU-R P.839 [26]

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณระยะทางการแพร่คลื่น (L_s) ที่ระดับความสูงต่ำกว่าระดับความสูงฝน

$$\theta \geq 5^\circ \quad L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \text{ กิโลเมตร} \quad (2.24)$$

$$\theta < 5^\circ \quad L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right)^{1/2} + \sin \theta} \text{ กิโลเมตร} \quad (2.25)$$

ในกรณีที่ $h_R - h_s$ มีค่าเป็นศูนย์ การทำนายค่าการลดทอนในทุกช่วงร้อยละของเวลาจะเป็นศูนย์

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณระยะทางการแพร่คลื่นในแนวราบ (L_G)

$$L_G = L_s \cos \theta \text{ กิโลเมตร} \quad (2.26)$$

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาอัตราการตกของฝนเฉลี่ยในช่วงเวลาร้อยละ 0.01 ของปี ($R_{0.01}$) (พิจารณาข้อมูลอัตราการตกของฝนเป็นรายนาทีก) และหากในพื้นที่ที่พิจารณาไม่มีข้อมูลทางสถิติดังกล่าว

สามารถใช้อัตราการตกของฝนที่กำหนดให้จากแบบจำลอง ITU-R P.837 [27] และในกรณีที่ $R_{0.01}$ มีค่าเป็นศูนย์การทำนายค่าการลดทอนในทุกช่วงร้อยละของเวลาจะเป็นศูนย์

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณการลดทอนจำเพาะ (γ_R) โดยอาศัยสัมประสิทธิ์ตามความถี่จากแบบจำลอง ITU-R P.838 [28] และค่าอัตราการตกของฝนในขั้นตอนที่ 4

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha \text{ เดซิเบลต่อกิโลเมตร} \quad (2.27)$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่าการลดทอนในแนวระนาบ ($r_{0.01}$) ที่ช่วงเวลาร้อยละ 0.01

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})} \quad (2.28)$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณการปรับค่าในแนวตั้ง ($v_{0.01}$) ที่ช่วงเวลาร้อยละ 0.01

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_s}{L_G r_{0.01}} \right) \text{ องศา} \quad (2.29)$$

สำหรับ $\zeta > \theta$,

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \text{ กิโลเมตร} \quad (2.30)$$

นอกจากนั้น,

$$L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \text{ กิโลเมตร} \quad (2.31)$$

ถ้า $|\varphi| < 36^\circ$,

$$\chi = 36 - |\varphi| \text{ องศา} \quad (2.32)$$

นอกจากนั้น,

$$\chi = 0 \text{ องศา} \quad (2.33)$$

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \left(31 \left(1 - e^{-(\theta/(1+\chi))} \right) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2}} - 0.45 \right)}} \quad (2.34)$$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณระยะทางประสิทธิผล

$$L_E = L_R v_{0.01} \text{ กิโลเมตร} \quad (2.35)$$

ขั้นตอนที่ 9 การทำนายค่าการลดทอนเฉลี่ยต่อปีที่ช่วงเวลาร้อยละ 0.01

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \text{ เดซิเบล} \quad (2.36)$$

ขั้นตอนที่ 10 การประมาณค่าการลดทอนเฉลี่ยต่อปีที่ช่วงเวลาร้อยละอื่นๆ ที่ต้องการระหว่างร้อยละ 0.001 ถึง ร้อยละ 5 จะคำนวณจาก ค่าการลดทอนเฉลี่ยต่อปีที่ช่วงเวลาร้อยละ 0.01

ถ้า $p \geq 1\%$ หรือ

$$|\varphi| \geq 36^\circ : \quad \beta = 0 \quad (2.37)$$

ถ้า $p < 1\%$ และ $|\varphi| < 36^\circ$ และ

$$\theta \geq 25^\circ : \quad \beta = -0.005(|\varphi| - 36) \quad (2.38)$$

นอกจากนั้น:

$$\beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta \quad (2.39)$$

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \text{ เดซิเบล} \quad (2.40)$$

2.5 เทคนิคการแก้ไขปัญหาการเกิดการลดทอน

ในการใช้งานระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม ผู้ให้บริการดาวเทียมได้นำเอาเทคนิควิธีการต่างๆ มาใช้ในการแก้ไขปัญหาการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝน [2] เพื่อคงคุณภาพการให้บริการสัญญาณดาวเทียมให้สามารถใช้งานได้ต่อไป เทคนิคการแก้ไขปัญหาการเกิดการลดทอนสัญญาณดาวเทียมแบ่งเป็น 3 ประเภทหลักๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.5.1 การควบคุมกำลังส่งประสิทธิภาพ (EIRP control techniques)

โดยทั่วไป การควบคุมกำลังส่งจะมี 2 วิธี คือ ระบบควบคุมแบบลูปเปิด (Open loop power control system) ระดับการส่งถูกปรับโดยสัญญาณควบคุมของคลื่นที่เกิดการลดทอนเนื่องจากฝน สัญญาณควบคุมเหล่านี้อาจเป็นสัญญาณขาของสัญญาณนำร่องความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกับสัญญาณขาขึ้น และระบบควบคุมแบบลูปปิด (closed loop power control system) ระดับกำลังจะถูกปรับโดยตรงจากข้อมูลระดับสัญญาณที่ได้ที่ดาวเทียมที่ถูกส่งกลับมายังสถานีภาคพื้นดินทางช่องสัญญาณควบคุม

2.5.1.1 การควบคุมกำลังส่งขาขึ้น (Uplink power control)

การควบคุมกำลังส่งขาขึ้นจะให้ความหมายของการแก้ไขการลดทอนอันเนื่องมาจากฝนของสัญญาณขาขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการให้บริการแบบดาวเทียมคงที่ (Fix satellite) และ

บริการแพร่กระจายข่าวสารผ่านดาวเทียม การควบคุมกำลังส่งด้านขาขึ้นทำได้โดยการปรับกำลังส่งที่สถานีภาคพื้นดิน เพื่อรักษาระดับสัญญาณที่จะไปถึงดาวเทียมไม่ให้ต่ำกว่าระดับที่ต้องการ

2.5.1.2 การควบคุมกำลังส่งขาลง (Downlink power control)

การควบคุมกำลังส่งขาลงทำได้โดยการเพิ่มกำลังส่งจากดาวเทียม ซึ่งแตกต่างจากการควบคุมกำลังส่งขาขึ้น เนื่องจากเป็นการยากที่จะใช้วิธีการควบคุมกำลังส่งขาลงร่วมกับข้อจำกัดของตัวดาวเทียม (ขนาดและน้ำหนัก) รวมทั้งข้อจำกัดในการควบคุมการทำงานของดาวเทียม

2.5.1.3 ลำคลื่นแบบจุด (Spot beam shaping)

การเพิ่มระดับสัญญาณของสัญญาณขาลงจากดาวเทียมเนื่องจากเกิดการลดทอนสัญญาณ สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนไปใช้งานสายอากาศของดาวเทียมที่มีอัตราขยายสูงขึ้น อัตราขยายของงานสายอากาศที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากลำคลื่นของงานสายอากาศนั้นแคบลง ทำให้มีกำลังงานสูงขึ้นในบริเวณที่เล็กลงบนพื้นผิวโลก ส่งผลให้ค่า EIRP ที่สถานีภาคพื้นดินที่เกิดการลดทอนสัญญาณมีค่าสูงขึ้น

การให้บริการของดาวเทียมแก่สถานีดาวเทียมภาคพื้นดินหลายที่ ซึ่งสามารถกำหนดให้สถานีใดสถานีหนึ่งหรือมากกว่านั้นสามารถใช้ลำคลื่นแบบจุดได้ ในกรณีที่เกิดการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝน โดยลำคลื่นแบบจุดนี้สามารถชี้ไปยังสถานีภาคพื้นดินที่ต้องการได้ โดยการใช้กลไกการเคลื่อนที่ของงานสะท้อนคลื่น หรือวิธีการเปลี่ยนการบ่อนสัญญาณให้งานสายอากาศทางอิเล็กทรอนิกส์

2.5.2 การเปลี่ยนเทคนิคการส่งข้อมูล (Adaptive transmission techniques)

เทคนิคนี้จะมุ่งเน้นการปรับเปลี่ยนวิธีการประมวลผลหรือการส่งสัญญาณจากโหนดของโครงข่ายดาวเทียม (สถานีภาคพื้นดิน, ดาวเทียม) เมื่อการสื่อสารผ่านดาวเทียมมีคุณภาพลดลง แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ การเข้ารหัสแบบลำดับขั้น (Hierarchical coding), การมอดูเลชันแบบลำดับขั้น (Hierarchical modulation) และการลดอัตราการส่งข้อมูล (Data rate reduction)

2.5.2.1 การเข้ารหัสแบบลำดับขั้น (Hierarchical coding)

การเข้ารหัสที่นำมาใช้ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมสำหรับการตรวจและแก้ไขบิตผิดพลาด โดยการเพิ่มความซับซ้อนให้กับสัญญาณข่าวสาร ทำให้ความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดลดลง แต่ในขณะเดียวกันก็มีความต้องการแถบความถี่ (Bandwidth) เพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาระบบควบคุมแบบรูปปิดและรูปเปิด ขั้นตอนการถอดรหัสในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมจะเกิดขึ้นที่เครื่องรับ โดยไม่มีการป้อนกลับจากเครื่องส่ง การเข้ารหัสแก้ไขบิตผิดพลาดนี้เรียกว่า FEC (Forward Error Checking) ส่วนการเข้ารหัสแบบอื่นๆ เรียกว่า ARQ (Automatic repeat request) จะทำการตรวจจับและแก้ไขบิตผิดพลาดจากการส่งบล็อกบิตผิดพลาดซ้ำ ARQ ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยมีข้อจำกัดด้านความล่าช้าของการส่งข้อมูลขนาดใหญ่ ดังนั้น ARQ จึงเหมาะกับการใช้งานการส่งข้อมูล เช่น ในโครงข่าย VSAT/USAT เป็นต้น

การเข้ารหัสแก้ไขบิตผิดพลาดในขั้นต้นจะถูกออกแบบมาเพื่อแก้ไขความผิดพลาดจากบิตผิดพลาดแบบสุ่ม เช่น ความผิดพลาดที่เกิดจากสัญญาณรบกวนจากอุณหภูมิ (Thermal noise) อย่างไรก็ตาม ระบบการสื่อสารดาวเทียมที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ขึ้นไป การลดทอนของสัญญาณจะเกิดจากฝนเป็นสาเหตุหลัก ดังนั้นความผิดพลาดจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นอิสระ การรักษาคุณภาพของการทำงานของระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนอัตราการใช้รหัสให้สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ได้

2.5.2.2 การมอดูเลชันแบบลำดับชั้น (Hierarchical modulation)

การมอดูเลชันแบบลำดับชั้นจะลดอัตราส่วนความหนาแน่นพลังงานต่อบิตต่อสัญญาณรบกวนของอัตราบิตผิดพลาด (Bit error rate) โดยการลดประสิทธิภาพสเปกตรัม (Spectral efficiency) ในหน่วยบิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์ (bps/Hz) เมื่ออัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนที่อินพุตของฝั่งดีมอดูเลเตอร์มีค่าลดลงจากผลกระทบในแนวการแพร่คลื่น ในช่วงที่เกิดฝนตกหนัก เทคนิคการมอดูเลชันแบบลำดับชั้นจะทำการเปลี่ยนสเปกตรัมประสิทธิภาพสำหรับกำลังงานที่ต้องการ ในขณะที่เทคนิคก่อนหน้านี้ใช้วิธีการปรับกำลังงานของคลื่นพาห์ในการแก้ปัญหาดังกล่าว

การมอดูเลชันแบบลำดับชั้นเหมาะสำหรับการแก้ปัญหาการลดทอนแบบลูบปิด เมื่อสถานีรับภาคพื้นดินมีการรับ-ส่งข้อมูลกับสถานีส่งในอัตรการส่งต่ำ ส่วนเทคนิคแบบลูบเปิดโมเด็มจะปรับเปลี่ยนการมอดูเลชันให้เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานการมอดูเลชันแบบลำดับชั้นไม่ว่าจะเป็นแบบลูบปิดหรือลูบเปิดจะเหมาะสำหรับการใช้งานระบบดาวเทียมท้องถิ่น เช่น ระบบ VSAT ทั้งนี้ไม่รวมถึงการใช้งานสถานีเกิดเวทย์ขนาดใหญ่

2.5.2.3 การลดอัตราการส่งข้อมูล (Data rate reduction)

เป็นเทคนิคการประมวลผลสัญญาณที่ใช้วิธีการลดอัตราการส่งข้อมูลเมื่อใดก็ตามที่ระบบการควบคุมตรวจพบเวลาที่สถานะถัดไปของช่องสัญญาณจะเกิดการลดทอนของสัญญาณที่รุนแรง เทคนิคการลดอัตราการส่งข้อมูลให้ข้อดีในส่วนของการกระจายการใช้ทรัพยากรดาวเทียมที่เท่าเทียมสำหรับทุกผู้ใช้งาน โดยที่การใช้งานจะขึ้นอยู่กับว่าการให้บริการประเภทใดสามารถทำงานได้แม้ว่าอัตราการส่งข้อมูลจะลดลง ยกตัวอย่างเช่น การส่งวิดีโอหรือการส่งข้อมูลที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราข้อมูล เป็นต้น

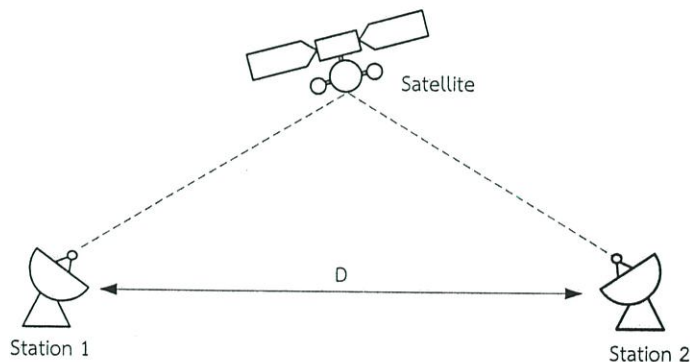
2.5.3 การแก้ไขปัญหาโดยอาศัยเทคนิคความหลากหลาย (Diversity protection schemes)

เทคนิคเหล่านี้จะเน้นการแก้ปัญหาการลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากฝน ที่เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานและประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ขึ้นไป

2.5.3.1 การสลับสถานีภาคพื้นดิน (Site diversity)

เทคนิคการสลับสถานีภาคพื้นดิน หรือ Site diversity หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Path diversity หรือ Space diversity ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถลดผลกระทบต่อการใช้งานหรือประสิทธิภาพของการสื่อสารผ่านดาวเทียมโดยใช้ประโยชน์จากขนาดและบริเวณของฝนที่ตกหนัก ปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อ Diversity gain คือ ระยะห่างระหว่างสถานีภาคพื้นดิน D ดังในรูปที่ 2.12 ด้วยระยะห่างทางกายภาพระหว่างสถานีภาคพื้นดินที่เหมาะสมจะทำให้ความน่าจะเป็นของระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝนของทั้งสองสถานีมีค่าน้อยกว่าค่าความน่าจะเป็นของระดับการลดทอนอันเนื่องมาจากฝนที่เกิดขึ้นจากสถานีเดียว ในกรณีของการใช้งานสถานีภาคพื้นดิน 2 สถานี ฝนที่มีอัตราการตกของฝนสูงมักจะเกิดขึ้นจากฝนที่เกิดจากเมฆแบบชั้น มีลักษณะเป็นกลุ่มๆ มีเนื้อที่ในแนวระนาบและแนวนิ่งไม่กว้างนัก และมีแนวโน้มที่จะมีเนื้อที่เล็กลงตามความแรงของฝนที่เพิ่มขึ้น ถ้าหากระยะห่างระหว่างสถานีภาคพื้นดินห่างกันอย่างน้อยเท่ากับระยะทางเฉลี่ยในแนวระนาบของกลุ่มฝนแล้ว กลุ่มฝนจะไม่เคลื่อนที่ผ่านแนวการแพร่คลื่นของสถานีภาคพื้นดินทั้งสองพร้อมกัน

สัญญาณขาลงที่ได้รับได้จากสถานีภาคพื้นดินทั้งสองจะถูกส่งไปยังสถานีหลัก (ซึ่งอาจเป็นที่สถานีใดสถานีหนึ่ง) ซึ่งที่สถานีดังกล่าวจะทำการเปรียบเทียบและเลือกสัญญาณที่ดีที่สุดจากหลักเกณฑ์ต่างๆ (Switched combining, Selection combining หรือ Maximal combining) มาใช้งาน

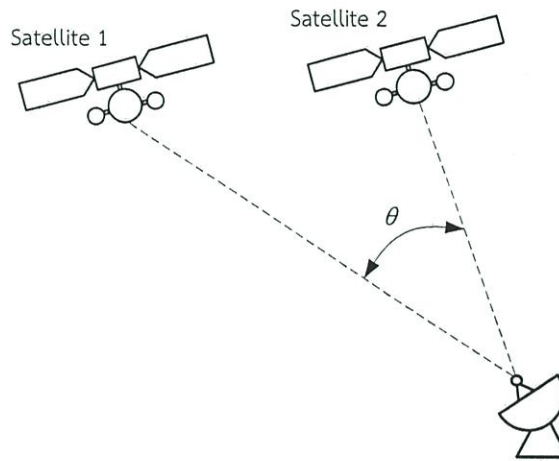


รูปที่ 2.12 ระยะห่างระหว่างสถานีภาคพื้นดินของเทคนิคการสลับสถานีภาคพื้นดิน

2.5.3.2 การสลับวงโคจรดาวเทียม (Orbital diversity)

เทคนิคการสลับวงโคจรดาวเทียม หรือ Orbital diversity เป็นเทคนิคที่ใช้ดาวเทียมมากกว่า 1 ดวงที่มีระยะห่างระหว่างกันมากพอที่แนวการแพร่คลื่นจะไม่ซ้อนทับกัน โดยใช้สถานีภาคพื้นดินเดียวกัน หลักการทำงานจะคล้ายกับการสลับสถานีภาคพื้นดินคือจะเลือกใช้ดาวเทียมที่สัญญาณมีผลกระทบจากฝนในแนวการแพร่คลื่นน้อยที่สุด เนื่องจากด้วยวิธีนี้ต้องการดาวเทียมสองดวงที่อยู่ห่างกันมาก รวมทั้งต้องการระบบจานสายอากาศสองระบบที่สถานีภาคพื้นดิน วิธีการนี้ให้ผล

ดีน้อยกว่าการใช้เทคนิคการสลับสถานีภาคพื้นดิน เนื่องจากขอบเขตของแนวการแพร่คลื่นบนพื้นโลกเป็นจุดเดียวกัน ซึ่งการลดทอนสัญญาณดาวเทียมส่วนใหญ่จะเกิดในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ที่ระดับความสูงต่ำกว่า 4 กิโลเมตร จึงทำให้ขอบเขตของแนวการแพร่คลื่นบนพื้นโลกของดาวเทียมทั้ง 2 ดวงมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 2.13 การสลับวงโคจรดาวเทียม

2.5.3.3 การสลับการใช้งานย่านความถี่ (Frequency diversity)

เทคนิคนี้การเชื่อมต่อในย่านความถี่ที่ใช้งานอยู่จะเปลี่ยนมาใช้ย่านความถี่ที่ต่ำลงเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบของการลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากฝน เช่น เดิมใช้งานอยู่ที่ย่านความถี่ Ka-band หรือ EHF จะเปลี่ยนมาใช้ความถี่ C-band หรือ Ku-band เมื่อค่าการลดทอนสัญญาณมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ และเปลี่ยนกลับไปใช้ย่านความถี่เดิมเมื่อกลับสู่สภาวะปกติ ดังนั้นสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้ทั้ง 2 ความถี่

ข้อจำกัดของเทคนิคการสลับการใช้งานย่านความถี่คือ การจัดความจุช่องสัญญาณ (Capacity) เนื่องจากเมื่อความถี่ต่ำลง ความจุช่องสัญญาณก็จะมีจำกัด ยังไม่รวมถึงการบริการที่ต้องการแถบความถี่ (Bandwidth) สูง

2.5.3.4 การส่งซ้ำ (Time diversity)

เทคนิคการส่งซ้ำโดยการหน่วงเวลา (Time delay) เป็นวิธีการค่อนข้างใหม่สำหรับการให้บริการ ซึ่งเหมาะกับการส่งข้อมูลที่สามารถส่งซ้ำในภายหลังได้ เช่น การใช้งาน Video on demand, มัลติมีเดีย เป็นต้น โดยใช้วิธีการส่งข้อมูลที่เกิดการจางหายอย่างรุนแรงซ้ำ และไม่สามารถกำหนดหรือสุ่มช่วงเวลาในการส่งซ้ำได้ แต่ช่วงเวลาในการส่งซ้ำจะพิจารณาจากปริมาณช่วงเวลาการเกิดการจางหาย ดังนั้นจะเห็นว่าเทคนิคการส่งซ้ำจะมีความสัมพันธ์กันกับช่วงเวลาสัญญาณในแนวการแพร่คลื่นเกิดการลดทอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงเวลาระหว่างการเกิดการลดทอนสัญญาณ

ความสัมพันธ์ทางสถิติของอัตราการตกของฝน และระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียม

การออกแบบระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมให้มีประสิทธิภาพ คือ การออกแบบระบบที่สามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่ส่งผลให้ระดับสัญญาณมีคุณภาพต่ำลงหรือเกิดการจางหาย โดยเฉพาะการสื่อสารในย่านความถี่สูง ซึ่งฝนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การต่อคุณภาพของสัญญาณ การศึกษาลักษณะทางกายภาพรวมทั้งความสัมพันธ์เชิงสถิติของอัตราการตกของฝนในแต่ละพื้นที่และระดับการลดทอนที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสาร จึงเป็นพื้นฐานที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์สาเหตุและปัจจัย ตลอดจนการออกแบบระบบในเชิงคณิตศาสตร์ต่อไป

งานวิจัยในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะของฝนที่สัมพันธ์กับการลดทอนสัญญาณดาวเทียม โดยพิจารณาความสัมพันธ์เชิงเวลาที่เกิดขึ้นระหว่างข้อมูลอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณดาวเทียมบริเวณสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินของประเทศไทย ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง จากผลการวิเคราะห์โดยใช้ค่าสหสัมพันธ์ข้าม (Cross correlation) และได้ศึกษาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน ซึ่งมีประโยชน์ต่อการออกแบบตำแหน่งการตั้งสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน ให้สามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบจากฝนจากฝนในทิศทางและระยะทางจากพื้นที่ที่พิจารณาได้ โดยใช้ค่าอัตสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ (Spatial auto correlation) ของข้อมูลในพื้นที่ประเทศญี่ปุ่น

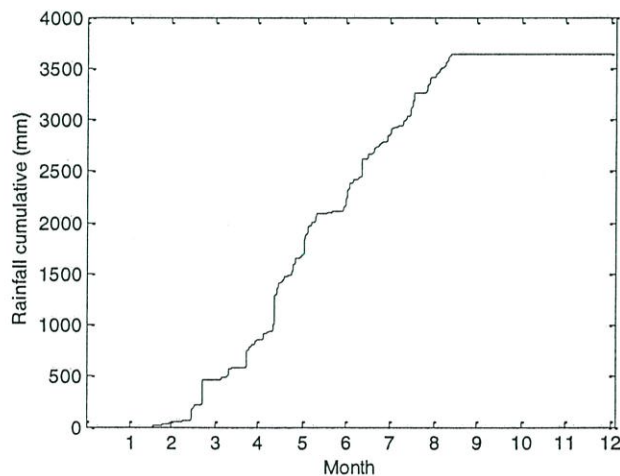
3.1 ลักษณะทางกายภาพของอัตราการตกของฝนและค่าการลดทอนสัญญาณดาวเทียม

ข้อมูลอัตราการตกของฝนที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์และคำนวณเชิงเวลาสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาจากการเก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบคานกระดกของบริษัท Casella Co.Ltd. ที่มีกระบวยรับน้ำฝนขนาด 0.5 มิลลิเมตร มีการบันทึกข้อมูลปริมาณน้ำฝนทุกๆ 1 นาที ซึ่งถูกติดตั้ง ณ สถานีดาวเทียมไทยคม แคราย จังหวัดนนทบุรี (ละติจูดที่ 13.8953608, ลองจิจูดที่ 100.5081123) เพื่อบันทึกข้อมูล ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ใช้ในการวิเคราะห์มีระยะเวลา 1 ปี (525,600 นาที) ในปี พ.ศ. 2554 โดยตัวอย่างไฟล์ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่บันทึกได้จากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนในรูปแบบไฟล์ .csv แสดงได้ดังรูปที่ 3.1 คอลัมน์แรกของตารางข้อมูลแสดง วัน/เดือน/ปี ที่ทำการบันทึกข้อมูลปริมาณน้ำฝน คอลัมน์ที่สองแสดง เวลา ที่ทำการบันทึก และคอลัมน์สุดท้ายจะแสดง

ปริมาณน้ำฝนสะสมที่เวลาที่ทำการบันทึกในหน่วยมิลลิเมตร และในรูปที่ 3.2 แสดงปริมาณน้ำฝนสะสมที่บันทึกได้ตลอดระยะเวลา 1 ปี รวมมีปริมาณน้ำฝนสะสม 3,638 มิลลิเมตร

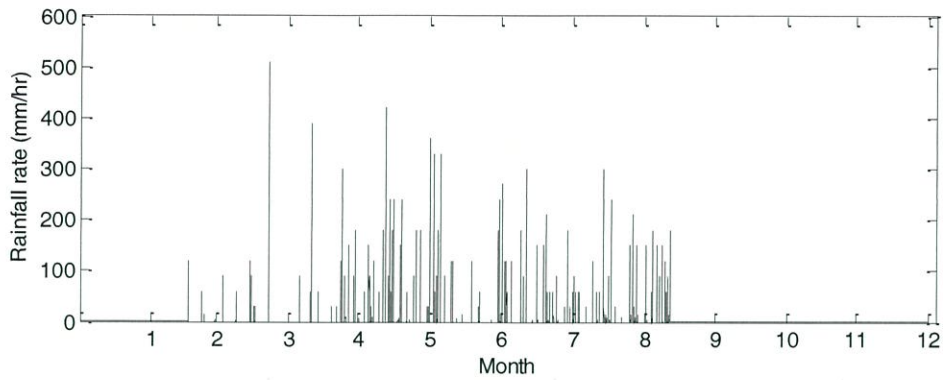
	A	B	C
1	Date	Time	Rainfall (mm)
2	2/16/2011	1:25:00 PM	1
3	2/16/2011	1:26:00 PM	1.5
4	2/16/2011	1:27:00 PM	0.5
5	2/16/2011	1:28:00 PM	0.5
6	2/16/2011	1:29:00 PM	0.5
7	2/16/2011	1:30:00 PM	0.5
8	2/16/2011	1:31:00 PM	0.5
9	2/16/2011	1:32:00 PM	0.5
10	2/16/2011	1:33:00 PM	0.5
11	2/16/2011	1:35:00 PM	0.5
12	2/16/2011	1:36:00 PM	0.5
13	2/16/2011	1:37:00 PM	0.5
14	2/16/2011	1:38:00 PM	0.5
15	2/16/2011	1:41:00 PM	0.5
16	2/16/2011	1:43:00 PM	0.5
17	2/16/2011	1:45:00 PM	0.5
18	2/16/2011	1:47:00 PM	0.5

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างข้อมูลปริมาณน้ำฝนในรูปแบบไฟล์ .csv ที่บันทึกได้



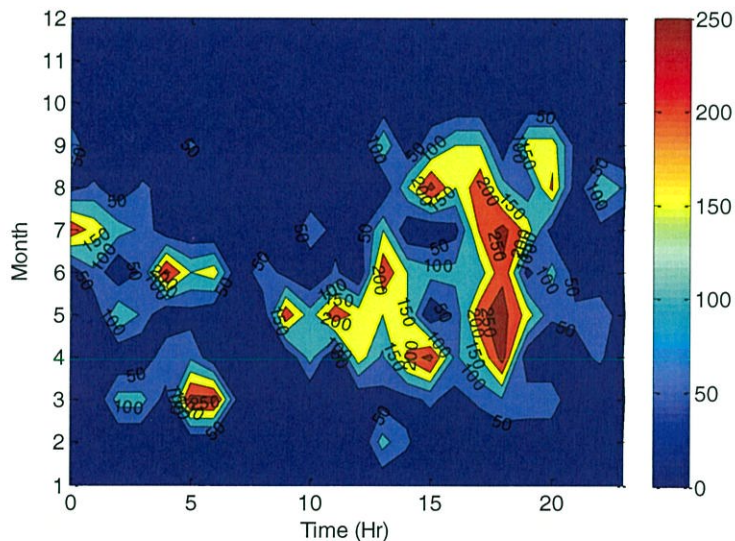
รูปที่ 3.2 ปริมาณน้ำฝนสะสมในปี พ.ศ. 2554

และจากสมการคำนวณอัตราการตกของฝนในสมการที่ (2.10) สามารถคำนวณอัตราการตกของฝนในปี พ.ศ. 2554 ได้ดังรูปที่ 3.3 และจะนำค่าอัตราการตกของฝนที่คำนวณได้ไปใช้เพื่อการคำนวณและวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 3.3 อัตราการตกของฝนในปี พ.ศ. 2554

เมื่อนำข้อมูลอัตราการตกของฝนตลอดระยะเวลา 1 ปีมาทำแผนภาพแสดงอัตราการตกของฝนสูงสุดในแต่ละชั่วโมง โดยการหาอัตราการตกของฝนสูงสุดในแต่ละชั่วโมงของแต่ละเดือน แล้วนำมาแสดงบนแผนภาพจะได้ดังรูปที่ 3.4 จากรูปพบว่า ช่วงเวลาที่เกิดฝนตกหนักในระยะเวลาของการบันทึกข้อมูลที่พิจารณา คือช่วงเวลาที่บ่าถึงค่าของแต่ละวันและมีปริมาณฝนตกสูงสุดในช่วงเดือน พฤษภาคม – สิงหาคม

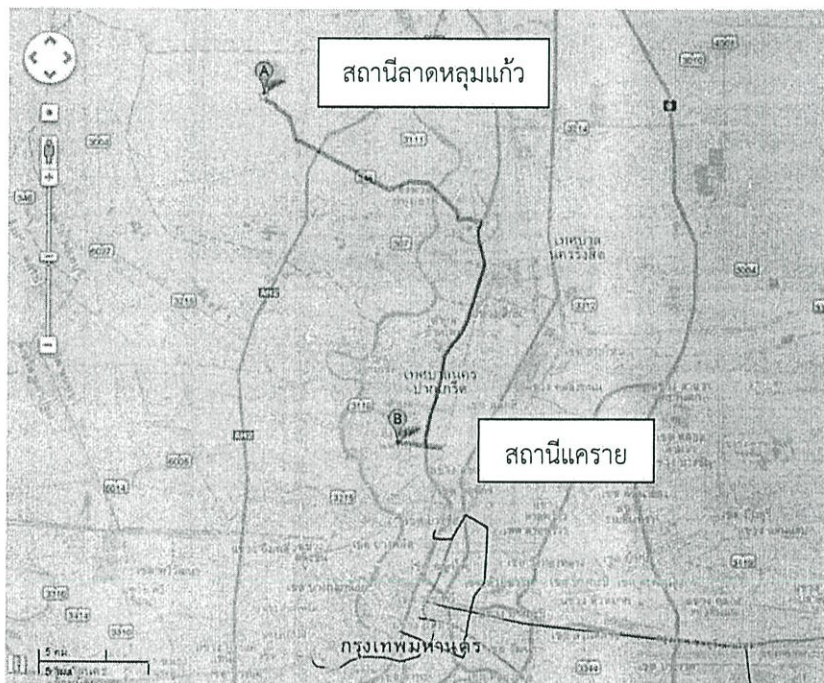


รูปที่ 3.4 อัตราการตกของฝนสูงสุดในแต่ละชั่วโมงในปี พ.ศ. 2554

ข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่นำมาใช้ศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ข้อมูลสัญญาณนำร่องดาวเทียมจากดาวไทยคม 4 ย่านความถี่เคเอ ที่บันทึกได้จากเครื่องรับสัญญาณนำร่อง (Tracking receiver) ที่ทำการบันทึกระดับของสัญญาณนำร่องดาวเทียมทุกๆ 1 วินาทีในรูปแบบไฟล์ .txt ในหน่วยเดซิเบลมิลลิวัตต์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.5

Log-2011-01-01.txt - Notepad		
File	Edit	Format View Help
Signal Strength from Tracking receiver		
2011-01-01	00:00:00	-66.1
2011-01-01	00:00:01	-66.2
2011-01-01	00:00:02	-66.1
2011-01-01	00:00:03	-66.1
2011-01-01	00:00:04	-66.1
2011-01-01	00:00:05	-66.1
2011-01-01	00:00:06	-66.2
2011-01-01	00:00:07	-66.1
2011-01-01	00:00:08	-66.1
2011-01-01	00:00:09	-66.0
2011-01-01	00:00:10	-66.1
2011-01-01	00:00:11	-66.1
2011-01-01	00:00:12	-66.1
2011-01-01	00:00:13	-66.1
2011-01-01	00:00:14	-66.2
2011-01-01	00:00:15	-66.1
2011-01-01	00:00:16	-66.2
2011-01-01	00:00:17	-66.0
2011-01-01	00:00:18	-66.1

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างข้อมูลสัญญาณนำร่องดาวเทียมไทยคม 4



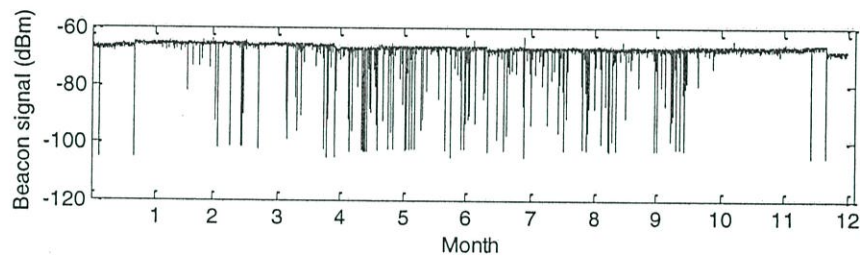
รูปที่ 3.6 ที่ตั้งของสถานีภาคพื้นดินไทยคมแครายและลาดหลุมแก้ว

โดยมีเครื่องรับสัญญาณนำร่องที่ทำการบันทึกข้อมูลอยู่ที่สถานีดาวเทียมไทยคมภาคพื้นดินทั้ง 2 แห่ง คือ สถานีแคราย จังหวัดนนทบุรี (ละติจูดที่ 13.90, ลองจิจูดที่ 100.51) และสถานีลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี (ละติจูดที่ 13.90, ลองจิจูดที่ 100.52) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างทั้ง 2 สถานีประมาณ 30 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยจุด A และจุด B แสดงที่ตั้งของสถานีแครายและลาดหลุมแก้ว ตามลำดับ และข้อมูลสัญญาณนำร่องดาวเทียมดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนเป็นระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียมโดยอาศัยสมการที่ (3.1) ในการคำนวณ

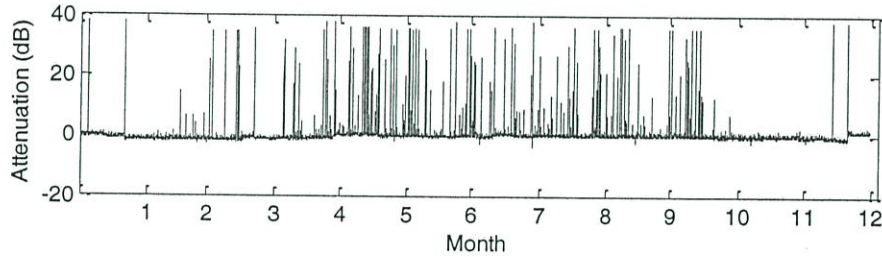
$$A = P_{ref} - P_{signal} \quad (3.1)$$

โดยที่ A คือระดับการลดทอนสัญญาณ (เดซิเบล), P_{ref} คือระดับสัญญาณอ้างอิง (Reference signal) (เดซิเบลมิลลิวัตต์) และ P_{signal} คือระดับสัญญาณนำร่องดาวเทียมที่ทำการบันทึกได้จากเครื่องรับสัญญาณนำร่อง (เดซิเบลมิลลิวัตต์)

ระดับสัญญาณอ้างอิง (P_{ref}) ของสัญญาณนำร่องที่สถานีภาคพื้นดินแคราย มีค่าเท่ากับ -67 เดซิ-เบลมิลลิวัตต์ และที่สถานีภาคพื้นดินลาดหลุมแก้ว มีค่าเท่ากับ -63 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ข้อมูลอัตราการตกของฝนจะถูกนำมาเปรียบเทียบในเชิงกายภาพกับระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียมในรูปแบบที่ 3.7 รูปที่ 3.8 เป็นการลดทอนสัญญาณดาวเทียมที่เกิดขึ้นที่สถานีภาคพื้นดินทั้ง 2 แห่งที่จะนำมาพิจารณาเป็นเงื่อนไขในการสลับสถานีภาคพื้นดินระหว่างสถานีทั้งสอง



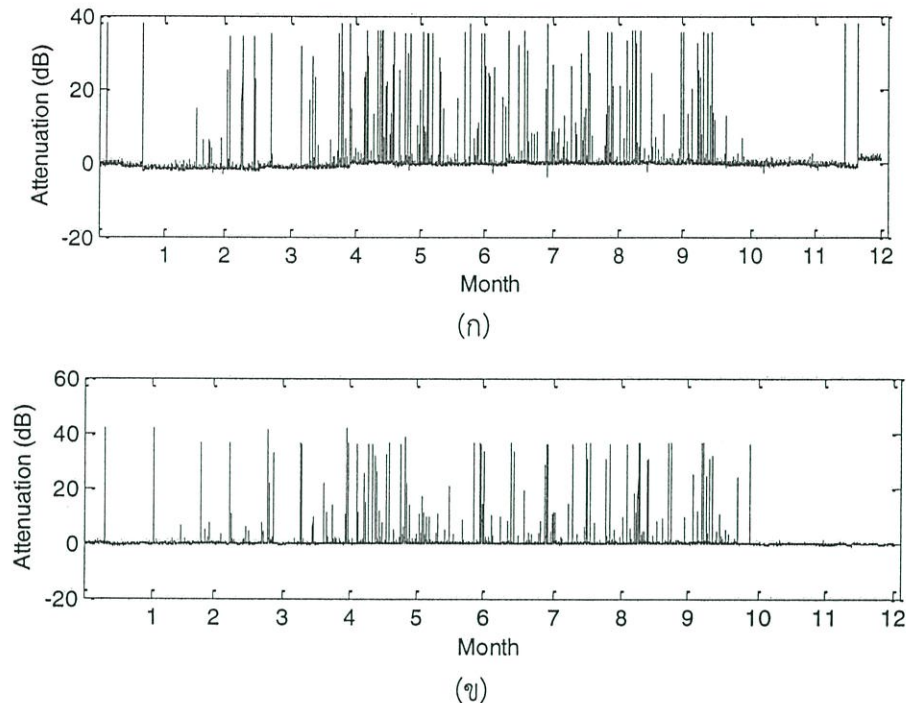
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 (ก) ระดับสัญญาณนำร่องจากดาวเทียมไทยคม 4

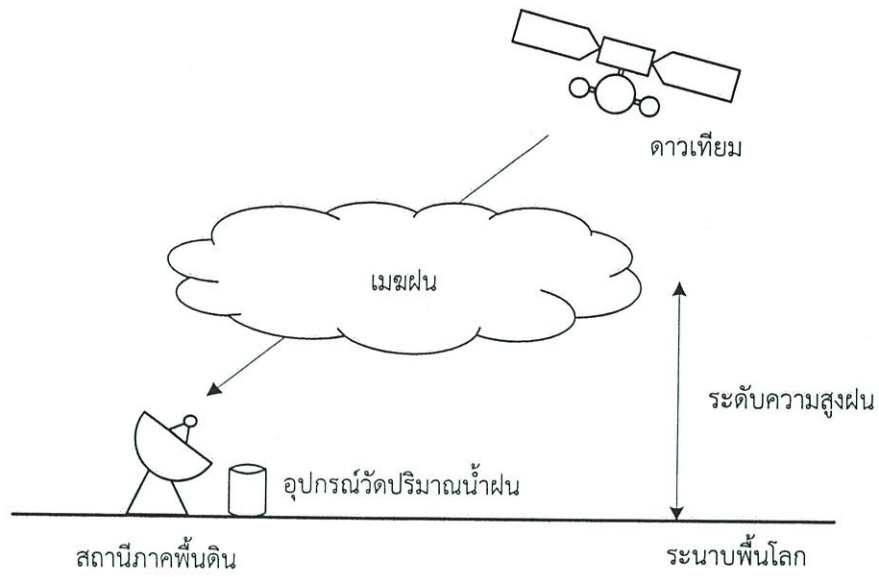
(ข) ระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียมไทยคม 4 ในปี พ.ศ. 2554



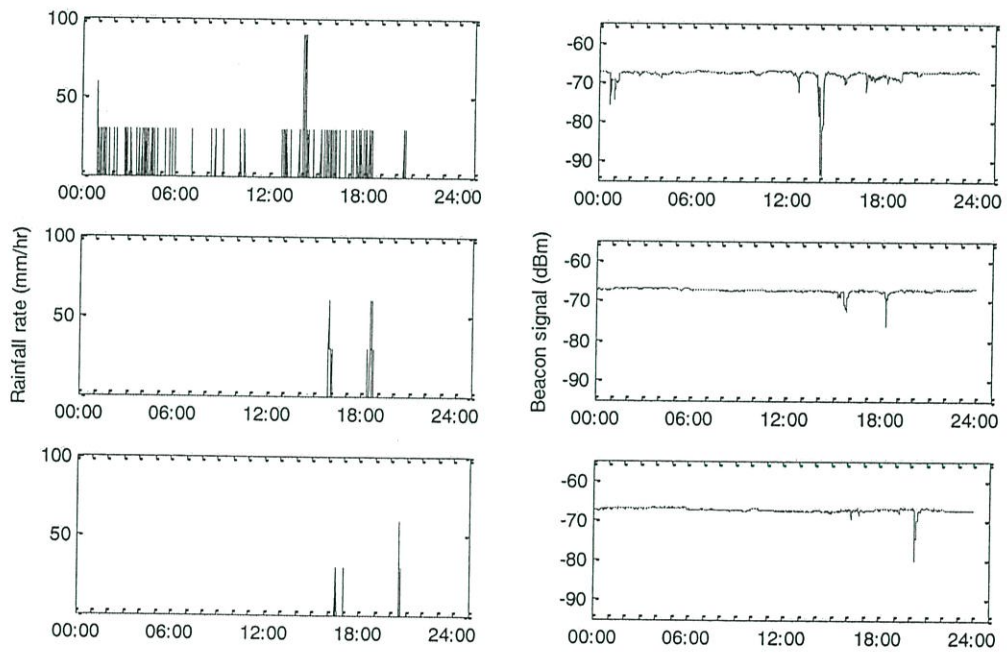
รูปที่ 3.8 ระดับการลดทอนสัญญาณสถานีดาวเทียมไทยคม
(ก) สถานีแคราย (ข) สถานีลาดหลุมแก้ว

การเก็บบันทึกข้อมูลอัตราการตกของฝนและข้อมูลการลดทอนสัญญาณดาวเทียมที่นำมาใช้สำหรับการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะบันทึกข้อมูลทั้งสอง ณ สถานีภาคพื้นดิน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ทางกายภาพ รวมถึงความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างปริมาณทั้งสอง แผนภาพการบันทึกข้อมูลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 อัตราการตกของฝนจะถูกวิเคราะห์ในหน่วยมิลลิเมตรต่อชั่วโมง (mm/hr) และการลดทอนกำลังงานสัญญาณดาวเทียมมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

จากแผนภาพแสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูลสัญญาณนำร่องดาวเทียมและเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนในรูปที่ 3.9 เมื่อทำการพิจารณาดำเนินการของสถานีภาคพื้นดินซึ่งเป็นตำแหน่งของการเก็บข้อมูลดังกล่าว และวงโคจรของดาวเทียมไทยคม 4 ดาวเทียมโทรคมนาคมที่โคจรอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตร พบว่าแนวการแพร่คลื่นระหว่างสถานีภาคพื้นดินและดาวเทียมจะมีทิศทางในแนวเอียง (Slant path) และจากตัวอย่างของข้อมูลที่บันทึกได้ สามารถสังเกตเห็นได้ว่านอกจากอัตราการตกของฝนจะมีความสัมพันธ์กับค่าการลดทอนสัญญาณในเชิงปริมาณแล้ว ค่าการหน่วงเวลาระหว่างอัตราการตกของฝนในแต่ละเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อลดทอนสัญญาณนั้นยังมีช่วงเวลาใกล้เคียงกันในแต่ละเหตุการณ์อีกด้วย ยกตัวอย่างดังข้อมูลที่ได้จากการสังเกต (Observation data) อัตราการตกของฝนและระดับสัญญาณนำร่องดาวเทียมรายวันที่บันทึกในช่วงเวลาเดียวกัน คือ วันที่ 1, 3 และ 5 สิงหาคม พ.ศ. 2554 ตามลำดับ ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 แผนภาพการบันทึกข้อมูลสัญญาณนำร่องดาวเทียมและปริมาณน้ำฝน



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างกราฟข้อมูลปริมาณน้ำฝน (ซ้าย)
และสัญญาณนำร่องดาวเทียมย่านความถี่เคเอ (ขวา)
วันที่ 1,3 และ 5 สิงหาคม พ.ศ.2554 (จากบนลงล่าง)

3.2 เปรียบเทียบผลการทำนายการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝนจากแบบจำลองและค่าที่วัดได้จริง

สำหรับการคำนวณค่าการลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนจากแบบจำลองดังกล่าวในบริเวณพื้นที่ประเทศไทย (สถานีแครายและลาดหลุมแก้ว บริษัท ไทยคม จำกัด) พารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องทราบเพื่อใช้ในการคำนวณการคาดคะเนการลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนตามแบบจำลองทั้งสอง แสดงได้ดังตารางที่ 3.1 – 3.3 โดยในตารางที่ 3.1 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองของ Crane และเนื่องจากประเทศไทยมีพื้นที่ตั้งอยู่ในเขตสภาพภูมิอากาศระหว่างพื้นที่ G และ H จากการแบ่งเขตสภาพภูมิอากาศของโลกตามสภาพฝนจากแบบจำลองของ Crane ในรูปที่ 2.9 ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์การลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนสำหรับแบบจำลองของ Crane โดยใช้อัตราการตกของฝนในช่วงเวลาร้อยละต่อปีต่างๆ จากทั้ง 2 เขตสภาพภูมิอากาศดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 แสดงค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง ITU-R P.618

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองของ Crane สำหรับการคำนวณค่าการลดทอนสัญญาณดาวเทียมในบริเวณพื้นที่ประเทศไทย

พารามิเตอร์ต่างๆ	ค่าที่ใช้ ณ สถานีแคราย	ค่าที่ใช้ ณ สถานีลาดหลุมแก้ว
ย่านความถี่ที่ใช้งาน (GHz)	20.1988	20.1988
มุมเงยของจานสายอากาศ (องศา)	62.54	62.58
ความสูงของสถานีภาคพื้นดินเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง (กิโลเมตร)	0	0
ตำแหน่งละติจูดของสถานีภาคพื้นดิน	13.90	13.90

ตารางที่ 3.2 อัตราการตกของฝนในบริเวณพื้นที่ประเทศไทยตามแบบจำลองของ Crane

ร้อยละต่อปี	อัตราการตกของฝนตามแบบจำลอง (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)	
	พื้นที่ G	พื้นที่ H
0.001	129	251
0.01	67	147
0.1	22	51
1	3.7	6.4

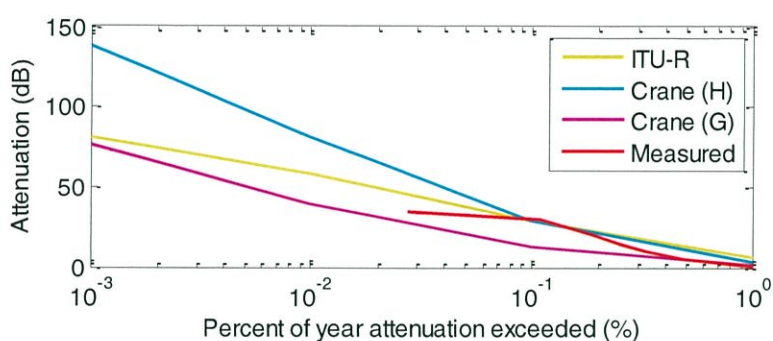
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง ITU-R P.618 สำหรับการคำนวณค่าการลดทอนสัญญาณดาวเทียมในบริเวณพื้นที่ประเทศไทย

พารามิเตอร์ต่างๆ	ค่าที่ใช้ ณ สถานีแคราย	ค่าที่ใช้ ณ สถานีลาดหลุมแก้ว
ย่านความถี่ที่ใช้งาน (GHz)	20.1988	20.1988
มุมเงยของงานสายอากาศ (องศา)	62.54	62.58
มุมกวาดของงานสายอากาศ (องศา)	125.32	124.72
ความสูงของสถานีภาคพื้นดิน เหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง (กิโลเมตร)	0	0
ตำแหน่งละติจูดของสถานีภาคพื้นดิน	13.90	13.90
ความสูงของฝน (กิโลเมตร)	4.86	4.86
อัตราการตกของฝน $R_{0.01}$ ตามแบบจำลอง (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)	60	60

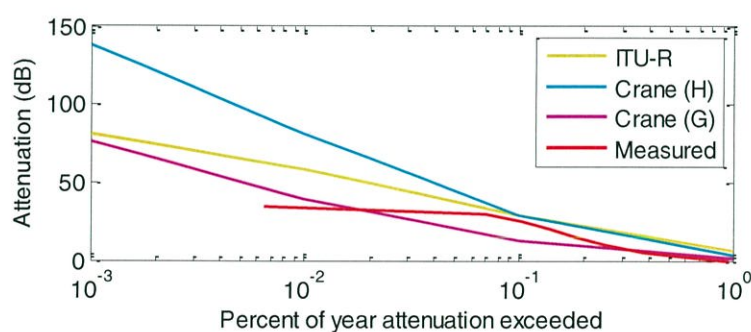
การเปรียบเทียบระดับการลดทอนสัญญาณในช่วงเวลาร้อยละต่อปีต่างๆ ตามแบบจำลองของ Crane และแบบจำลอง ITU-R โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามตารางที่ 3.1-3.3 กับการลดทอนสัญญาณที่บันทึกได้ในพื้นที่จริงแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 สำหรับสถานีแคราย และรูปที่ 3.12 สำหรับสถานีลาดหลุมแก้ว โดยข้อมูลอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณมีระยะเวลาทั้งสิ้น 1 ปีหรือ 325,600 นาที (1 มกราคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2554) และคำนวณตามสมการที่ (2.12) - (2.23) สำหรับแบบจำลองของ Crane และสมการที่ (2.24) - (2.40) สำหรับแบบจำลอง ITU-R P.618

จากกราฟการเปรียบเทียบการลดทอนสัญญาณที่ได้พบว่า ระดับการลดทอนสะสมรายปีของการลดทอนที่เกิดขึ้นจริงมีระดับการลดทอนต่ำกว่าค่าการลดทอนที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ITU-R และแบบจำลองของ Crane ในเขตสภาพภูมิอากาศ H เนื่องจากบริเวณพื้นที่ที่ทำการติดตั้งเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนนั้น เป็นเขตพื้นที่คาบเกี่ยวกันระหว่างเขตสภาพภูมิอากาศ H และเขตสภาพภูมิอากาศ G โดยเขตสภาพภูมิอากาศ H จะครอบคลุมพื้นที่ภาคกลางจนถึงพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งสภาพภูมิอากาศในบริเวณนี้ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมเขตร้อน จึงส่งผลให้อัตราการตกของฝนมีปริมาณสูง ซึ่งแตกต่างจากผลการคำนวณที่ได้จากเขตสภาพภูมิอากาศ G ที่มีพื้นที่ครอบคลุมรอยต่อภาคกลางจนถึงภาคเหนือของประเทศไทย โดยในบริเวณนี้อัตราการตกของฝนจะมีค่าต่ำกว่าหากเปรียบเทียบกับเขตสภาพภูมิอากาศ H

นอกจากนี้ในการออกแบบระบบสื่อสาร ผู้ให้บริการจะใช้ระดับการลดทอนสัญญาณในช่วงเวลาร้อยละต่อปีต่างๆ เป็นตัวกำหนดมาตรฐานของการสื่อสาร เช่น โดยทั่วไปในการสื่อสารผ่านดาวเทียมต้องการให้ระบบการสื่อสารมีมาตรฐานการใช้งานได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99.99 ต่อปี ดังนั้นการลดทอนหรือการต่อคุณภาพของสัญญาณจะต้องไม่เกินร้อยละ 0.01 ต่อปี โดยในปี พ.ศ. 2554 ระดับการลดทอนสัญญาณที่บันทึกได้มีค่าสูงสุดที่สถานีแครายเท่ากับ 38 เดซิเบลและมีทั้งสิ้น 142 นาทีคิดเป็นร้อยละ 0.027 ต่อปี และที่สถานีลาดหลุมแก้วมีระดับการลดทอนสูงสุดเท่ากับ 42 เดซิเบลและมีทั้งสิ้น 16 นาทีคิดเป็นร้อยละ 0.0065 ต่อปี



รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบการลดทอนสัญญาณดาวเทียมจากแบบจำลองและระดับที่วัดได้จริงบริเวณสถานีแคราย



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบการลดทอนสัญญาณดาวเทียมจากแบบจำลองและระดับที่วัดได้จริงบริเวณสถานีลาดหลุมแก้ว

3.3 ความสัมพันธ์เชิงเวลาระหว่างอัตราการตกของฝนและระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียม

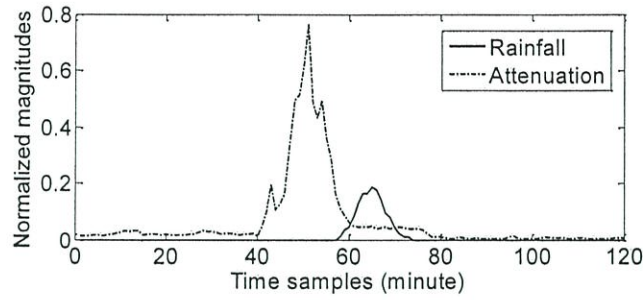
ค่าสหสัมพันธ์ข้าม (Cross-Correlation) เป็นปริมาณทางสถิติที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหรือดัชนีสองตัวหรือมากกว่า ที่บอกทิศทางและขนาดของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เราเลือกมาศึกษาว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ และเป็นไปในทิศทางใด สมการแสดงการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่าง 2 ตัวแปร เป็นดังสมการที่ (3.2)

$$r(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} (x_i - \bar{x})(y_{i+\tau} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_{i+\tau} - \bar{y})^2}} \quad (3.2)$$

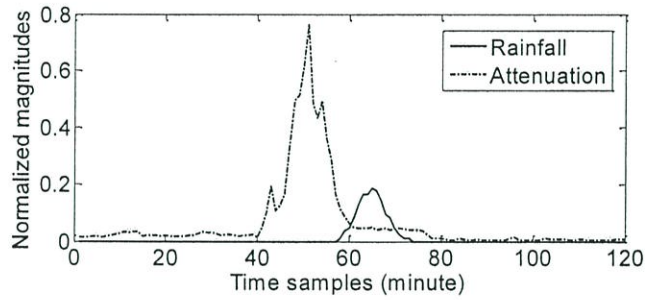
โดยในที่นี้ r คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณในแต่ละเหตุการณ์, N คือความยาวของชุดข้อมูล, τ คือค่าหน่วงเวลา, x_i และ y_i คือ ค่าการลดทอนสัญญาณดาวเทียมและอัตราการตกของฝน ณ เวลา i ในหน่วยมิลลิเมตรต่อชั่วโมงและเดซิเบลตามลำดับ, \bar{x} และ \bar{y} แทนค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวแปร

รูปที่ 3.13 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบระดับการลดทอนสัญญาณจากสัญญาณนำร่องดาวเทียมไทยคม 4 ในย่านความถี่เคเอ (20.1998 กิกะเฮิร์ตซ์) และข้อมูลอัตราการตกของฝนที่บันทึกจากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบคานกระดก จากรูปข้อมูลทั้งสองถูกนอร์มัลไลซ์ (Normalize) ด้วยค่าสูงสุดของข้อมูลแต่ละชนิดในปี พ.ศ. 2554 คือ อัตราการตกของฝน 510 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงและการลดทอนสัญญาณดาวเทียม ณ สถานีภาคพื้นดินไทยคมแคราย 38.1920 เดซิเบลมิลลิวัตต์ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่า นอกจากอัตราการตกของฝนจะมีความสัมพันธ์ในเชิงปริมาณกับค่าการลดทอนกำลังงานสัญญาณแล้ว ค่าหน่วงเวลาของข้อมูลทั้งสอง ยังมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละเหตุการณ์อีกด้วย

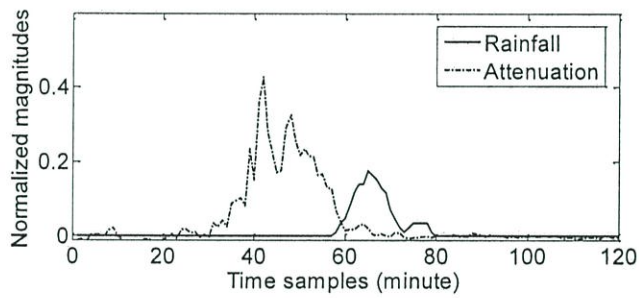
รูปที่ 3.13 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบระดับการลดทอนสัญญาณจากสัญญาณนำร่องดาวเทียมไทยคม 4 ในย่านความถี่เคเอ (20.1998 กิกะเฮิร์ตซ์) และข้อมูลอัตราการตกของฝนที่บันทึกจากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบคานกระดก จากรูปข้อมูลทั้งสองถูกนอร์มัลไลซ์ (Normalize) ด้วยค่าสูงสุดของข้อมูลแต่ละชนิดในปี พ.ศ. 2554 คือ อัตราการตกของฝน 510 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงและการลดทอนสัญญาณดาวเทียม ณ สถานีภาคพื้นดินไทยคมแคราย 38.1920 เดซิเบลมิลลิวัตต์ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่า นอกจากอัตราการตกของฝนจะมีความสัมพันธ์ในเชิงปริมาณกับค่าการลดทอนกำลังงานสัญญาณแล้ว ค่าหน่วงเวลาของข้อมูลทั้งสอง ยังมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละเหตุการณ์อีกด้วย



(ก)



(ข)



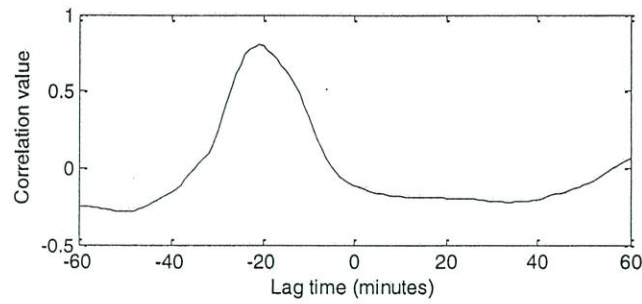
(ค)

รูปที่ 3.13 ตัวอย่างอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณ

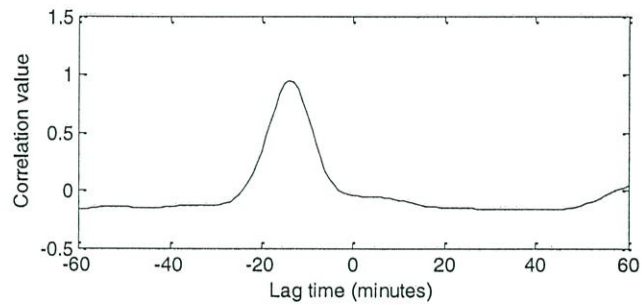
(ก) เหตุการณ์แรก (29 เมษายน พ.ศ. 2554) (ข) เหตุการณ์ที่สอง (11 พฤษภาคม พ.ศ. 2554)

(ค) เหตุการณ์ที่สาม (5 เมษายน พ.ศ. 2554)

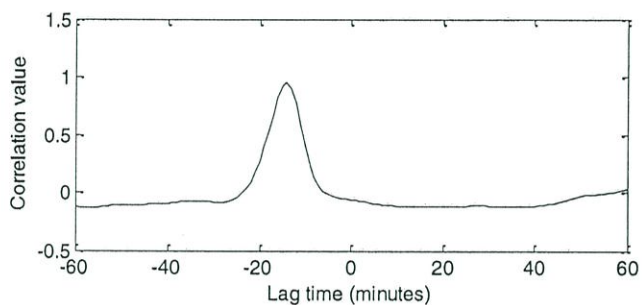
จากตัวอย่างเหตุการณ์อัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณดาวเทียมในรูปที่ 3.13 ค่าสหสัมพันธ์ข้ามของเหตุการณ์ดังกล่าวที่คำนวณจากสมการที่ (3.2) แสดงอยู่ในรูปที่ 3.14 และพบว่า ค่าสหสัมพันธ์ของทั้ง 3 เหตุการณ์มีค่าค่อนข้างสูงและมีค่าเป็นบวก



(ก)



(ข)

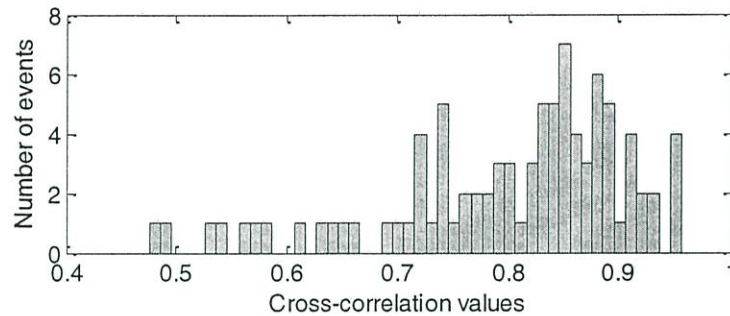


(ค)

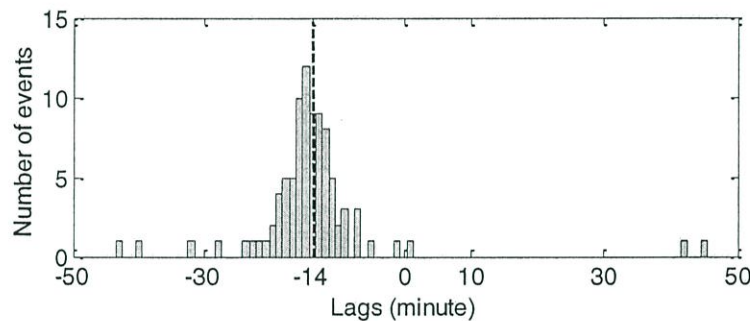
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างค่าสหสัมพันธ์ข้ามของอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณ
 (ก) เหตุการณ์แรก (29 เมษายน พ.ศ.2554) (ข) เหตุการณ์ที่สอง (11 พฤษภาคม พ.ศ.2554)
 (ค) เหตุการณ์ที่สาม (5 เมษายน พ.ศ.2554)

รูปที่ 3.15 แสดงฮิสโทแกรมของค่าสหสัมพันธ์ข้ามสูงสุด (Highest cross correlation) ระหว่างอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลตัวอย่างเหตุการณ์ที่เกิดการลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนที่มีอัตราการตกของฝนสูงกว่า 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจำนวนทั้งสิ้น 90 เหตุการณ์ในปี พ.ศ. 2554 และรูปที่ 3.16 แสดงฮิสโทแกรมของค่าหน่วงเวลา (Lag time) ที่ทำให้เกิดค่าสหสัมพันธ์ข้ามสูงสุดดังกล่าว พบว่าค่าสหสัมพันธ์ข้ามสูงสุดของเหตุการณ์ร้อยละ 60 มีค่ามากกว่า 0.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหตุการณ์ทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอย่างสูงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเนื่องจากค่าสหสัมพันธ์ข้ามสูงสุดทั้งหมดมีค่าเป็นบวก นั่นคือ หากเกิดฝนในปริมาณมาก ค่าการลดทอนก็จะสูง และในทางกลับกัน หากเกิดฝนน้อย ค่าการลดทอนก็จะต่ำลงเช่นกัน โดยตำแหน่งที่เกิดฝนและการลดทอนมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามสูงสุดห่างกันเฉลี่ย 14 นาที โดยการลดทอนกำลังงานสัญญาณจะเกิดก่อนการเกิดฝนในบริเวณที่ทำการบินที่ข้อมูล ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้เกิดค่าหน่วงเวลา

ดังกล่าวอาจมาจากสัญญาณตามแนวการแพร่คลื่นถูกผลกระทบจากฝนก่อนที่จะเดินทางมาถึงหน้างานสายอากาศรับที่สถานีภาคพื้นดิน ซึ่งเป็นสมมติฐานที่จะต้องทำการหาสาเหตุที่แท้จริงต่อไป



รูปที่ 3.15 ฮิสโทแกรมค่าสหสัมพันธ์ข้ามจากเหตุการณ์การเกิดฝนที่สนใจ (90 เหตุการณ์)



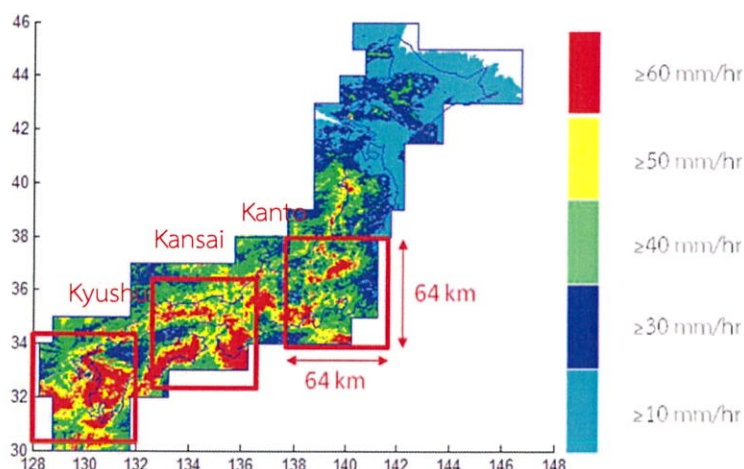
รูปที่ 3.16 ฮิสโทแกรมค่าหน่วงเวลาระหว่างอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากค่าสหสัมพันธ์ข้ามสูงสุดจากเหตุการณ์การเกิดฝนที่สนใจ (90 เหตุการณ์)

3.4 ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน

การตั้งสถานีภาคพื้นดินสำรอง (Diverse site) สำหรับเทคนิคการสลับสถานีดาวเทียม ในกรณีที่สถานีภาคพื้นดินหลักเกิดฝนตกหนักและส่งผลให้เกิดการจางหายของสัญญาณดาวเทียม สิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึง คือ ระยะห่างระหว่างสถานีภาคพื้นดินที่เหมาะสมที่ทำให้สถานีภาคพื้นดินทั้งสองจะไม่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากฝนในเวลาเดียวกัน กล่าวคือสถานีสำรองจะต้องไม่อยู่ในบริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากกลุ่มฝนเดียวกันกับสถานีหลัก การศึกษาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน โดยอาศัยข้อมูลอัตราการตกของฝนที่ยาวนานเพียงพอ ทำให้ทราบถึงปริมาณทางสถิติอัตราการตกของฝนที่สัมพันธ์กับระยะห่างจากสถานีภาคพื้นดินที่พิจารณา มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนในพื้นที่ต่างๆ เช่น การศึกษาลักษณะความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนที่ระยะห่างต่างๆ ระหว่าง 2 สถานี ในเมือง Kanto ประเทศญี่ปุ่น [29] โดยใช้ข้อมูลอัตราการตกของฝนจำนวน 13 จุดในเมือง Kanto ทำให้ทราบถึง

ระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างสถานีภาคพื้นดินทั้ง 2 แห่งสำหรับการตั้งสถานีภาคพื้นดินในเมือง Kanto หรือการศึกษาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนจำนวน 23 ตำแหน่งในประเทศอังกฤษจากงานวิจัยของ H. Fukuchi [30] เป็นต้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาการใช้ค่าอัตโนมัติสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน (Spatial auto correlation of rainfall rate) มาวิเคราะห์ลักษณะความสัมพันธ์ของอัตราการตกของฝนที่ระยะทางต่างๆ เพื่อใช้สำหรับการออกแบบระยะห่างระหว่างสถานีภาคพื้นดินให้สามารถหลีกเลี่ยงบริเวณและระยะทางที่เกิดฝนตกชุก อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลอัตราการตกของฝนที่มีการบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องและครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษา ยิ่งข้อมูลมีปริมาณและความละเอียดมาก ผลการวิเคราะห์ก็จะชัดเจนมากยิ่งขึ้นเช่นกัน ซึ่งไม่มีข้อมูลอัตราการตกของฝนดังกล่าวสำหรับประเทศไทย ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาโดยใช้ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมอุตุนิยมวิทยาประเทศญี่ปุ่น (Japan Meteorological Office) ในรูปแบบของข้อมูลเรดาร์ ที่บันทึกอัตราการตกของฝนทุกๆ 1 กิโลเมตร และทุกๆ 5 นาที ทั่วประเทศญี่ปุ่น

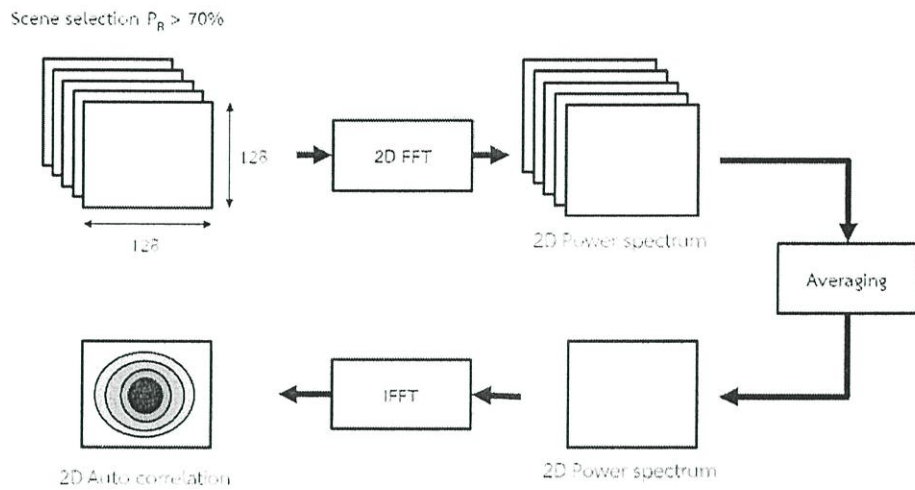


รูปที่ 3.17 พื้นที่ของประเทศญี่ปุ่นที่ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน [31]

โดยข้อมูลที่นำมาศึกษามีระยะเวลาทั้งสิ้น 4 ปี (กรกฎาคม พ.ศ. 2552 – มิถุนายน พ.ศ. 2556) พิจารณาอัตราการตกของฝนที่เมือง Kanto, Kansai และ Kyushu มีพื้นที่ที่พิจารณาขนาด 64x64 กิโลเมตร จากจุดศูนย์กลางที่พิจารณาซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีอัตราการตกของฝนค่อนข้างสูงจากค่าปริมาณน้ำฝนสะสมเฉลี่ย 4 ปีของประเทศญี่ปุ่นในรูปที่ 3.17

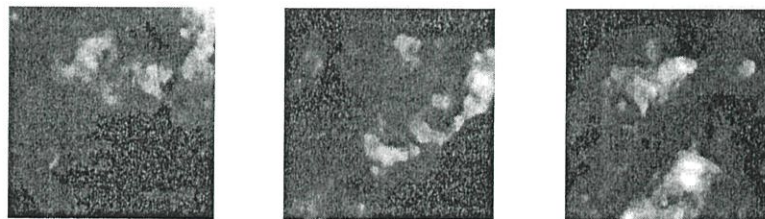
แผนผังลำดับขั้นตอนการคำนวณหาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนแสดงได้ดังรูปที่ 3.18 โดยข้อมูลอัตราการตกของฝนที่นำมาวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของเมทริกซ์ขนาด 128x128

แต่ละจุดแทนระยะห่างของพื้นที่ขนาด 500 เมตร และในแต่ละเมทริกซ์ที่นำมาคำนวณจะต้องมีจุดข้อมูลอย่างน้อยร้อยละ 70 ที่มีอัตราการตกของฝน 1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไป

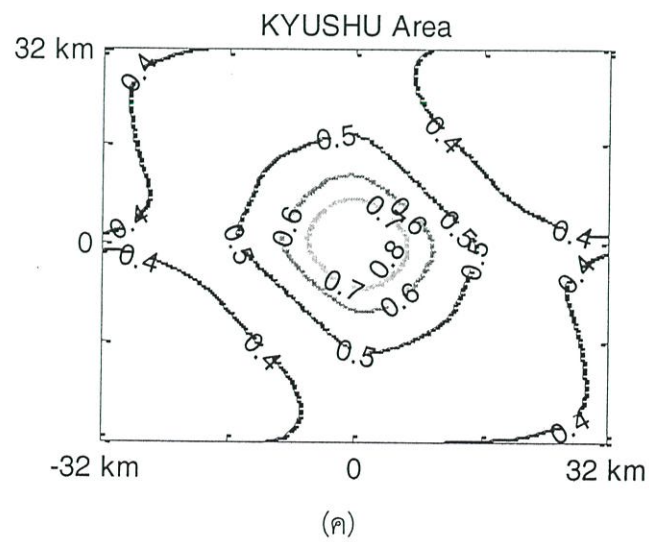
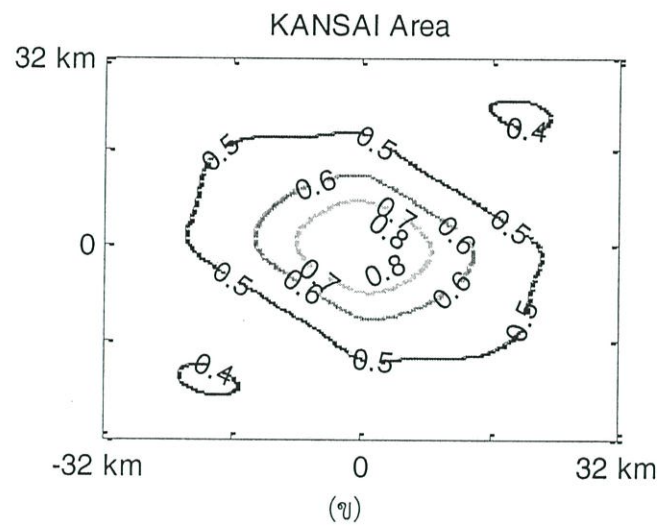
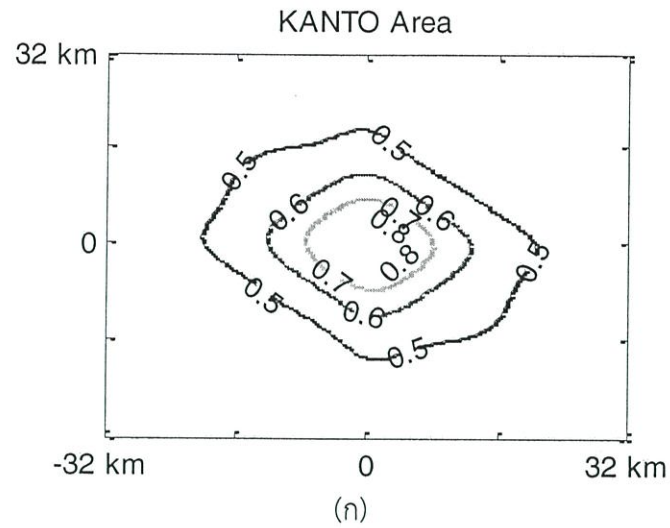


รูปที่ 3.18 แผนผังการคำนวณหาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน

รูปที่ 3.19 แสดงตัวอย่างของเมทริกซ์ข้อมูลอัตราการตกของฝนที่นำมาใช้ในการคำนวณ โดยจุดสีขาวในภาพแสดงจุดที่มีฝนในบริเวณพื้นที่นั้น จากนั้นจะใช้วิธีการ Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อเปลี่ยนเมทริกซ์อัตราการตกของฝนทั้งหมด ให้อยู่ในรูป Power spectrum และทำการเฉลี่ยเมทริกซ์ของ Power spectrum ทั้งหมดด้วยจำนวนของเมทริกซ์ที่พิจารณา และใช้ Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) เพื่อหาอัตสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน (Spatial auto correlation)



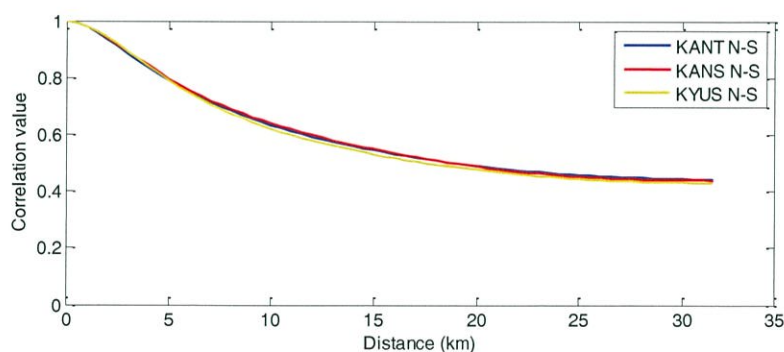
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างเหตุการณ์การเกิดฝนอย่างน้อยร้อยละ 70 ของเมทริกซ์ฝนที่พิจารณา



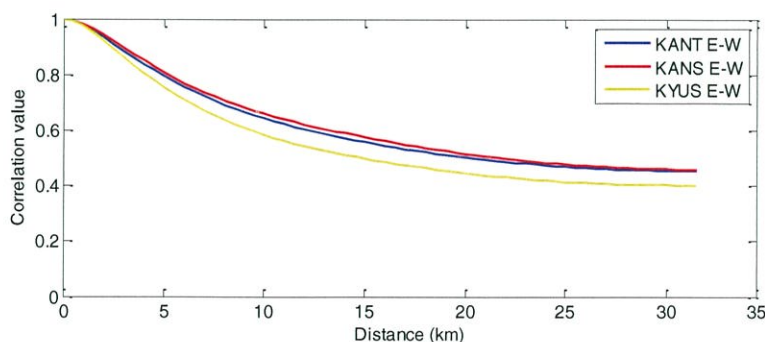
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน (ก) Kanto (ข) Kansai (ค) Kyushu

การศึกษาค่าอัตสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนบริเวณเมือง Kanto, Kansai และ Kyushu ของประเทศญี่ปุ่น ให้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.20 แกน x แสดงระยะทางในแนวตะวันตก - ตะวันออก รวมเป็นระยะทางทั้งสิ้น 64 กิโลเมตร แกน y แสดงระยะทางในแนวเหนือ - ใต้ รวมระยะทางทั้งสิ้น 64 กิโลเมตร เช่นกัน ที่เมือง Kanto มีเมทริกซ์ที่นำมาใช้ในการคำนวณทั้งสิ้น 14,368 เมทริกซ์, ที่เมือง Kansai มี 24,731 เมทริกซ์และที่เมือง Kyushu มี 22,808 เมทริกซ์

เนื่องจากลักษณะพื้นที่ของ Kanto เป็นบริเวณพื้นที่ราบ ไม่มีภูเขา จึงมีค่าอัตสหสัมพันธ์ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและสัมพันธ์กับระยะทาง เมื่อเทียบกับค่าอัตสหสัมพันธ์ที่เมือง Kansai และ Kyushu ที่มีคุณสมบัติที่ต่างกันอย่างกายภาพ (Anisotropic property) และค่าอัตสหสัมพันธ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในฟังก์ชันของระยะทาง เมื่อทำการพลอตค่าอัตสหสัมพันธ์ในฟังก์ชันของระยะทางจากจุดศูนย์กลางไปในแนวตะวันตก - ตะวันออกและในแนวเหนือ - ใต้ (Directions of Autocorrelation) ของแต่ละพื้นที่จากรูปที่ 3.20 จะได้กราฟค่าสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ที่สัมพันธ์กับระยะทางตั้งแต่ 0 ถึง 32 กิโลเมตรของทั้ง 3 พื้นที่ ดังรูปที่ 3.21



(ก)

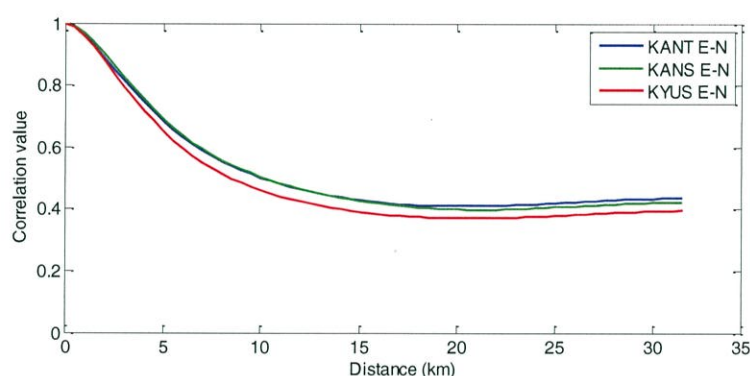


(ข)

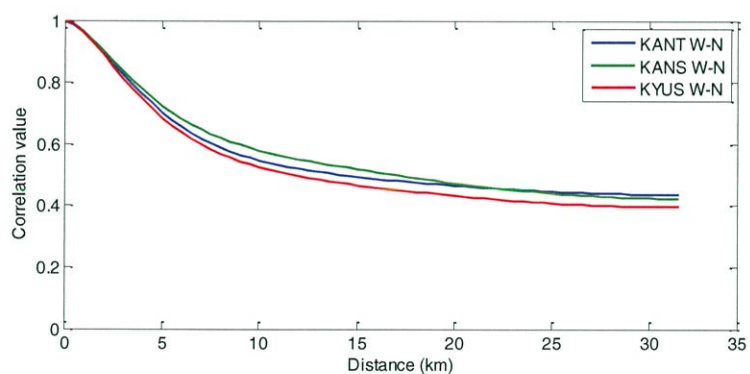
รูปที่ 3.21 ค่าอัตสหสัมพันธ์เชิงพื้นที่ในทิศทางต่างๆ (ก) แนวเหนือ - ใต้ (ข) แนวตะวันตก - ตะวันออก

ในมุมมองของเทคนิคการสลับลานภาคพื้นดิน ค่าอัตราสัมพันธ์ที่ลดลงอย่างรวดเร็วที่สัมพันธ์กับระยะทางจะมีประโยชน์ต่อการตั้งสถานีสำรองเป็นอย่างมาก ดังเช่นที่เมือง Kyushu (เส้นกราฟสีเขียวในรูปที่ 3.21) เนื่องจากค่าอัตราสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนจะมีค่าน้อยลงในระยะทางที่ไม่ไกลจากจุดที่พิจารณา ทำให้สามารถออกแบบการตั้งสถานีภาคพื้นดินทั้ง 2 แห่งได้ในระยะทางที่ไม่ไกลจากกันมากนัก

นอกจากจะทำการพิจารณาในแนวตะวันตก - ตะวันออกและในแนวเหนือ - ใต้แล้ว ยังได้ทำการทดสอบในแนว 45 องศา ทั้งในทิศตะวันออกเฉียงเหนือและตะวันตกเฉียงเหนือ ดังรูปที่ 3.22 และพบว่าค่าอัตราสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนในแนว 45 องศา ลดลงอย่างรวดเร็วกว่าการพิจารณาที่แนวตะวันตก - ตะวันออกหรือที่แนวเหนือ - ใต้ และที่เมือง Kyushu ยังคงมีค่าอัตราสัมพันธ์ที่ลดลงรวดเร็วกว่าอีก 2 เมืองที่พิจารณาเช่นเดียวกัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.22 ค่าอัตราสัมพันธ์เชิงพื้นที่ในทิศทางต่างๆ

(ก) ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (ข) ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ

การศึกษาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนสำหรับบริเวณพื้นที่ประเทศไทย จะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการตั้งสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน เพื่อวิเคราะห์ความหนาแน่น, ทิศทาง และระยะทางของฝนที่มีผลกระทบต่อสถานีภาคพื้นดินสำรอง ทั้งนี้ข้อมูลที่ใช้สำหรับการศึกษา

และวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนนั้น จะต้องอาศัยข้อมูลอัตราการตกของฝนที่มีการบันทึกอย่างต่อเนื่องและครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษา ยิ่งข้อมูลมีปริมาณและความละเอียดมาก ผลการวิเคราะห์ก็จะชัดเจนมากยิ่งขึ้นเช่นกัน ในปัจจุบันเนื่องจากยังไม่มีข้อมูลดังกล่าว การศึกษาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนสำหรับประเทศไทย จึงเป็นหัวข้อวิจัยที่ควรมีการศึกษาต่อไปในอนาคตหากมีข้อมูลเพียงพอ

บทที่ 4

แบบจำลองการประมาณค่าระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียม อันเนื่องมาจากฝน

4.1 แบบจำลองข้อมูล (Data model)

แบบจำลอง Linear dynamical system response (LDSR) เป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงทางเวลาของสถานะของระบบ ประกอบด้วย 2 สมการ คือ สมการแสดงสถานะของระบบ (State equation) และสมการข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัด (Observation equation)

สมการแสดงสถานะของระบบ ในสมการที่ (4.1) เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ของสถานะของระบบที่เวลา $t+1$ ที่สัมพันธ์กับสถานะของระบบที่เวลาก่อนหน้า t และสัญญาณรบกวน w_t

$$x_{t+1} = Ax_t + w_t \quad (4.1)$$

เมื่อ A คือปริมาณที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของระบบที่เวลา $t+1$ และ t และ w_t เป็นสัญญาณรบกวนที่มีการแจกแจงแบบเกาส์เซียนที่ค่าเฉลี่ย (Mean) เป็น 0 และค่าความแปรปรวน (Variance) เท่ากับ Q หรือ $w_t \sim N(0, Q)$

สมการข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดตั้งสมการที่ (4.2) แสดงข้อมูลที่ได้จากการสังเกต y_t ณ เวลา t ในรูปแบบของฟังก์ชันเชิงเส้นของสถานะของระบบ x_t ภายใต้สัญญาณรบกวน v_t

$$y_t = Cx_t + v_t \quad (4.2)$$

เมื่อ C เป็นอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของระบบและข้อมูลที่ได้จากการสังเกต สัญญาณรบกวน v_t มีการแจกแจงแบบเกาส์เซียนที่ค่าเฉลี่ย (Mean) เป็น 0 และค่าความแปรปรวน (Variance) เท่ากับ R หรือ $v_t \sim N(0, R)$ แต่เป็นอิสระ (Independent) กับสัญญาณรบกวน w_t จากสมการแสดงสถานะของระบบ

จากความสัมพันธ์เชิงสถิติของอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจากฝนที่คำนวณได้ในหัวข้อ 3.3 พบว่าอัตราการตกของฝนและการลดทอนที่เกิดขึ้นมีค่าในช่วงเวลาระหว่างข้อมูลทั้งสองเฉลี่ย 14 นาที วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ใช้แบบจำลอง LDSR ซึ่งเป็นแบบจำลอง

แสดงการเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาของอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณดาวเทียม ได้ดังสมการที่ (4.3) - (4.4)

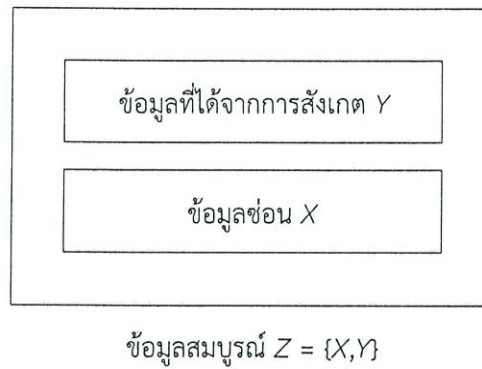
$$x_{t+1} = Ax_t + w_t, \quad t = 1, \dots, n \quad (4.3)$$

$$y_{t+\tau} = Cx_t + v_t, \quad t = 1, \dots, n \quad (4.4)$$

โดยที่ x_t แทนระดับการลดทอนของสัญญาณดาวเทียม (เดซิเบล), y_t แทนอัตราการตกของฝนที่บันทึกได้ (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง), τ แทนค่าหน่วงเวลาเฉลี่ยระหว่างอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 14 นาที จากสมการที่ (4.3) - (4.4) มีพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าคือ A หรือปริมาณที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณที่เวลาปัจจุบันและที่เวลาถัดไป, Q หรือค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน w_t และ R หรือความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน v_t โดยค่า C ในสมการที่ (4.4) หรืออัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกของฝนและค่าการลดทอนกำลังงานสัญญาณจะคำนวณจากอัตราส่วนของอัตราการตกของฝนและการลดทอนสูงสุดของแต่ละเหตุการณ์ที่เกิดฝนที่พิจารณา ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.4147 จากเหตุการณ์การเกิดฝน 90 เหตุการณ์ที่พิจารณาในปี พ.ศ. 2554 โดยจะใช้ Expectation - Maximization (EM) algorithm ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า $\theta = \{A, Q, R\}$ ดังกล่าว

4.2 วิธีการคาดหมาย - การหาค่าสูงสุด (Expectation - Maximization หรือ EM algorithm)

EM Algorithm [32] เป็นกระบวนการวนซ้ำ (Iterative method) สำหรับการคำนวณค่าประมาณค่าควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation) ของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า θ เมื่อทราบข้อมูลเพียงบางส่วนของชุดข้อมูลสมบูรณ์ โดยรูปแบบทั่วไปของ EM algorithm จะประกอบด้วยข้อมูลที่ได้จากการสังเกต Y และข้อมูลซ่อน X โดยข้อมูลทั้งสองจะรวมเรียกว่าข้อมูลสมบูรณ์ Z ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองข้อมูลของ EM-algorithm

วิธีการนี้ได้รับการตอบรับและนิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการใช้งานในเชิงสถิติ เช่น การประมาณค่าข้อมูลที่สูญหาย [33] หรือการหาค่าประมาณอัตราส่วนที่ไม่ทราบค่าในชุดข้อมูลผสม [34] ในแต่ละรอบของการวนซ้ำฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลู่เข้าสู่ Local maximum อัลกอริธึมนี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการคาดหมายหรือ E-Step (Expectation step) และขั้นตอนการหาค่าสูงสุดหรือ M-Step (Maximization step)

4.2.1 ขั้นตอนการคาดหมาย (E-Step)

ที่รอบการทำงานที่ $(k+1)$ จะทำการคำนวณหา Expected complete data log-likelihood หรือที่เรียกว่า Q-function ของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า θ ที่รอบการทำงานที่ k และข้อมูลที่ได้จากการสังเกต Y ดังสมการที่ (4.5)

$$Q(\theta | \theta^{(k)}) = E_{X|Y, \theta^{(k)}} [\log P(X, Y)] \quad (4.5)$$

จากสมการที่ (4.3) - (4.4) สามารถเขียนฟังก์ชันความหนาแน่นเงื่อนไข (Conditional density function) ของ x_i และ y_i ได้ดังนี้

$$P(y_i | x_i) = \exp\left\{-\frac{1}{2}[y_i - Cx_i]^2 R^{-1}\right\} (2\pi)^{-p/2} |R|^{-1/2} \quad (4.6)$$

$$P(x_i | x_{i-1}) = \exp\left\{-\frac{1}{2}[x_i - Ax_{i-1}]^2 Q^{-1}\right\} (2\pi)^{-k/2} |Q|^{-1/2} \quad (4.7)$$

ดังนั้น Q-function สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.8)

$$\begin{aligned} E_{x|Y, \theta^{(k)}} [\log P(X, Y)] = & -\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} [y_i - Cx_i]^2 R^{-1} \right) - \frac{n}{2} \log |R| \\ & - \sum_{i=2}^n \left(\frac{1}{2} [x_i - Ax_{i-1}]^2 Q^{-1} \right) - \frac{n-1}{2} \log |Q| \end{aligned} \quad (4.8)$$

จากคุณสมบัติการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ของแบบจำลอง LDSR เราจะสามารถเขียนการแจกแจงแบบมีเงื่อนไข (Conditional distribution) จากทฤษฎีของ Gauss-Markov [35] ได้ดังนี้

$$p(x_i | Y, \theta^{(k)}) = N(x_i^n, P_i^n) \quad (4.9)$$

โดยค่าเฉลี่ย x_i^n และความแปรปรวน P_i^n สามารถคำนวณได้จากขั้นตอนของ Fixed-interval smoother [36] ดังสมการที่ (4.10) - (4.17)

$$x_i^{t-1} = Ax_{i-1}^{t-1} \quad (4.10)$$

$$P_i^{t-1} = A^2 P_{i-1}^{t-1} + Q \quad (4.11)$$

$$K_i = P_i^{t-1} C (C^2 P_i^{t-1} + R)^{-1} \quad (4.12)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + K_i (y_i - Cx_i^{t-1}) \quad (4.13)$$

$$P_i^t = P_i^{t-1} - K_i C P_i^{t-1} \quad (4.14)$$

เมื่อกำหนดให้ $x_0^0 = \mu$ และ $P_0^0 = \Sigma$ ในการคำนวณ x_i^n และ P_i^n โดยขั้นตอนการคำนวณแบบย้อนกลับ (Backward recursion) จะกระทำที่ $t = n, n-1, \dots, 1$

$$J_{i-1} = P_{i-1}^{t-1} A (P_i^{t-1})^{-1} \quad (4.15)$$

$$x_{i-1}^n = x_{i-1}^{t-1} + J_{i-1} (x_i^n - Ax_{i-1}^{t-1}) \quad (4.16)$$

$$P_{i-1}^n = P_{i-1}^{t-1} + J_{i-1} (P_i^n - P_i^{t-1}) J_{i-1} \quad (4.17)$$

ค่าความแปรปรวน P_{i-1}^n สามารถคำนวณได้จากกระบวนการคำนวณแบบย้อนกลับ

$$P_{i-1, i-2}^n = P_{i-1}^{t-1} + J_{i-1} (P_i^n - P_i^{t-1}) J_{i-2} \quad (4.18)$$

สำหรับ $t = n, n-1, \dots, 2$ เมื่อ

$$P_{n,n-1}^n = (1 - K_t C) A P_{n-1}^{n-1} \quad (4.19)$$

4.2.2 ขั้นตอนการหาค่าสูงสุด (M-Step)

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนในการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า θ โดยการทำอนุพันธ์ของ Q-function ในสมการที่ (4.8) เทียบกับพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่า และเทียบให้สมการดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0 สมการปรับค่า \hat{A} , \hat{R} และ \hat{Q} ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจากแบบจำลอง LDSR ที่รอบการทำงานที่ $(k+1)$ คำนวณได้ดังสมการที่ (4.20) - (4.22) ซึ่งแสดงขั้นตอนการคำนวณโดยละเอียดในภาคผนวก ก. และสมการปรับค่า μ และ Σ คำนวณได้จากสมการที่ (4.23) - (4.24)

$$\hat{R}^{(k+1)} = \frac{1}{T} [R_{yy} - 2CR_{xy} + C^2 R_{x_t x_t}] \quad (4.20)$$

$$\hat{A}^{(k+1)} = \frac{R_{x_t x_{t-1}}}{R_{x_{t-1} x_{t-1}}} \quad (4.21)$$

$$\hat{Q}^{(k+1)} = \frac{1}{T-1} [R_{x_t x_t} - 2\hat{A}^{(k+1)} R_{x_t x_{t-1}} + (\hat{A}^{(k+1)})^2 R_{x_{t-1} x_{t-1}}] \quad (4.22)$$

$$\mu^{(k+1)} = x_0^n \quad (4.23)$$

$$\Sigma^{(k+1)} = P_0^n \quad (4.24)$$

โดยที่

$$R_{yy} = \sum_t y_t^2 \quad (4.25)$$

$$R_{xy} = \sum_t (x_t^n y_t) \quad (4.26)$$

$$R_{x_t x_t} = \sum_t (x_t^n + P_t^n) \quad (4.27)$$

$$R_{x_t x_{t-1}} = \sum_t (x_t^n x_{t-1}^n + P_{t,t-1}^n) \quad (4.28)$$

จากขั้นตอนการคาดหมาย ซึ่งการทำงานของ EM algorithm จะสิ้นสุดเมื่อ Original data log likelihood ($I(Y)$) ในสมการที่ (4.29) ใกล้เคียง local maximum

$$l(Y) = -\frac{1}{2} \sum_i \log(R_{e_i}) - \frac{1}{2} \sum_i \left(\frac{e_i^2}{R_{e_i}} \right) \quad (4.29)$$

โดยที่ $e_i = y_i - Cx_i^{t-1}$ และ $R_{e_i} = C^2 P_i^{t-1} + R$

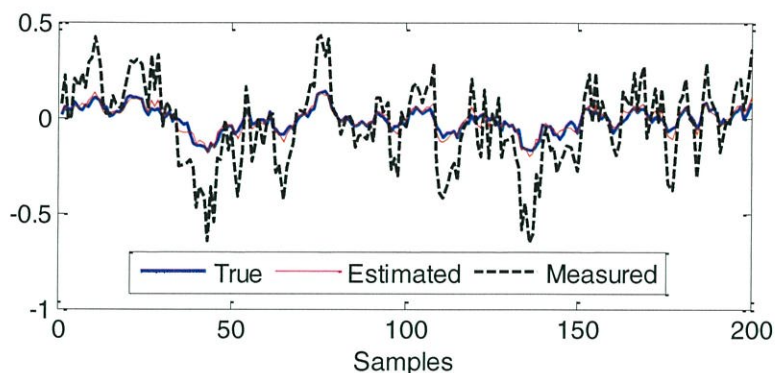
สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะอาศัย EM algorithm ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจากแบบจำลอง LDSR คือ $\theta = \{A, Q, R\}$ รวมทั้งใช้สำหรับการประมาณค่าการลดทอนสัญญาณดาวเทียม เมื่อทราบเพียงข้อมูลอัตราการตกของฝนเท่านั้น

4.2.3 ผลการจำลองการทำงานของ EM-algorithm

กำหนดให้ความยาวของข้อมูลตัวอย่างแบบสุ่มมีขนาด $n=200$, ตัวแปร x , แทนข้อมูลการลดทอนของสัญญาณแท้จริงที่ต้องการทราบค่า, ตัวแปร y , แทนข้อมูลที่บันทึกได้จากเครื่องวัด, ค่าความแปรปรวน (Q) ของสัญญาณรบกวน w , มีค่า 0.001, ค่าความแปรปรวน (R) ของสัญญาณรบกวน v , มีค่า 0.1, ปริมาณที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_t และ x_{t+1} หรือ A มีค่าเท่ากับ 0.8 และอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง x_t และ y_t หรือ C มีค่าเท่ากับ 3 ตัวอย่างผลการทำนายระดับสัญญาณและค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าตามหลักการของ EM-algorithm แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 จากรูป EM-algorithm ให้ผลการทำนายของข้อมูลตัวอย่างได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจริง โดยเส้นทึบสีน้ำเงินแสดงข้อมูลจริง, เส้นทึบสีแดงแสดงข้อมูลที่ได้จากการทำนายโดย EM-algorithm จาก Fixed-interval smoother ในขั้นตอนการคาดหมาย และเส้นประสีดำแทนข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัด รวมทั้งยังให้ผลการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการได้ใกล้เคียงกับค่าจริง และจากการทดสอบการทำงานของ EM-algorithm จำนวน 100 ครั้ง ให้ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของความผิดพลาดของการทำนายดังตารางที่ 4.1 ผลการทำงานของข้อมูลตัวอย่างที่กำหนดขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วนั้น จึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า EM-algorithm สามารถทำนายระดับสัญญาณและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการได้ใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริง

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของความผิดพลาดจากการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจาก EM-algorithm

พารามิเตอร์	MSE	
	ค่าเฉลี่ย	ความแปรปรวน
A	7.8606e-003	1.5782e-004
Q	1.5912e-006	3.4867e-011
R	1.0245e-005	2.3120e-010



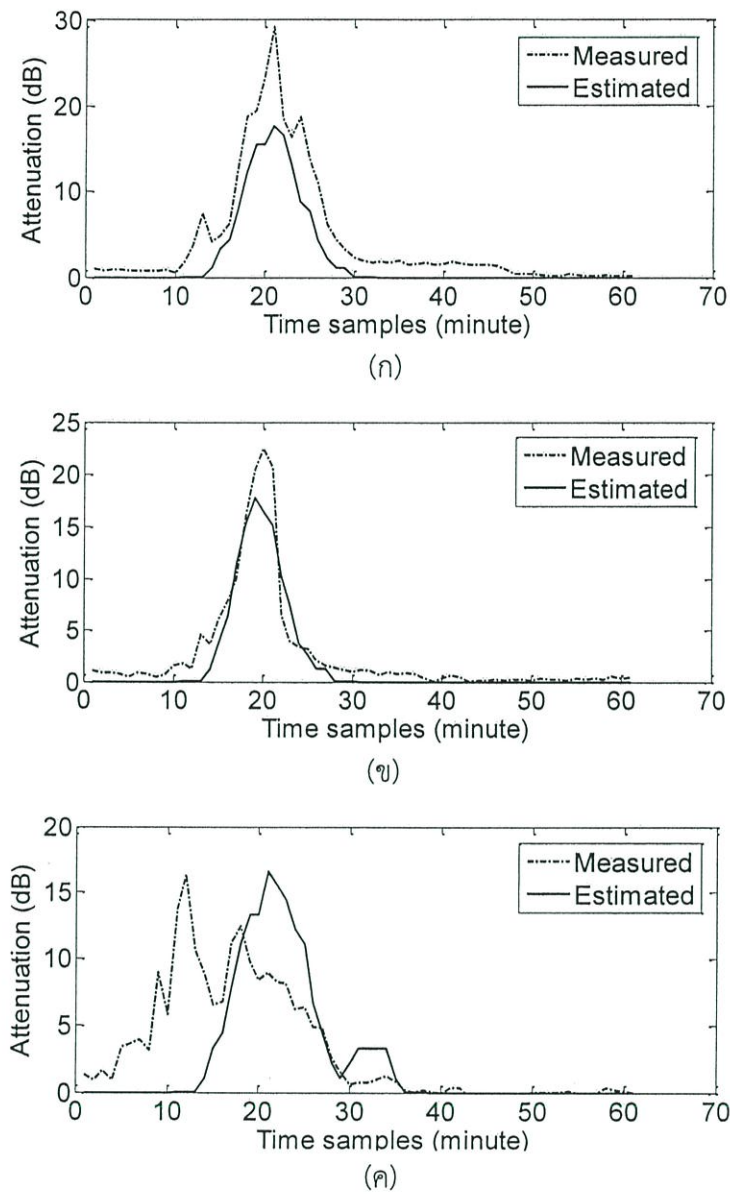
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างผลการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าตามหลักการของ EM-algorithm

4.2.4 การทำนายค่าระดับการลดทอนสัญญาณจาก EM-algorithm

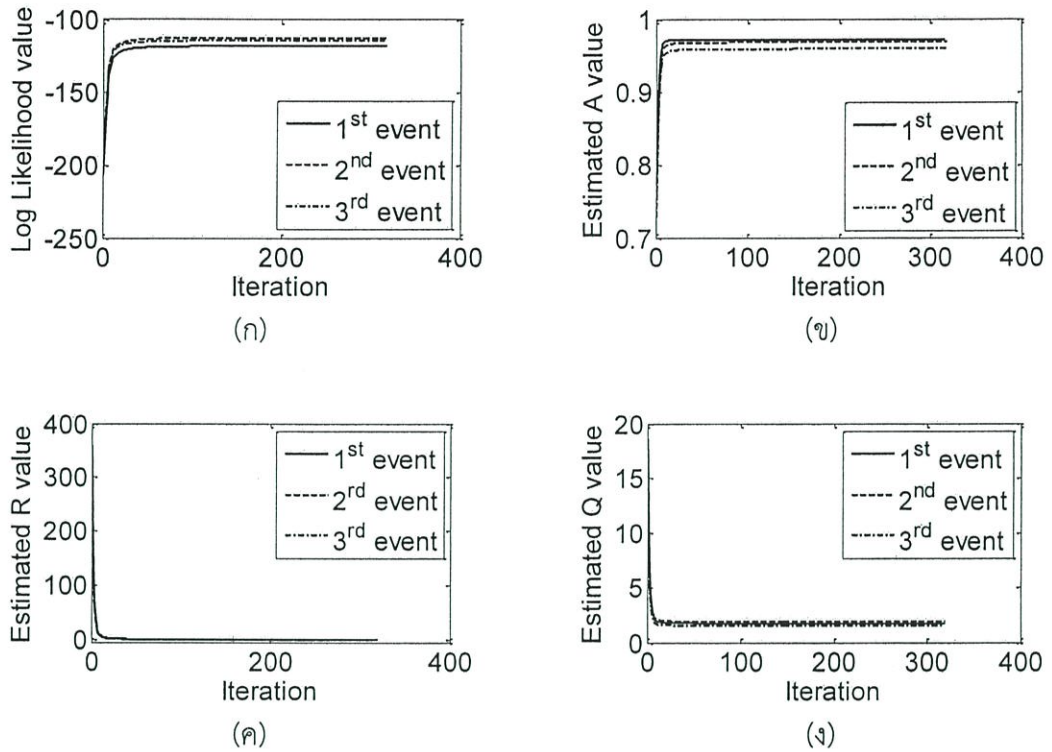
สำหรับการใช้ EM-algorithm ในการทำนายค่าระดับการลดทอนจริงนั้น จะใช้ช่วงเวลาที่เกิดการลดทอนสัญญาณที่มีค่าอัตราการตกของฝนที่ 60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไปในเหตุการณ์นั้นๆ ในที่นี้มีจำนวนเหตุการณ์ทั้งสิ้น 90 ชุดสำหรับการทำนายค่าระดับการลดทอน และข้อมูลแต่ละชุดมีระยะเวลา 60 นาที

จากขั้นตอนการหาค่าสูงสุดในสมการที่ (4.20) - (4.24) รวมทั้งการประมาณค่าการลดทอนสัญญาณดาวเทียม x_i^r พบว่าการประมาณค่าการลดทอนสัญญาณจากวิธีการที่นำเสนอ ให้การประมาณค่าที่ใกล้เคียงกับค่าการลดทอนที่วัดได้จริง ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบการลดทอนที่วัดได้จริงกับการประมาณค่าจาก EM algorithm แต่อย่างไรก็ตามการประมาณค่าการลดทอนสัญญาณยังคงมีความผิดพลาดอันเนื่องมาจากค่าหน่วยเวลาที่กำหนดให้ในแบบจำลอง ($\tau = 14$ นาที) กับค่าหน่วยเวลาที่เกิดขึ้นจริงที่ในบางเหตุการณ์ฝนมีค่าไม่เท่ากับหรือไม่ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้

EM algorithm จะหยุดกระบวนการวนซ้ำเมื่อ Original data log likelihood ($l(Y)$) ในสมการที่ (4.29) ลู่เข้าสู่ local maximum ดังรูปที่ 4.4 (ก) และทำให้สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า θ ได้จากค่าที่ลู่เข้า ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.4 (ข) - (ค) สำหรับตัวอย่างอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการทำนายค่าการลดทอนสัญญาณจากวิธีการที่นำเสนอ กับ ค่าการลดทอนจริง (ก) เหตุการณ์แรก (29 เมษายน พ.ศ. 2554) (ข) เหตุการณ์ที่สอง (11 พฤษภาคม พ.ศ. 2554) (ค) เหตุการณ์ที่สาม (5 เมษายน พ.ศ. 2554)



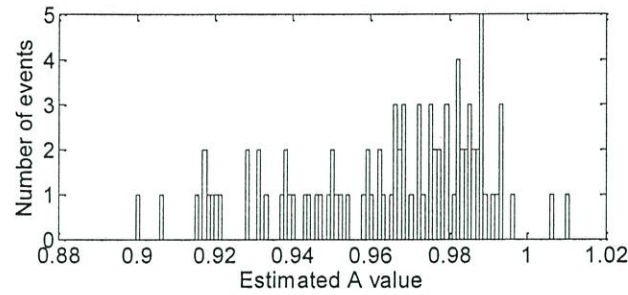
รูปที่ 4.4 ลักษณะการลู่เข้าจากการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า

(ก) ค่า Log-likelihood (ข) ค่า A (ค) ค่า R และ (ง) ค่า Q จากกระบวนการวนซ้ำของ EM

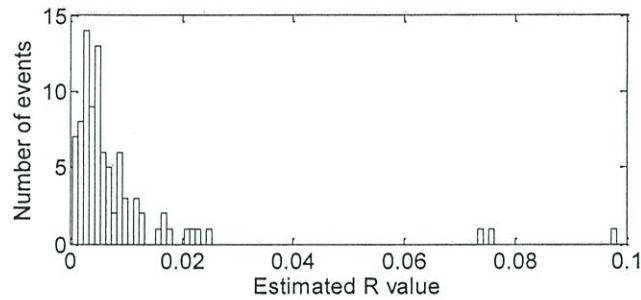
การทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า θ จากเหตุการณ์การเกิดฝนทั้ง 90 เหตุการณ์ สามารถแสดงฮิสโทแกรมของค่าที่ทำนายได้ดังรูปที่ 4.5 โดยมีค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของค่าที่ประมาณได้ดังตารางที่ 4.2 พบว่า A และ R มีผลการประมาณค่าที่มีความแปรปรวนเพียงเล็กน้อย แตกต่างจากค่า Q ที่มีความแปรปรวนที่ได้จากการประมาณค่าค่อนข้างสูง ทั้งนี้ในการใช้งานจริงเพื่อการคาดคะเนการสลับสถานะดาวเทียมภาคพื้นดิน ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า θ ควรถูกทำการปรับค่า (Update) อยู่เสมอเพื่อให้เกิดความแม่นยำของการประมาณค่าการลดทอนสัญญาณดาวเทียม

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า

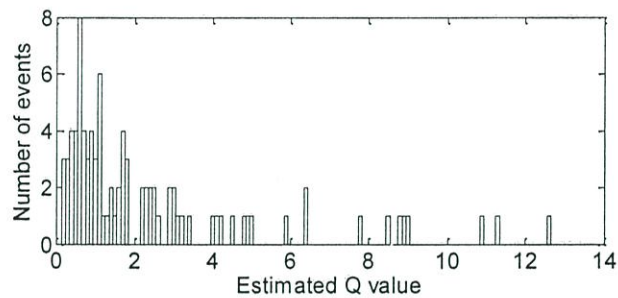
พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย	ความแปรปรวน
A	0.9642	6.1397×10^{-4}
R	0.0129	0.0017
Q	2.4568	7.4746



(ก)



(ข)

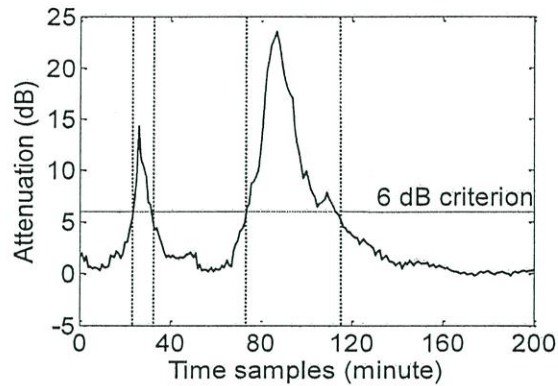


(ค)

รูปที่ 4.5 ฮิสโทแกรมของค่าที่ได้จากการทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า จากเหตุการณ์การเกิดฝนที่สนใจ (90 เหตุการณ์) (ก) A (ข) R (ค) Q

4.3 การทำนายคุณภาพสัญญาณดาวเทียม

ผลการประมาณค่าการลดทอนกำลังงานสัญญาณ $\{x_i\}$ ที่ได้จาก Fixed interval smoother จะถูกนำมาใช้ในการทำนายคุณภาพของสัญญาณดาวเทียม โดยอาศัยคุณสมบัติในการระบุคุณภาพของสัญญาณจากค่าการลดทอนกำลังงานสัญญาณ ในทางปฏิบัติของสถานีดาวเทียมไทยคม หากค่าการลดทอนกำลังงานสัญญาณมีค่าสูงกว่า 6 เดซิเบล จะถูกระบุว่าสัญญาณมีคุณภาพต่ำเกินกว่าจะยอมรับได้ในการให้บริการหรือเกิดความไม่ต่อเนื่องของการส่งสัญญาณ และจะได้รับการแก้ไขจากการใช้งานเทคนิคการแก้ไขปัญหาการลดทอนต่างๆ ที่ผู้ให้บริการเลือกใช้ เช่น การสลับสถานีภาคพื้นดิน (Site diversity), การส่งข้อมูลซ้ำ (Time diversity) หรือ การควบคุมกำลังส่ง (Adaptive power control) เป็นต้น



รูปที่ 4.6 ระดับการลดทอนสัญญาณที่ใช้กำหนดคุณภาพของสัญญาณดาวเทียม

รูปที่ 4.6 เป็นการแสดงลักษณะการระบุคุณภาพของสัญญาณ โดยในส่วนที่ถูกแรเงา คือช่วงเวลาที่เกิดการลดทอนสัญญาณสูงกว่า 6 เดซิเบล ซึ่งถูกระบุว่าเป็นช่วงเวลาที่สัญญาณมีคุณภาพต่ำกว่าระดับที่สามารถใช้งานได้ ผลการทำนายที่ถูกต้องคือสามารถระบุคุณภาพของสัญญาณที่ทำนายได้ตรงกันกับคุณภาพของสัญญาณจริง และการทำนายที่ผิดพลาดคือการระบุคุณภาพของสัญญาณในทางตรงกันข้าม

เมื่อทำการเปรียบเทียบคุณภาพของสัญญาณที่ทำนายได้และคุณภาพของสัญญาณที่วัดได้จริง แสดงผลในตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถทำนายระดับการลดทอนสัญญาณที่อยู่ในระดับปกติได้ถูกต้องถึงร้อยละ 93.89 และสามารถทำนายระดับการลดทอนที่อยู่ในระดับที่สัญญาณเกิดการด้อยคุณภาพสำหรับการให้บริการได้ถูกต้องร้อยละ 64.55 ความคลาดเคลื่อนของการทำนายในกรณีของการลดทอนที่สูงกว่าระดับที่ยอมรับได้เกิดจากในเหตุการณ์ที่เกิดฝนจริง ช่วงเหลือมเวลาที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เท่ากับหรือไม่ใกล้เคียงกับช่วงเหลือมเวลาที่กำหนดในแบบจำลอง (14 นาที) ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

ตารางที่ 4.3 ร้อยละของผลการทำนายคุณภาพสัญญาณที่ถูกต้องและคลาดเคลื่อน

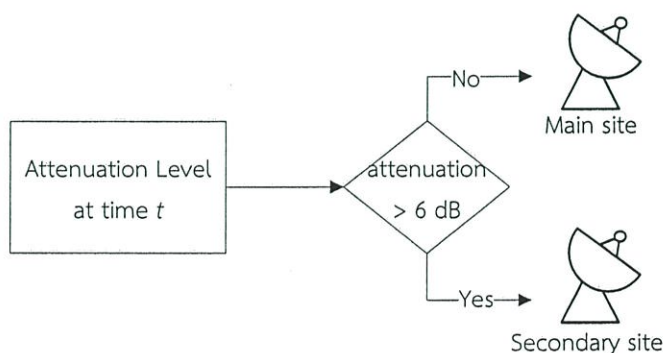
ค่าการลดทอนที่วัดได้จริง ค่าการลดทอนที่ได้ จากการประมาณค่า	ระดับปกติ	เกิดการด้อยคุณภาพ ของสัญญาณ
ระดับปกติ	93.89%	34.45%
เกิดการด้อยคุณภาพของสัญญาณ	6.11%	64.55%

บทที่ 5

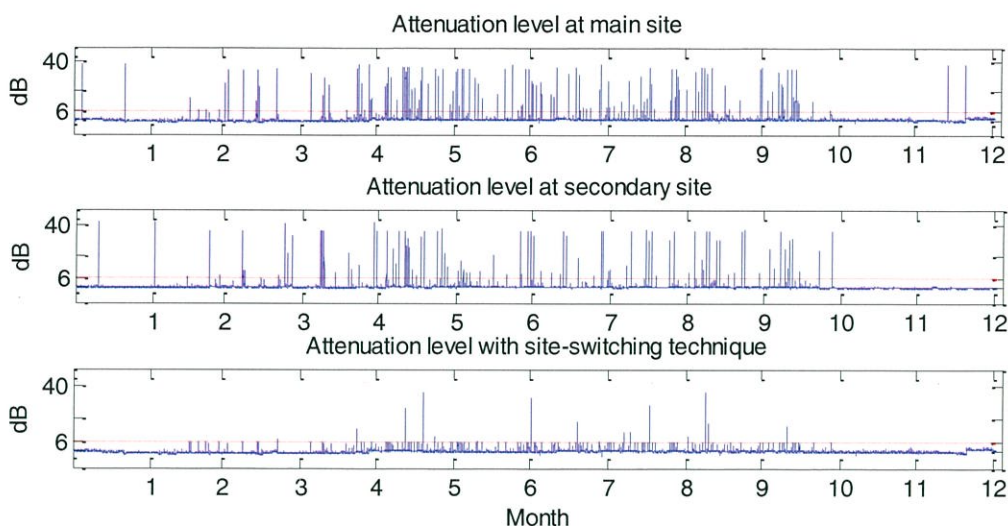
การคาดคะเนการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน

ในทางปฏิบัติ การให้บริการการสื่อสารผ่านดาวเทียมในขณะที่เกิดฝน ผู้ให้บริการจะมีเทคนิควิธีการต่างๆ ที่ใช้ในการรักษาคุณภาพของสัญญาณให้สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง รวมถึงการหลีกเลี่ยงการแพร่คลื่นในทิศทางที่จะเกิดผลกระทบอันเนื่องมาจากฝน วิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้งานคือ เทคนิคการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน (Site diversity) ที่มีหลักการทำงานดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.5 แต่การสลับสถานีที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันทำงานโดยการมอนิเตอร์สัญญาณและสลับสถานีต่อเมื่อพบว่าเกิดการลดทอนมากเกินไปที่สถานีหลัก จึงทำให้ยังมีช่วงเวลาที่ยังมีสัญญาณขาดหายไปอยู่ อันเป็นเหตุจูงใจของงานในบทนี้ หากผู้ให้บริการสามารถทำนายระดับการลดทอนสัญญาณที่เวลาล่วงหน้าได้ก่อนทำการสลับสถานีภาคพื้นดิน จะทำให้สามารถรักษาคุณภาพการให้บริการระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมได้อย่างต่อเนื่องมากขึ้น ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงการนำแบบจำลองในบทที่ 4 มาประยุกต์ใช้เพื่อการคาดคะเนการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินที่เวลาล่วงหน้า

รูปที่ 5.2 แสดงผลการจำลองการสลับสถานีภาคพื้นดินจากข้อมูลระดับการลดทอนสัญญาณในปี พ.ศ. 2554 ของดาวเทียมไทยคม 4 ตามผังการทำงานที่แสดงอยู่ในรูปที่ 5.1 การสลับสถานีภาคพื้นดินจะกระทำเมื่อสถานีหลัก (แคราย) เกิดการลดทอนสัญญาณดาวเทียมเกินกว่าระดับที่สามารถใช้งานได้ (6 เดซิเบล) โดยจะทำการสลับไปใช้งานระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่สถานีสำรอง (ลาดหลุมแก้ว) ณ เวลาที่เกิดการด้อยคุณภาพของสัญญาณนั้น



รูปที่ 5.1 ผังการทำงานของการทดลองใช้เทคนิคการสลับสถานีดาวเทียม

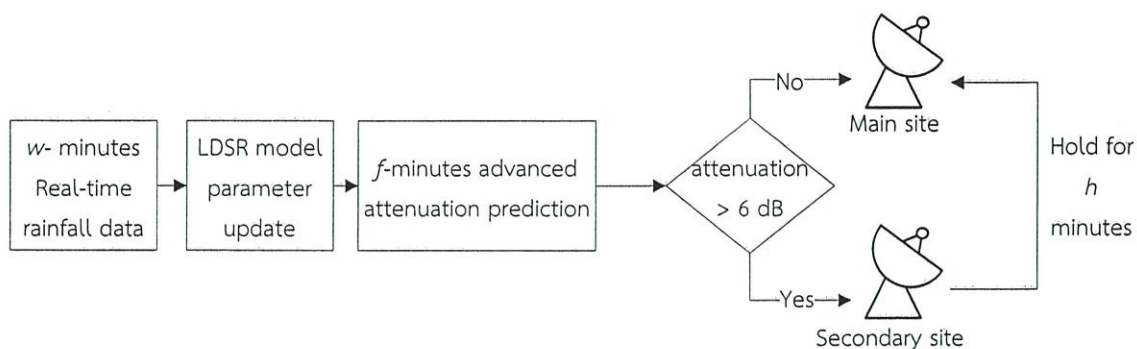


รูปที่ 5.2 คุณภาพของสัญญาณที่เพิ่มขึ้นในกรณีที่มีการสลับสถานีภาคพื้นดิน

จะสังเกตเห็นว่าจากผลการจำลองการสลับสถานีภาคพื้นดินเมื่อการลดทอนสัญญาณที่สถานีหลักสูงกว่า 6 เดซิเบล (เส้นประสีแดงในรูปที่ 5.2) ไปใช้งานที่สถานีสำรอง ทำให้มีช่วงเวลาการเกิดการลดทอนสัญญาณที่ต่ำลง จากเดิมการลดทอนที่สถานีหลักมีสูงถึง 3,091 นาทีและการลดทอนที่สถานีสำรองมีสูงถึง 2,391 นาที แต่หลังจากการใช้เทคนิคการสลับสถานีภาคพื้นดินตามผังการทำงานในรูปที่ 5.1 การลดทอนสัญญาณที่เกิดขึ้นมีเพียง 149 นาที ซึ่งเป็นผลที่ชี้ให้เห็นชัดเจนว่าเทคนิคการสลับสถานีภาคพื้นดินสามารถช่วยลดผลกระทบของการด้อยคุณภาพของสัญญาณได้ แต่ทั้งนี้ผลที่ได้นี้เป็นเพียงการสลับสถานีเมื่อทราบระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียมที่เกิดขึ้นแล้วเท่านั้น

5.1 เทคนิคการคาดคะเนการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินที่เวลาล่วงหน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการคาดคะเนการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินที่เวลาล่วงหน้า โดยมีแผนภาพการทำงานแสดงได้ในรูปที่ 5.3 เทคนิคการทำนายค่าการลดทอนกำลังงานสัญญาณที่นำเสนอจะใช้เพียงข้อมูลอัตราการตกของฝนจากเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนที่ทำการติดตั้ง ณ สถานีภาคพื้นดินหลัก (แคราย) เพียงเท่านั้น



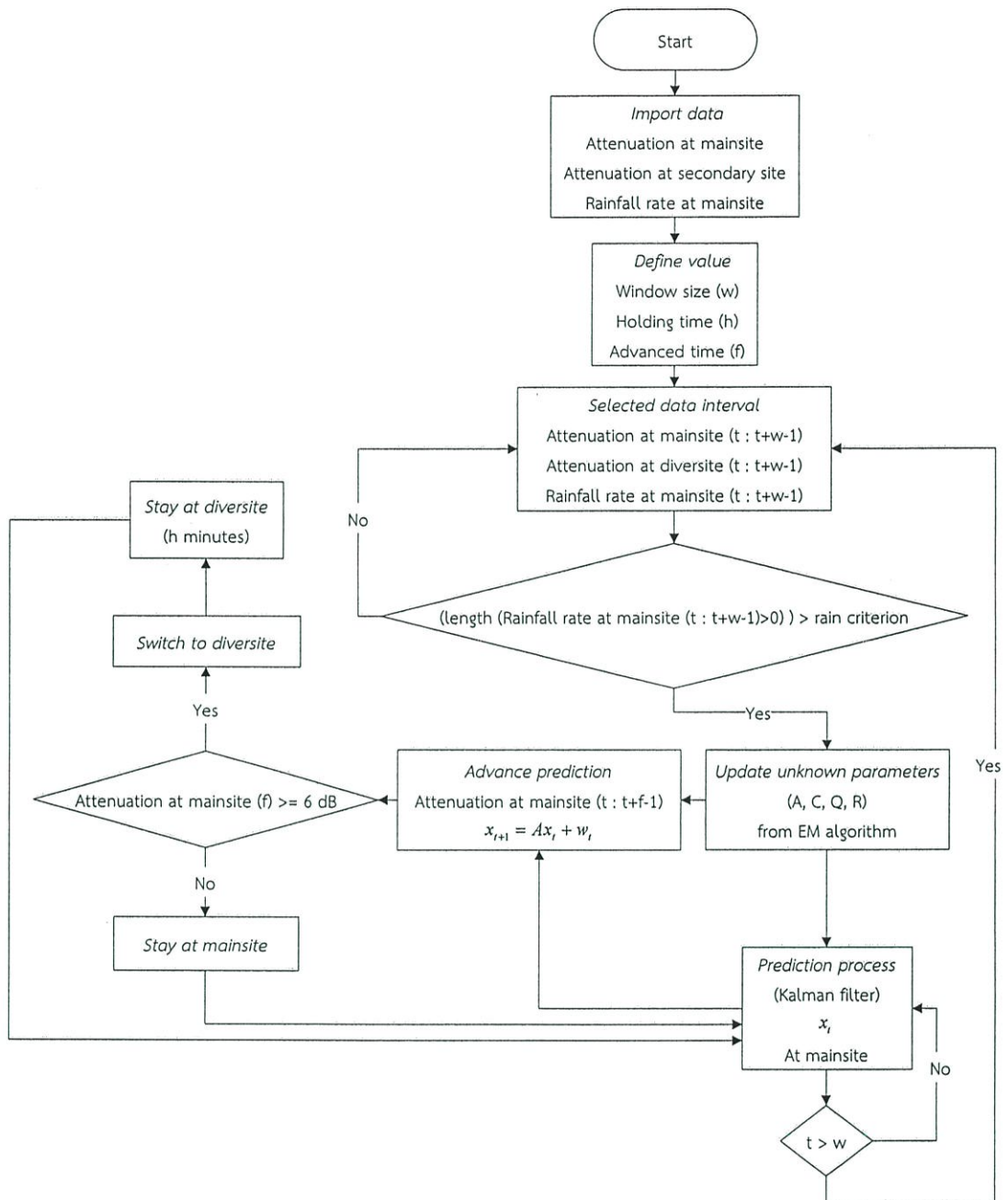
รูปที่ 5.3 แผนภาพการทำงานของการทำนายการสลับสถานีภาคพื้นดินที่นำเสนอ

ผังงานของเทคนิคที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 โดยขั้นตอนการทำงานของระบบจะเริ่มต้นจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ช่วงเวลาการรับข้อมูลใหม่เพื่อใช้สำหรับการปรับแก้ (Update) ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าขนาด w นาที, การทำนายระดับการลดทอนสัญญาณที่เวลาล่วงหน้า f นาที และช่วงเวลาการใช้งานสถานีสำรองเป็นเวลา h นาที ในกรณีที่สถานีหลักมีระดับการลดทอนสัญญาณสูงกว่า 6 เดซิเบล

ในช่วงเวลา w นาที หากมีข้อมูลอัตราการตกของฝนมากกว่าร้อยละ 50 ของช่วงเวลานั้น จะมีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจากแบบจำลอง LDSR โดยใช้ EM-algorithm และเข้าสู่ขั้นตอนการทำนายระดับการลดทอนสัญญาณที่เวลาล่วงหน้า f นาที จากสมการ

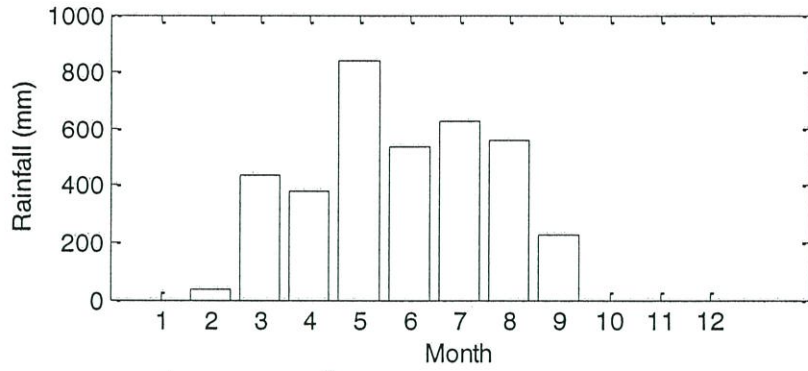
$$x_{r+1} = Ax_r + w, \quad (5.1)$$

โดยใช้ค่า A และความแปรปรวน Q ที่ได้จากขั้นตอนการปรับแก้ที่ได้กระทำในขั้นตอนก่อนหน้า หากระดับการลดทอนที่ทำนายได้ที่เวลาล่วงหน้ามีระดับสูงกว่า 6 เดซิเบล ระบบจะทำการสลับไปใช้งานการรับ-ส่งสัญญาณที่สถานีสำรอง (ลาดหลุมแก้ว) เป็นระยะเวลา h นาที ก่อนสลับกลับมาใช้งานที่สถานีหลัก (แคราย) ตามเดิม



รูปที่ 5.4 ผังงานการทำนายการสลับสถานีภาคพื้นดินที่นำเสนอ

การทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอจะใช้ข้อมูลในเดือนพฤษภาคม - สิงหาคม ใน การทดสอบ ซึ่งเป็นช่วงหน้าฝนของประเทศไทย เป็น 4 เดือนที่มีปริมาณน้ำฝนสะสมสูงสุดในปี พ.ศ. 2554 ดังกราฟปริมาณน้ำฝนสะสมในแต่ละเดือนในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ปริมาณน้ำฝนสะสมในแต่ละเดือนในปี พ.ศ.2554

5.2 การเลือกค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริธึม

การทำนายการสลับสถานะดาวเทียมภาคพื้นดินจากระดับการลดทอนสัญญาณที่นำเสนอ นั้นจะต้องกำหนดช่วงเวลาต่างๆ ดังผังงานในรูปที่ 5.4 คือ ช่วงเวลาการรับข้อมูลใหม่เพื่อที่ใช้สำหรับการปรับแก้ (Update) ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ในที่นี้จะเรียกว่า Window size (w), ช่วงเวลาใช้งานสถานีสำรอง ในกรณีที่สถานีหลักเกิดการลดทอนอันเนื่องมาจากฝนและมีการสลับการใช้งานไปยังสถานีสำรอง ในที่นี้เรียกว่า Holding time (h) และระยะเวลาการทำนายค่าการลดทอนกำลังงานสัญญาณล่วงหน้า เพื่อแจ้งเตือนการขาดหายของสัญญาณ ในที่นี้ เรียกว่า Advanced time (f) โดยค่าที่เลือกมาใช้งานจะพิจารณาจากค่าที่เหมาะสมที่สุด กล่าวคือ เป็นค่าเวลาที่ทำให้การสลับสถานีมีระดับสัญญาณปกติมากที่สุด สมการที่ใช้สำหรับหาค่าร้อยละของคุณภาพสัญญาณที่ดีขึ้นคำนวณได้จากสมการที่ (5.2)

$$\text{Improvement in signal quality (\%)} = \frac{\left(\sum_j A_j t_j \right)_{OLD} - \left(\sum_j A_j t_j \right)_{NEW}}{\left(\sum_j A_j t_j \right)_{OLD}} \times 100 \quad (5.2)$$

โดยที่ A_j คือระดับการลดทอนสัญญาณและ t_j คือช่วงเวลาที่เกิดการลดทอนสัญญาณที่ระดับนั้นๆ

5.2.1 การหาค่า Window size ที่เหมาะสม

ตารางที่ 5.1 เป็นการหาค่า Window size ที่เหมาะสม โดยการปรับค่าดังกล่าวในช่วง 10-40 นาที พบว่าขนาดของ Window size ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่ามีเวลาเท่ากับ 30 นาที

ตารางที่ 5.1 ช่วงเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า

ช่วงเวลา (นาที)	คุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิม (%)			
	พ.ศ.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
10	42.23	53.27	57.32	N/A
20	26.21	57.79	53.17	21.43
30	50.43	63.38	73.78	10.86
40	25.46	61.50	65.05	11.35

5.2.2 การหาค่า Holding time ที่เหมาะสม

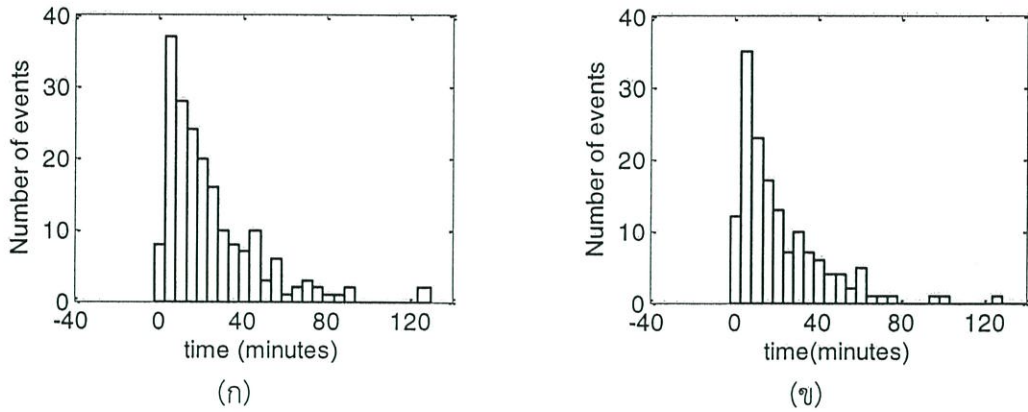
หากผลการทำนายการลดทอนอันเนื่องมาจากฝนพบว่าที่สถานีภาคพื้นดินหลักจะเกิดการลดทอนสัญญาณสูง ทำให้ผู้ให้บริการตัดสินใจสลับการใช้งานสถานีภาคพื้นดินไปใช้งานที่สถานีสำรองในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จากการทดลองปรับเวลาการใช้งานสถานีสำรองตั้งแต่ 5-30 นาที ดังตารางที่ 5.2 พบว่าการปรับช่วงเวลาการใช้งานที่สถานีสำรองนั้นไม่มีช่วงเวลาที่เหมาะสมชัดเจนสำหรับการเลือกใช้งาน ในการใช้งานจริงช่วงเวลาดังกล่าวจะต้องอาศัยหลากหลายปัจจัยในการตัดสินใจสลับกลับมาใช้งานที่สถานีหลัก เช่น ขนาดของกลุ่มฝนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในเขตสภาพภูมิอากาศนั้นๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเกิดการลดทอน ณ สถานีภาคพื้นดิน, ช่วงเวลาที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้น้อยที่สุด หากต้องทำการสลับสถานีการใช้งาน ฯลฯ

ตารางที่ 5.2 ช่วงเวลาการใช้งานการติดต่อสื่อสารที่สถานีสำรองที่เหมาะสม

ช่วงเวลา (นาที)	คุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิม (%)			
	พ.ศ.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
5	50.90	66.77	74.91	15.09
10	51.97	63.01	74.75	11.64
15	59.37	57.53	80.47	6.41
20	40.23	62.81	75.98	12.10
25	48.38	61.13	87.38	12.35
30	42.97	62.41	86.84	11.97

ทั้งนี้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้ช่วงเวลาสำหรับการใช้งานสถานีสำรองที่ 24 นาที โดยพิจารณาจากระยะเวลาเฉลี่ยของการเกิดการลดทอนกำลังงานสัญญาณในแต่ละเหตุการณ์ในปี พ.ศ.

2554 โดยที่สถานี - แครายและลาดหลุมแก้ว มีช่วงเวลาการเกิดการลดทอนกำลังงานสัญญาณเฉลี่ยต่อ 1 เหตุการณ์เท่ากับ 24.83 และ 24.63 นาที ตามลำดับ ดังแสดงฮิสโทแกรมในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ช่วงเวลาการเกิดการลดทอนกำลังงานสัญญาณ

(ก) สถานีดาวเทียมภาคพื้นดินแคราย (ข) สถานีดาวเทียมภาคพื้นดินลาดหลุมแก้ว

5.2.3 การหาค่า Advanced time ที่เหมาะสม

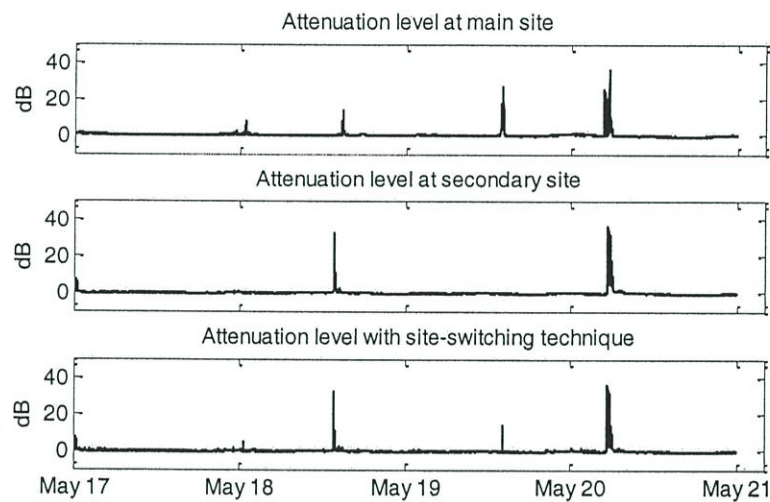
เนื่องจากวัตถุประสงค์ของอัลกอริธึมนี้ คือ การทำนายค่าการลดทอนกำลังงานสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนที่เวลาล่วงหน้า ดังนั้นระยะเวลาของการทำนายล่วงหน้าที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ จากผลการทดสอบปรับเปลี่ยนค่าเวลาล่วงหน้าดังตารางที่ 5.3 พบว่า ค่าเวลาล่วงหน้าที่ทำให้การสลับสถานีเกิดการลดทอนกำลังงานสัญญาณน้อยที่สุด คือการทำนายล่วงหน้าที่เวลา 5 นาที จากผลการทดสอบในเดือน พฤษภาคม, มิถุนายน และสิงหาคม

ตารางที่ 5.3 ช่วงเวลาการทำนายล่วงหน้าที่เหมาะสม

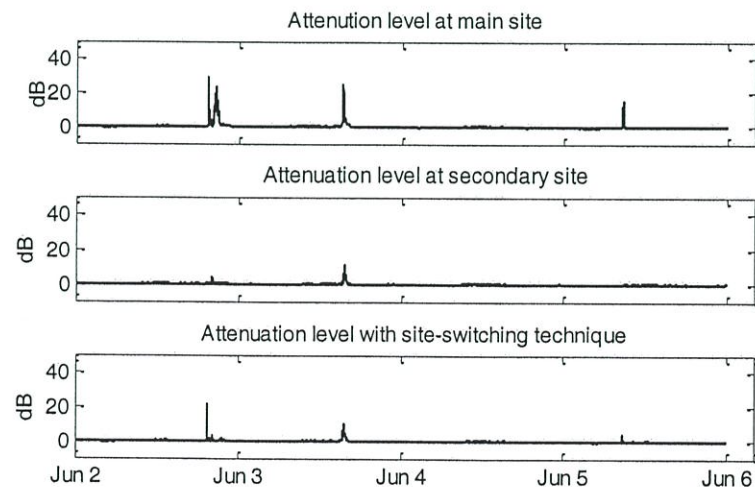
ช่วงเวลาการทำนายล่วงหน้า (นาที)	คุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิม (%)			
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
5	44.57	61.02	83.51	14.28
10	34.54	62.61	77.47	10.85
15	34.31	62.97	78.13	7.07
20	28.77	63.53	70.95	11.07
25	29.60	59.54	73.36	6.70
30	26.77	61.34	70.69	9.10

5.3 การทดสอบการทำงานของเทคนิคที่นำเสนอ

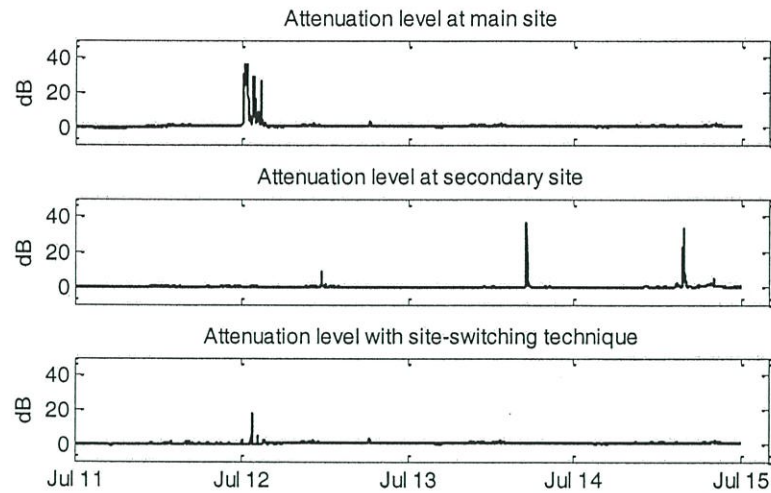
จากผลลัพธ์ในหัวข้อที่ 5.2 เราจึงเลือกใช้ Window size = 30 นาที, Holding time = 24 นาที และ Advanced time = 5 นาที ในการทดสอบการทำงาน โดยตัวอย่างการสลับสถานีภาคพื้นดินในเดือนทั้ง 4 คือ วันที่ 17-20 พฤษภาคม, วันที่ 2-5 มิถุนายน, วันที่ 11-14 กรกฎาคม และวันที่ 26-29 สิงหาคม แสดงได้ดังรูปที่ 5.7-5.10 ตามลำดับ และสามารถสรุปคุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิมในแต่ละเดือนจากข้อมูลทั้งหมด 44,320 นาทีสำหรับเดือนมิถุนายนและ 44,640 นาทีสำหรับเดือนพฤษภาคม, กรกฎาคม และสิงหาคม ได้ดังตารางที่ 5.4



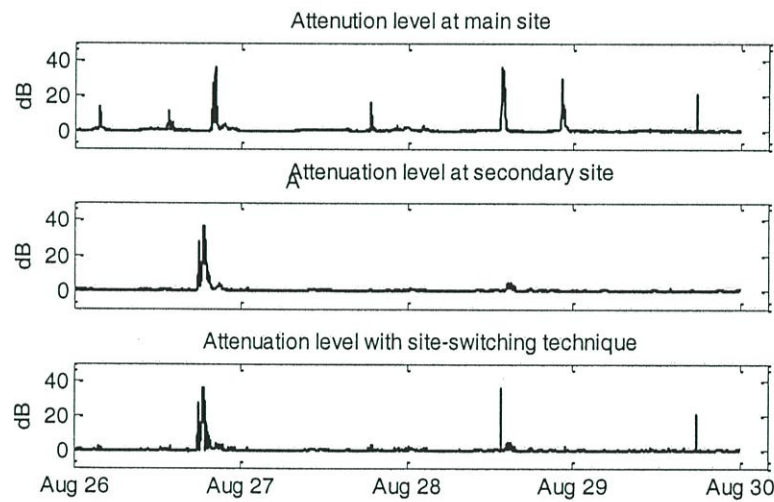
รูปที่ 5.7 คุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิมหลังการสลับสถานีภาคพื้นดิน วันที่ 17-20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554



รูปที่ 5.8 คุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิมหลังการสลับสถานีภาคพื้นดิน วันที่ 2-5 มิถุนายน พ.ศ. 2554



รูปที่ 5.9 คุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิมหลังการสลับสถานีภาคพื้นดิน
วันที่ 11-14 กรกฎาคม พ.ศ. 2554



รูปที่ 5.10 คุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิมหลังการสลับสถานีภาคพื้นดิน
วันที่ 26-29 สิงหาคม พ.ศ. 2554

ผลการทำงานของวิธีการที่นำเสนอในแต่ละเดือน แสดงดังตารางที่ 5.4 ในเดือนพฤษภาคม, มิถุนายน, กรกฎาคม และสิงหาคม วิธีการที่นำเสนอสามารถเพิ่มคุณภาพของการติดต่อสื่อสารได้ร้อยละ 44.57, ร้อยละ 61.02, ร้อยละ 83.51 และร้อยละ 14.28 ตามลำดับ จะเห็นว่าการลดทอนสัญญาณเกิดขึ้นน้อยลงหลังจากการสลับสถานีภาคพื้นดินด้วยวิธีที่นำเสนอ อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่พบ เช่นในรูปที่ 5.10 ผลการสลับสถานีภาคพื้นดินในเดือนสิงหาคมแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของวิธีการที่นำเสนอ นั่นคือ ในกรณีที่สถานีภาคพื้นดินทั้งสองเกิดฝนในเวลาเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน การสลับสถานีจะไม่ช่วยให้คุณภาพสัญญาณดีขึ้นมากนัก อย่างไรก็ตามคุณภาพของสัญญาณจะดีขึ้น

หากทั้งสองสถานีเกิดการลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนในเวลาที่ไม่ตรงกัน ดังเช่นในเดือนกรกฎาคม (รูปที่ 5.9) เป็นต้น

ตารางที่ 5.4 คุณภาพสัญญาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิมหลังการสลับสถานีภาคพื้นดิน

เดือน	ความยาวของข้อมูลที่พิจารณา (นาทีก)	ร้อยละของคุณภาพสัญญาณ ที่เพิ่มขึ้นจากเดิม
พฤษภาคม	44,640	44.57
มิถุนายน	43,200	61.02
กรกฎาคม	44,640	83.51
สิงหาคม	44,640	14.28

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาลักษณะความสัมพันธ์เชิงเวลาระหว่างการลดทอนสัญญาณดาวเทียมและอัตราการตกของฝน รวมทั้งความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน และพัฒนาเทคนิคการทำนายระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียมจากข้อมูลอัตราการตกของฝนและการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินที่เวลาล่วงหน้าเพื่อรักษาคุณภาพของการให้บริการผ่านดาวเทียม

จากการศึกษาความสัมพันธ์ทางสถิติของอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณดาวเทียมในเชิงเวลา พบว่าค่าสหสัมพันธ์ข้ามมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิดและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้ยังได้ทดสอบหาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝน เพื่อประโยชน์ต่อการออกแบบการวางตำแหน่งสถานีภาคพื้นดิน โดยพิจารณาทิศทางที่ค่าสหสัมพันธ์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเทียบกับระยะทาง สำหรับระยะห่างระหว่างสถานีที่เหมาะสม จะต้องพิจารณาระยะทางที่ได้รับผลกระทบจากฝนค่อนข้างต่ำและมีพื้นที่เพียงพอต่อการตั้งสถานีภาคพื้นดิน รวมทั้งทิศทางของความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนจากบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงด้วย

จากลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้นทางสถิติ รวมทั้งข้อสังเกตที่ว่า การเปลี่ยนแปลงในเชิงเวลาของอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณดาวเทียมเป็นไปอย่างช้าๆ จึงเลือกอธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณทั้งสองด้วยแบบจำลอง LDSR และทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าในแบบจำลองดังกล่าวด้วย EM-algorithm รวมทั้งสามารถประมาณระดับการลดทอนสัญญาณดาวเทียม พบว่าสามารถให้การประมาณค่าที่ใกล้เคียงกับค่าการลดทอนที่วัดได้จริง ในกรณีที่ระดับการลดทอนอยู่ในระดับปกติ ความผิดพลาดของการประมาณค่าการลดทอนสัญญาณเกิดจากในกรณีที่ค่าหน่วงเวลาที่เกิดขึ้นจริงไม่เท่ากับหรือไม่ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ในแบบจำลอง

นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาเทคนิคการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน เมื่อระดับการลดทอนสัญญาณที่ทำนายได้ล่วงหน้ามีระดับสูงกว่าระดับการลดทอนที่ส่งผลให้เกิดการด้อยคุณภาพของสัญญาณ จะทำการสลับการรับ-ส่งสัญญาณไปยังสถานีสำรอง ก่อนจะสลับกลับมาใช้งานที่สถานีหลักตามเดิม หากที่สถานีหลักมีระดับการลดทอนอยู่ในระดับปกติแล้ว การคาดคะเนการสลับสถานีภาคพื้นดินในเดือนพฤษภาคม - สิงหาคม พ.ศ. 2554 พบว่าหลังจากการใช้เทคนิคที่นำเสนอคุณภาพของสัญญาณเพิ่มขึ้นจากระดับปกติที่ไม่ได้มีการสลับสถานี โดยเทคนิคที่นำเสนอจะให้ผลการทำงานที่ดีหากที่สถานีภาคพื้นดินทั้งสองแห่งไม่เกิดการลดทอนสัญญาณในช่วงเวลาเดียวกัน

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยพบว่ายังมีความผิดพลาดในการประมาณค่าระดับการลดทอนสัญญาณโดยอาศัยเพียงข้อมูลอัตราการตกของฝน เนื่องมาจากค่าหน่วยเวลาที่เกิดขึ้นในเหตุการณ์จริงมีค่าไม่เท่ากับหรือไม่ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ในแบบจำลอง ดังนั้นหากมีการพัฒนาเทคนิคการประมาณค่าให้สามารถปรับค่าหน่วยเวลาให้ใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริงได้มากที่สุด และอาจใช้พารามิเตอร์อื่นๆ ที่สัมพันธ์กับการจางหายของสัญญาณมาร่วมพิจารณาด้วย เช่น ความชื้นในอากาศ, ความเร็วลม หรือ ไอน้ำในรูปแบบของเมฆ เป็นต้น เพื่อให้การประมาณค่าระดับการลดทอนมีความแม่นยำมากขึ้น

สำหรับค่าศึกษาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนในประเทศไทย จำเป็นต้องมีข้อมูลอัตราการตกของฝนที่ครอบคลุมในพื้นที่ที่ต้องการวิเคราะห์และมีการเก็บบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากข้อมูลในเชิงสถิติเหล่านี้ หากยังมีปริมาณมาก ก็จะสามารถวิเคราะห์ผลได้อย่างละเอียดและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ในส่วนของการคาดคะเนการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินที่นำเสนอ มีการทำนายค่าการลดทอนที่สถานีภาคพื้นดินเพียง 1 สถานี เนื่องจากข้อมูลอัตราการตกของฝนที่สามารถทำการบันทึกได้มีเพียงที่สถานีภาคพื้นดินแคระย หากมีข้อมูลอัตราการตกของฝนจากทั้ง 2 สถานีจะทำให้ระบบการคาดคะเนการสลับสถานีมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

6.3 ทิศทางการวิจัยในอนาคต

ข้อเสนอแนะที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.2 เป็นแนวทางของงานวิจัยในอนาคต เพื่อสามารถพัฒนาเทคนิคการคาดคะเนการสลับสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินเพื่อแก้ปัญหาการลดทอนสัญญาณอันเนื่องมาจากฝน ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น สิ่งแรกคือการหาสาเหตุที่ทำให้เกิดการเหลื่อมทางเวลาของการเกิดฝนและการลดทอนสัญญาณดาวเทียม โดยอาจเพิ่มจำนวนจุดติดตั้งเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนในแนวการแพร่คลื่นของสัญญาณดาวเทียม เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบช่วงเวลากการเกิดฝนในแต่ละจุดกับการลดทอนสัญญาณดาวเทียมที่มีเครื่องรับอยู่ที่สถานีภาคพื้นดิน ทิศทางที่เป็นไปได้อีกทางหนึ่งคือ นอกจากฝนแล้วจะต้องมีการศึกษาปัจจัยทางสภาพภูมิอากาศอื่นๆ ที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการคาดคะเนระดับการลดทอนสัญญาณ รวมทั้งการเก็บบันทึกข้อมูลทั้งอัตราการตกของฝนและการลดทอนสัญญาณที่สถานีภาคพื้นดินทั้งสองแห่ง เพื่อพัฒนาแบบจำลองเพิ่มเติมให้มีความสมบูรณ์ของการวิเคราะห์มากยิ่งขึ้น และสำหรับการศึกษาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของอัตราการตกของฝนนั้น อาจต้องได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลอัตราการตกของฝนจากกรมอุตุนิยมวิทยาหรือหน่วยงานอื่นๆ ที่ได้มีการบันทึกข้อมูลอัตราการตกของฝน ไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบของข้อมูลเรดาร์หรือรูปแบบอื่นๆ ที่

สามารถครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างได้ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทิศทางและความหนาแน่น
ของฝนในพื้นที่ที่ต้องการศึกษาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] R.K. Crane. Electromagnetic wave propagation through rain. New York : Wiley, 1996.
- [2] A.D. Panagopoulos, P.M. Arapoglou and P.G. Cottis. "Satellite communications at Ku, Ka, and V bands: Mitigation impairment and mitigation techniques" IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2004. pp.2-14.
- [3] T. Konefal, C. Spillard, and D. Grace. "Site diversity for high-altitude platforms: a method for the prediction of joint site attenuation statistics" IEEE Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation. Vol. 149. No. 2. IET, 2002. pp.124-128.
- [4] A.D. Panagopoulos, P.M. Arapoglou and P.G. Cottis. "Long-term Rain Attenuation Probability and Site Diversity Gain Prediction Formulas" IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 53(7), 2005. pp.2307-2313.
- [5] Matricciani, Emilio. "Orbital diversity in resource-shared satellite communication systems above 10 GHz" IEEE Journal in Selected Areas in Communications. 5.4, 1987. pp.714-723.
- [6] Capsoni, C. A. R. L. O., and E. Matricciani. "Orbital and site diversity systems in rain environment: Radar-derived results" IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 33.5, 1985. pp.517-522.
- [7] L. Dossy, G. Tartara, and E. Matricciani. "Frequency Diversity in Millimeter Wave Satellite Communications" IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 28.2, 1992. pp.567-573.
- [8] T. Teramoto, S. Chihara, W. Chuo, T. Manabe, S. Yamamoto and A. Tsuzuku. "Ka- and ku-band satellite availability and frequency diversity characteristics during rain using state transition matrix" IEEE Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC) 2010,. 2010. pp.2107-2110.
- [9] H. Fukuchi and T. Nakayama. "Quantitative Evaluation of Time Diversity as a Novel Attenuation Mitigation Technology for Future High Speed Satellite Communication" IEICE transactions on communications. 87(8), 2004. pp.2119- 2123.

- [10] E. Matricciani. "Time diversity as a rain attenuation countermeasure in satellite links in the 10-100 GHz frequency bands" *IEEE First European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006)*. 2006. pp.1-6.
- [11] R.K. Crane. "Prediction of attenuation by rain" *IEEE Transactions on Communications*. vol. COM-28, no. 9. 1980. pp. 1717–1733.
- [12] "Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunications system". Recommendation ITU-R P.618-11, 2013.
- [13] A. Dissanayake, J. Allnutt, and F. Haidara. "A prediction model that combines rain attenuation and other propagation impairments along earth-satellite paths" *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 45.10, 1997. pp.1546- 1558.
- [14] S. Lin. "Empirical rain attenuation model for earth-satellite paths" *IEEE Transactions on Communications*. 27.5, 1979. pp.812-817.
- [15] D. Lakanchanh, N. Leelaruji, N. Hemmakorn and Y. Moriya. "Study on ka band propagation effect by rain" *Proceedings of the 11th International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2006)*. Nov 2006. pp. 1–4.
- [16] M.N.H. Nordin, L.C. Yih, A. Mahmoudbeik and J.S. Mandeep. "Analysis of rain attenuation model for ku band in cameron highland, malaysia" *Recent Advances in Automatic Control, Information, and Communications: Proceedings of the 13th International Conference on Applied Informatics and Communications (AIC '13)*. Aug 2013. pp. 287–290.
- [17] J. H. Lee, Y. S. Choi, H. S. Lee, and J. K. Pack, "Real-time estimation of rain attenuation on the satellite link," in *Proceedings of the 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC2003-Spring)*, Apr 2003, vol. 4, pp. 2291–2294.
- [18] A.K. Lwas, M.R. Islam, J. Chebil, M.H. Habaebi, A.F. Ismail, A. Zyoud and H. Dao. "Rain Attenuation Analysis using Synthetic Storm Technique in Malaysia" *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 53. No. 1. 2013. pp. 012045.

- [19] D. Dalia and A. Maitra. "Time series prediction of rain attenuation from rain rate measurement using synthetic storm technique for a tropical location" *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 68.1. 2014. pp.33-36.
- [20] โครงการการเรียนรู้ในเรื่อง วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์. "ตำแหน่งของดาวเทียมแบบ โคจรอยู่กับที่" [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.vcharkarn.com/userfiles/74451/GEO_Stationary_Orbit.jpg. 2014.
- [21] B.Z. Kobb. *Spectrum Guide: Radio Frequency Allocations in the United States, 30 Mhz-300 Ghz*. 2nd edition. 1994.
- [22] L.J. Ippolito. *Satellite communications systems engineering: atmospheric effects, satellite link design and system performance*. Vol. 6. John Wiley & Sons, 2008.
- [23] Thaicom Public Company Limited. "ดาวเทียมไทยคม 4 (ไอพีสตาร์)." [Online]. Available : <http://thaicom.net/satellites/existing/thaicom4.aspx>. 2014.
- [24] WeatherShack. "Tipping Bucket Rain Gauge." [Online]. Available : <http://www.weathershack.com/education/tipping-bucket-rain-gauge.html>. 2014.
- [25] "Topography for Earth-to-space propagation modeling". Recommendation ITU -R P.1511, 2002.
- [26] "Rain height model for prediction methods". Recommendation ITU-R P.839-4, 2013.
- [27] "Characteristics of precipitation for propagation modeling". Recommendation ITU-R P.837-6, 2012.
- [28] "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods". Recommendation ITU-R P.838-3, 2005.
- [29] S. Maeda and H. Fukuchi. "Quantitative assessment of site diversity from rainfall spatial correlation characteristic" *Proceedings of 17th International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2012)*. 2012. pp.1449-1452.
- [30] H. Fukuchi. "Correlation properties of rainfall rates in the United Kingdom" *IEE Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation*. Vol. 135. No. 2. 1988. pp.83-88.

- [31] P. Chodkaveekityada and H. Fukuchi. "On-board Adaptive Attenuation Compensation Technique for Future Satellite Communication" *Proceedings of 19th International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2014)*, Kaosiung, Taiwan. 2-5 December 2014. pp. 111-112.
- [32] X. L. Meng and D. B. Rubin "Maximum likelihood estimation via the ECM algorithm: A general framework" *Biometrika*. vol. 80, no. 2, 1993. pp.267-278.
- [33] P.J. Brockwell and R.A Davis. *Introduction to time series and forecasting*. 2nd Ed. New York : Springer, 2001. pp.290-291.
- [34] N. Vlassis, A. Likas. "A greedy EM algorithm for Gaussian mixture learning" *Neural processing letters*. vol. 15, no.1, 2002. pp.77-87.
- [35] L. Scharf. *Statistical Signal Processing: Detection, Estimation, and Time Series Analysis*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1990.
- [36] R. H. Shumway and D. S. Stoffer. "An approach to time series smoothing and forecasting using the EM algorithm" *Journal of time series analysis*. vol.3, no.4, 1982. pp. 253-264.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

สมการการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า
ในขั้นตอนการหาค่าสูงสุดจาก EM-algorithm

สมการการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ในขั้นตอนการหาค่าสูงสุดจาก EM-algorithm

จากสมการ Q-function ของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า θ ที่รอบการทำงานที่ k และข้อมูลที่
ได้จากการสังเกต Y ในบทที่ 4 สมการที่ (4.5)

$$Q(\theta | \theta^{(k)}) = E_{X|Y, \theta^{(k)}} [\log P(X, Y)] \quad (4.5)$$

จากสมการที่ (4.3) - (4.4) สามารถเขียนฟังก์ชันความหนาแน่นเงื่อนไข (Conditional density function) ของ x_t และ y_t ได้ดังนี้

$$P(y_t | x_t) = \exp\left\{-\frac{1}{2}[y_t - Cx_t]^2 R^{-1}\right\} (2\pi)^{-p/2} |R|^{-1/2} \quad (4.6)$$

$$P(x_t | x_{t-1}) = \exp\left\{-\frac{1}{2}[x_t - Ax_{t-1}]^2 Q^{-1}\right\} (2\pi)^{-k/2} |Q|^{-1/2} \quad (4.7)$$

ดังนั้น Q-function สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.8)

$$\begin{aligned} E[\log P(\{x\}, \{y\})] &= -\sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{2}[y_t - Cx_t]^2 R^{-1} \right) - \frac{T}{2} \log |R| \\ &\quad - \sum_{t=2}^T \left(\frac{1}{2}[x_t - Ax_{t-1}]^2 Q^{-1} \right) - \frac{T-1}{2} \log |Q| \end{aligned} \quad (4.8)$$

ในขั้นตอนของ M-Step เป็นขั้นตอนในการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า θ โดยการทำอนุพันธ์ของ Q-function ในสมการที่ (4.8) เทียบกับพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่า และเทียบให้สมการดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0 สมการปรับค่า \hat{A} , \hat{R} และ \hat{Q} ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจากแบบจำลอง LDSR และสมการปรับค่า μ และ Σ ที่รอบการทำงานที่ $(k+1)$ คำนวณได้ดังขั้นตอนต่อไป

- สมการปรับค่าพารามิเตอร์ R

$$\frac{\partial f(R)}{\partial R} = -\frac{1}{2} R^{-1} \sum_{t=1}^T (y_t - Cx_t)^2 - \frac{T}{2} \log |R| = 0$$

$$\frac{1}{2R^2} \sum_{t=2}^T (y_t - Cx_t)^2 - \frac{T}{2R} = 0$$

$$\hat{R}^{(k+1)} = \frac{1}{T} (R_{yy} - 2CR_{xy} + C^2 R_{xx})$$

- สมการปรับค่าพารามิเตอร์ A

$$\frac{\partial f(A)}{\partial A} = - \sum_{t=2}^T \left(\frac{1}{2} [x_t - Ax_{t-1}]^2 Q^{-1} \right) = 0$$

$$\sum_{t=2}^T x_t x_{t-1} - \sum_{t=2}^T Ax_{t-1} x_{t-1} = 0$$

$$\hat{A}^{(k+1)} = \frac{R_{x_t x_{t-1}}}{R_{x_{t-1} x_{t-1}}}$$

- สมการปรับค่าพารามิเตอร์ Q

$$\frac{\partial f(Q)}{\partial Q} = - \sum_{t=2}^T \left(\frac{1}{2} [x_t - Ax_{t-1}]^2 Q^{-1} \right) - \frac{T-1}{2} \log|Q| = 0$$

$$\frac{1}{Q^2} \sum_{t=2}^T [x_t - Ax_{t-1}]^2 - \frac{T-1}{Q} = 0$$

$$\hat{Q}^{(k+1)} = \frac{1}{T-1} (R_{xx} - 2AR_{x_t x_{t-1}} + A^2 R_{x_{t-1} x_{t-1}})$$

ภาคผนวก ข.

MATLAB source code สำหรับเทคนิคการคาดคะเนการสลับสถานะ
ภาคพื้นดิน

MATLAB source code สำหรับเทคนิค การคาดคะเนการสลับสถานีภาคพื้นดิน

```

%% ----- Import data (rain and attenuation) -----
% attenuation main site
atten_main = importdata('attenuation_kaerai.mat');
% attenuation diverse site
atten_diver = importdata('attenuation_ladlumkaew.mat');
% rainfall main site
rain_diver = importdata('rainfall_kaerai.mat');

% choose a number of month
start = 172801;
stop = 217440;

rain_interval = rain_diver(start:stop);
atten_interval_main = atten_main(start:stop);
atten_interval_diver = atten_diver(start:stop);

%% ----- Define fix values -----
w = 30; % window size
rain_criterior = w/2; % compute the EM algorithm if in event has
rain over this value
holding = 24; % holding time at diversite
time_adv = 5; % advance prediction time
delay = w; % delay time to estimate parameters again
t_in = 1;

A = 0.8;
C = 5.4;
found = 1;
tt = 1;

%% ----- Select data interval -----
while found == 1
    rain_window = rain_interval(tt:tt+w-1);
    if (length(find(rain_window)>0)>rain_criterior)
        [A Q R xT Vt1] =
            EM(atten_interval_diver(tt:tt+w-1),rain_interval(tt:tt+w-
1),A,C);
        C = max(rain_interval(tt:tt+w-1))/
            max(atten_interval_diver(tt:tt+w-1));
        found = 0;
    else tt = tt+w;
        found = 1;
    end
end
end

```

```

%% ===== Prediction process =====
T = tt+w;
L = length(rain_interval);
rain_predict_interval = rain_interval(T:L);
atten_predict_interval = atten_interval_diver(T:L);
atten_predict_interval_main = atten_interval_main(T:L);

k = 1;
for t = 1:length(rain_predict_interval)

    if k < w

%% ----- Kalman filter BEGIN -----
        if t == 1
            xt1(t) = xT;    % initial value
            Vt1(t) = Vt1;   % initial value
        else
            xt1(t) = A*xt(t-1);
            Vt1(t) = A*Vt(t-1)*A+Q;
        end
        Kt(t) = Vt1(t)*C/(C*Vt1(t)*C+R);
        xt(t) = xt1(t)+(Kt(t)*(rain_predict_interval(t)-C*xt1(t)));
        Vt(t) = Vt1(t)-(Kt(t)*C*Vt1(t));

        k = k+1;

    else % if Kalman window over the define value

        initx_rees = mean(rain_predict_interval(t-delay+1:t));
        initp_rees = var(rain_predict_interval(t-delay+1:t));
        rain_rees = rain_predict_interval(t-delay+1:t);
        atten_rees = atten_predict_interval(t-delay+1:t);

        if (length(find(rain_rees)>0)>rain_criterior)

%% ----- EM algorithm -----
            [A Q R xT Vt1] = EM(atten_rees,rain_rees,A,C);
            C = max(rain_rees)/max(atten_rees);

            buffer_C(t) = C;
            buffer_A(t) = A;
            buffer_Q(t) = Q;
            buffer_R(t) = R;

            end

%% ----- Kalman filter BEGIN -----
            if t == 1
                xt1(t) = xT;
                Vt1(t) = Vt1;
            else
                xt1(t) = A*xt(t-1);
                Vt1(t) = A*Vt(t-1)*A+Q;
            end
            Kt(t) = Vt1(t)*C/(C*Vt1(t)*C+R);
            xt(t) = xt1(t)+(Kt(t)*(rain_predict_interval(t)-C*xt1(t)));
            Vt(t) = Vt1(t)-(Kt(t)*C*Vt1(t));

            k = 1;

        end
    end
end

```

```

%% ----- Advance time prediction -----
x_adv(1) = xt(t);
w_adv = sqrt(Q)*randn(1,time_adv);
for t_adv = 2:time_adv
    x_adv(t_adv) = A*x_adv(t_adv-1)+w_adv(t_adv);
end

x_adv_buffer(t) = x_adv(end);

%% ===== Switching process =====
if t >= t_in;
    if (x_adv(end)>=6) || (xt(t)>6)
        if t_in+holding > length(rain_predict_interval)
            atten_occur(t_in:length(rain_predict_interval)) =
atten_predict_interval_main(t_in:length(rain_predict_interval));
        else
            for ii = 1:holding
                % Switch to diversite
                atten_occur(t_in) =
atten_predict_interval_main(t_in);
                t_in = t_in+1;
            end
        end
    else
        % stay at current site (main site)
        atten_occur(t_in) = atten_predict_interval(t_in);
        t_in = t_in+1;
    end
end

end

%% ===== Plot figure =====
figure(1);
subplot(311);plot(atten_predict_interval);
title('Attenuation level KR site');
subplot(312);plot(atten_predict_interval_main,'r');
title('Attenuation level LLK site');
subplot(313);plot(atten_occur,'k');
title('Attenuation using switching algorithm');

%% ===== Error calculate =====
atten_true = sum(atten_predict_interval(atten_predict_interval > 6));
atten_switched = sum(atten_occur(atten_occur > 6));
atten_improve = ((atten_true-atten_switched)/atten_true)*100;
fprintf('Atten weight improve = %.2f%%\n',aw_improve);

```

```

function [A Q R xT Vt1] = EM(x,y,A,C)

N = length(y);
initx = mean(y);      % Initial value
initp = var(y);       % Initial value
Q = (1/(N-1))*sum((x-mean(x))*(x-mean(x))'); % Driving noise cov
R = (1/(N-1))*sum((y-mean(y))*(y-mean(y))'); % Measurement noise cov
LL_complete = [];
Pt = zeros(1,N);
j = 1;
converge = 0;
LL_y = [];
LL_previous = -inf;
threshold = 10e-5;
while (~converge)
    [xt xt1 Vt Vt1 Kt] =
    kalman_filter(N,initx,initp,y,A(j),C,Q(j),R(j));
    [xT VT Pt Ptt1 Vtt1] = kalman_smoother(N,Vt,Vt1,xt,Kt,A(j),C);

    e = y(2:N) - C*xt1(2:N);
    Ree = C*C*Vt1(2:N) + R(j);
    ly = -((1/2)*sum(log(Ree)))-((1/2)*sum((e'*e)/Ree)); LL_y = [LL_y
ly];

    [C,R(j+1),A(j+1),Q(j+1),initx,initp] = rees(N,y,xT,VT,Vtt1,Pt,C);
    j = j + 1;

    if ly - LL_previous < threshold
        converge = 1;
    else
        converge = 0;
        LL_previous = ly;
    end
end
A = A(end);
Q = Q(end);
R = R(end);
xT = xT(end);
Vt1 = Vt1(end);
end

function [xt xt1 Vt Vt1 Kt] = kalman_filter(N,initx,initp,y,A,C,Q,R)
    xt = zeros(1,N);
for t = 1:N
    if t == 1
        xt1(t) = initx;
        Vt1(t) = initp;
    else
        xt1(t) = A*xt(t-1);
        Vt1(t) = A*Vt(t-1)*A+Q;
    end
    Kt(t) = Vt1(t)*C/(C*Vt1(t)*C+R);
    xt(t) = xt1(t)+(Kt(t)*(y(t)-C*xt1(t)));
    Vt(t) = Vt1(t)-(Kt(t)*C*Vt1(t));
end
end
end

```

```

function [xT VT Pt Ptt1 Vtt1] = kalman_smoother(N,Vt,Vt1,xt,Kt,A,C)

xT(N) = xt(N);
VT(N) = Vt(N);
KT = Kt(N);
for t = N:-1:2
    J(t-1) = (Vt(t-1)*A)/Vt1(t);
    xT(t-1) = xt(t-1)+(J(t-1)*(xT(t)-(A*xT(t-1))));
    VT(t-1) = Vt(t-1)+(J(t-1)*(VT(t)-Vt1(t))*J(t-1));
end

I = 1;
Vtt1(N) = (I-KT*C)*A*Vt(N-1);

for t = N:-1:3
    Vtt1(t-1) = Vt(t-1)*J(t-2)+J(t-1)*(Vtt1(t)-A*Vt(t-1))*J(t-2);
end

Ptt1 = [NaN Vtt1(2:N)+xT(2:N).*xT(1:(N-1))];
Pt = VT(2:N)+(xT(2:N).*xT(2:N));
end

function ly = LL_y(N,y,R,C,Vt1)

e = y(2:N) - C*xT(2:N);
Ree = C*C*Vt1(2:N) + R;
ly = -((1/2)*sum(log(Ree)))-((1/2)*sum((e'*e)/Ree));

end

function [C,R,A,Q,initx,initp] = rees(N,y,xT,VT,Vtt1,Pt,C)

Ryy = sum(y(2:N).*y(2:N));
Rxy = sum(xT(2:N).*y(2:N));
Rxx = sum((xT(2:N).*xT(2:N))+VT(2:N));
Rx1x1 = sum((xT(1:N-1).^2)+VT(1:N-1));
Rxx1 = sum((xT(2:N).*xT(1:N-1))+Vtt1(2:N));

C = C;
A = (Rxx1)/(Rx1x1);
R = (Ryy-(2*C*Rxy)+(C*C*Rxx))/N;
Q = (Rxx-(2*A*Rxx1)+(A*A*Rx1x1))/(N-1);
initx = xT(1);
initp = Pt(1);

end

```

ภาคผนวก ค.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



ECTI-CON 2014

MAY 14-17, 2014

Nakhon Ratchasima, Thailand



ISBN: 978-1-4799-2992-4

IEEE Catalog Number: CFP1406E-USB

Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology
Tel: (+66) 0-4422-4392, Fax: (+66) 0-4422-4603

A Short-term Rain-induced Attenuation Model for Satellite Link Quality Prediction

Jirutchaya Poolsawut, Tulaya Limpiti, and Nattakan Puttarak
 Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
 Email: s5611902@kmitl.ac.th, kltulaya@kmitl.ac.th, kpnattak@kmitl.ac.th

Abstract—This paper proposes a novel but simple satellite link quality prediction based on the relationship between rainfall rate and satellite signal attenuation. After quantifying their relationship statistically, we describe their contemporaneous variations using a linear dynamical system response model. The expectation-maximization (EM) algorithm is used to obtain the maximum likelihood estimates of the model parameters. Subsequently, the communication link quality is predicted by thresholding the estimated short-term signal attenuation level obtained from the Expectation step of the EM algorithm. The prediction performance of the proposed method is compared against the measured beacon signals from Thaicom-4 (IPSTAR) satellite during rainfalls. Using solely the observed rainfall rates from a tipping bucket rain gauge, the algorithm is able to decently predict the satellite link quality. We believe the proposed model can be modified as a predictive tool for real-time link unavailability monitoring of satellite communication system.

I. INTRODUCTION

Satellite communication has gain popularity in recent years because of its large coverage, reliability, and compatibility to many types of application. Ground to space data transmission using microwave signals is the basic concept of satellite communications. Signal degradation may occur as a result of some atmospheric disturbances along the propagation path. The theoretical and experimental studies in [1] show that the main factor of signal attenuation in the high frequency bands used for satellite communications, e.g., C-band (3.7-4.2 GHz), Ku-band (10.95-12.75 GHz) or Ka-band (18.3-22.2 GHz) is rain. Furthermore, other factors such as wind, cloud, mist and humidity also affect the signal quality.

In practice, service providers use the percentages of link availability predicted from rain-induced attenuation models such as [2], [3] to guarantee their quality of satellite communication services. The predictions are calculated with the annual cumulative rainfall data. For example, [4] and [5] predict the satellite attenuation for Malaysia and Thailand, respectively. Nevertheless, there are some limitations to the accuracy of these prediction models. Rainfall data has to be collected sufficiently long (on the order of years). The precision of the rain gauge, as well as the assumption of the climate region, also influence the result. The biggest drawback that motivates the work in our paper is the fact that these are long-term predictions, usually given in the form of percent of year attenuation value is exceeded, and hence are not appropriate for real-time link quality monitoring. In [6], a real-time prediction model for attenuation due to rain fade and scintillation using linear regression has been introduced. However, the actual

relationship between rainfall rate and signal attenuation has not been investigated, and the prediction contains large error particularly during rainfalls. Another method proposed in [7] uses synthetic storm technique for converting measured rain rate data to rain attenuation.

This paper presents a simple rain-induced attenuation model based on the statistical relationship between rainfall data and beacon signal attenuation data. The model is subsequently used for satellite link quality prediction. In section II, the statistical relationship between rainfall data and attenuation data and the proposed model are presented. Section III illustrates the results of this model. Finally the conclusion of this paper is drawn in section IV.

II. METHODS

A. Statistical relationship between rainfall rate and signal attenuation

We select data from 90 rainfall events with at least 60 mm/hr rainfall rate in 2011 to analyze. Figure 1 illustrates the exemplary signal attenuations from Thaicom-4 (IPSTAR) satellite beacon in Ka-band (20.1998 GHz) and rainfall rate data from a tipping bucket rain gauge (Casella Co.Ltd.) with 0.5 mm, per tipping for three different rainfall events on April 29, 2011 between 3.07pm-5.07pm., May 11, 2011 between 3.42pm-5.42pm, and April 5, 2011 (12.29pm-2.29pm). The satellite signal strength data are converted to attenuations by subtracting off the average signal level. The rain gauge is installed at Thaicom PLC, Kaerai satellite station in Nonthaburi, Thailand. Data are normalized using the highest magnitudes of rainfall rate and attenuation level in 2011. It is evident that there is a close resemblance between the time series patterns of the rainfall rates and the attenuations with approximately constant lag. To quantify this observation statistically, we calculate the cross-correlation between the rainfall rate and attenuation level at different lags.

Figures 2 and 3 depict the histogram of highest cross-correlation from each of the 90 rainfall events and the histogram of the corresponding lag times, respectively. The highest cross-correlation values in all events are positive and 60% of the values are greater than 0.8. This result confirms the strong relationship between attenuation value and rainfall rate [8]. It means that, if the rain fall rate increases the signal attenuation also increases and vice versa. Note that the average time that gives the highest cross-correlation value is with the rainfall rate at $\tau = 14$ minutes behind the attenuation. We

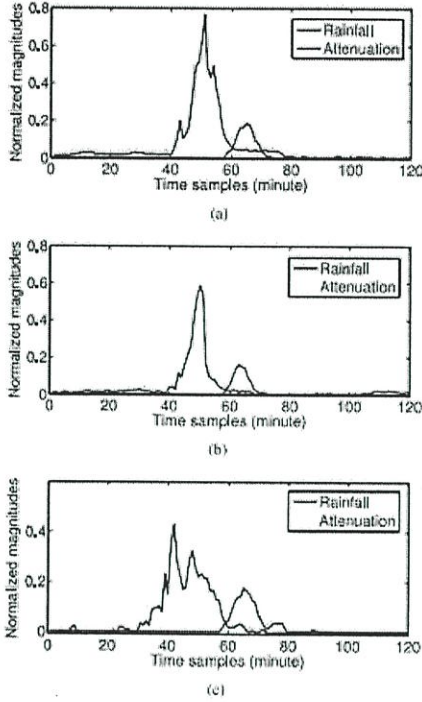


Fig. 1. Examples of normalized rainfall rate and attenuation time series. (a) 1st event (April 29, 2011 3:07pm-5:07pm). (b) 2nd event (May 11, 2011 3:42pm-5:42pm). (c) 3rd event (April 5, 2011 12:29pm-2:29pm).

believe this time lag τ depends on the location of the rain gauge with respect to the receiving antenna, as rains and clouds may affect the signal farther along the propagation path. The actual cause of the observed time lag has not been thoroughly investigated in this study, so the averaged time lag is applied for the proposed model.

B. Data model

From the statistical relationship in Section II-A and the fact that the rainfall rate and satellite attenuation data are both varying slowly with time, we choose to describe their variations using the linear dynamical system response (LDSR) model,

$$x_{t+1} = Ax_t + w_t \quad (1)$$

$$y_{t+\tau} = Cx_t + v_t \quad (2)$$

The process model (Eq. (1)) describes the signal attenuation variation. The measurement model in Eq. (2) is a linear model relating rainfall rate and attenuation variation. The process noise w_t and measurement noise v_t are assumed to be normally distributed, zero-mean noise with variance Q and R , respectively. In this model, the observed data y_t is the rainfall

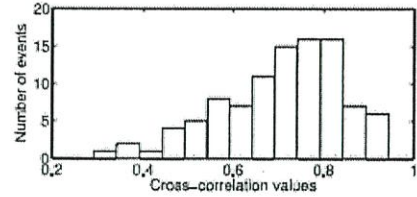


Fig. 2. Histogram of the highest cross correlation values from 90 rain events.

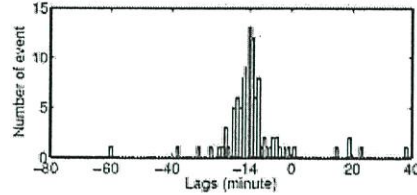


Fig. 3. Histogram of lag times between rainfall rate and attenuation data at the highest cross correlation from 90 rain events.

rate from the tipping bucket rain gauge and x_t is the underlying signal attenuation at time t . The rainfall time series y_t is shifted by the expected lag of $\tau = 14$ minutes so that it is aligned with the attenuation time series. The unknown parameters from Eq. (1)-(2) are the relationship between present and future attenuations at successive times A , and the noise variances Q and R . In Eq. (2), C is approximately the ratio between rainfall rate and attenuation, which is calculated from the ratios of highest rainfall rate and signal attenuation during 90 rainfall events. The expected value of this ratio, $C = 5.4147$, is used in our model.

C. Expectation-Maximization Algorithm

We obtain the maximum likelihood estimates of the unknown parameter $\theta = \{A, Q, R\}$ using the expectation-maximization (EM) algorithm [9]. We only observe the rainfall rate $y = \{y_t, t = 1, 2, \dots, T\}$ but not the attenuation level $x = \{x_t, t = 1, 2, \dots, T\}$, the EM algorithm forms the so-called complete data $\{y, x\}$ and proceeds as follows. Each iteration of the EM algorithm consists of two major steps. First is an expectation step (E-Step) and the other one is a maximization step (M-Step).

1) *E-step*: in the $(k+1)^{th}$ iteration, we compute the Q-function, which is the expected complete data log-likelihood conditioned on the estimated value of θ at $(k)^{th}$ iteration and the observed data y , i.e.,

$$Q(\theta|\theta^{(k)}) = E_{x|y, \theta^{(k)}}[\log(\mathbf{x}, \mathbf{y})]. \quad (3)$$

We also estimate the signal attenuation using the conditional mean. From the property of the LDSR model, the conditional distribution is also Gaussian and is given by

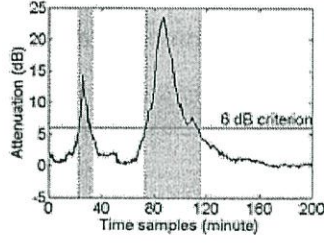


Fig. 4. The 6 dB cut off for signal quality prediction. The shaded areas denote time durations with bad link quality.

$$p(x_t|y, \theta^{(k)}) = \mathcal{N}(\hat{x}_{t|T}, P_{t|T}). \quad (4)$$

The mean $\hat{x}_{t|T}$ and variance $P_{t|T}$ can be obtained from the fixed-interval smoother [10].

2) *M-step*: We then update the unknown parameters θ by setting the derivative of the Q-function with respect to θ to zero. The update equations for \hat{A} , \hat{R} and \hat{Q} at $(k+1)^{th}$ iteration are given by

$$\hat{R}^{(k+1)} = \frac{1}{T} [R_{yy} - 2C R_{xy} + C^2 R_{xx}] \quad (5)$$

$$\hat{A}^{(k+1)} = \frac{R_{x_t x_{t-1}}}{R_{y_{t-1} y_{t-1}}} \quad (6)$$

$$\hat{Q}^{(k+1)} = \frac{1}{T-1} [R_{x_t x_t} - 2\hat{A}^{(k+1)} R_{x_t x_{t-1}} + (\hat{A}^{(k+1)})^2 R_{x_{t-1} x_{t-1}}] \quad (7)$$

In Eq. (5)-(7),

$$R_{yy} = \sum_t y_t^2 \quad (8)$$

$$R_{xy} = \sum_t \hat{x}_{t|T} + y_t \quad (9)$$

$$R_{xx} = \sum_t (\hat{x}_{t|T}^2 + P_{t|T}) \quad (10)$$

$$R_{x_t x_{t-1}} = \sum_t (\hat{x}_{t|T} \hat{x}_{t-1|T} + P_{t,t-1|T}) \quad (11)$$

Note that we suppress the dependence of $\hat{x}_{t|T}$ and $P_{t|T}$ on k for notational ease. The lag-one covariance smoother $P_{t,t-1|T}$ in Eq. (11) can also be obtained from the fixed-interval smoother in [10]. The EM iteration is terminated when the original data log-likelihood converges.

Subsequently, the estimated signal attenuations $\{\hat{x}_{t|T}\}$ from the EM algorithm after convergence are used for link quality prediction. In practice, the attenuation cutoff is set at 6 dB. As seen in Fig. 4, if the attenuation level is lower than 6 dB, the communications link is deemed normal or reliable. Attenuation level larger than 6 dB is considered unacceptable and some diversity techniques, e.g. site switching or time diversity, should be employed to prevent communication impairment.

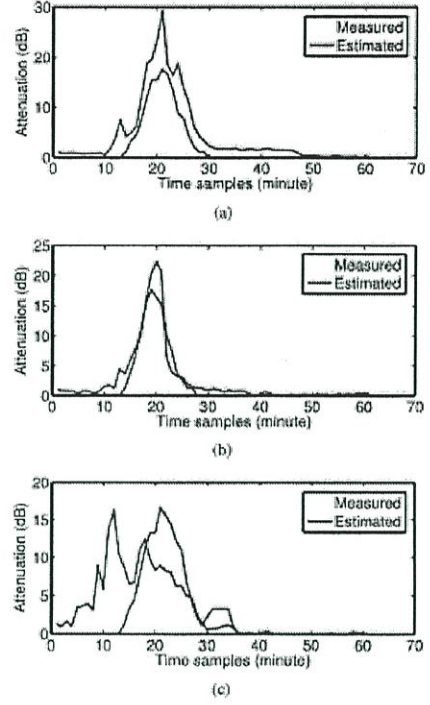


Fig. 5. Measured and estimated attenuations using the proposed model for the three examples in Fig. 1. (a) 1st event (April 29, 2011 3:07pm-5:07pm). (b) 2nd event (May 11, 2011 3:42pm-5:42pm). (c) 3rd event (April 5, 2011 12:29pm-2:29pm).

III. RESULTS

We investigate the capability of our proposed model in estimating the satellite attenuation and predicting link quality using the same 90 events of Ka-band satellite communications during rainfalls in 2011 as in Section II-A. The rainfall rate data are used to predict the quality of the Thaicom-4 (IPSTAR) satellite beacon signals.

The estimated attenuations from the EM algorithm for the rain events in Fig. 1 along with the actual measurements are depicted in Fig. 5. It is observed that the algorithm is able to estimate the attenuation quite nicely. However, there could be some cases with a discrepancy between the estimated and actual attenuation time series. This error occurs when the time lag between the rainfall data and the beacon signal is mismatched to the model, that is, the lag is not equal or close to 14 minutes.

Figure 6 illustrates the convergences of the log-likelihood and the parameter estimates $\{\hat{A}, \hat{Q}, \hat{R}\}$ as a function of the EM iterations. It can be seen that the parameters converge within a small number of iterations. The log-likelihood value also monotonically increased until it reaches convergence. The

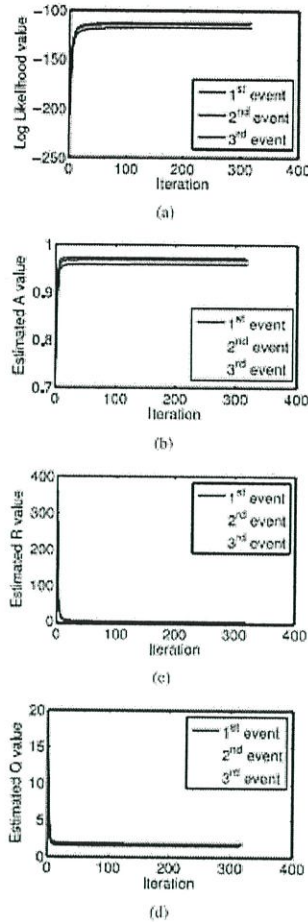


Fig. 6. Convergences of unknown parameter estimates (a) log-likelihood value, (b) A value, (c) R value and (d) Q value as a function of EM iterations.

TABLE I
MEANS AND VARIANCES OF ESTIMATED PARAMETERS.

Parameter	Mean	Variance
A	0.9642	6.1397e-004
Q	2.4568	7.4746
R	0.0129	0.0017

histograms of the parameter estimates for all 90 events are depicted in Fig. 7, with their means and variances reported in Table I. We observe that the estimates for A and R are fairly consistent with small variances. On the other hand, the Q estimate has large variance. Large value of Q implies more variations in the rain-induced attenuation time series, which is not unexpected for country in a tropical region like Thailand.

We compare the model predictions with the actual link

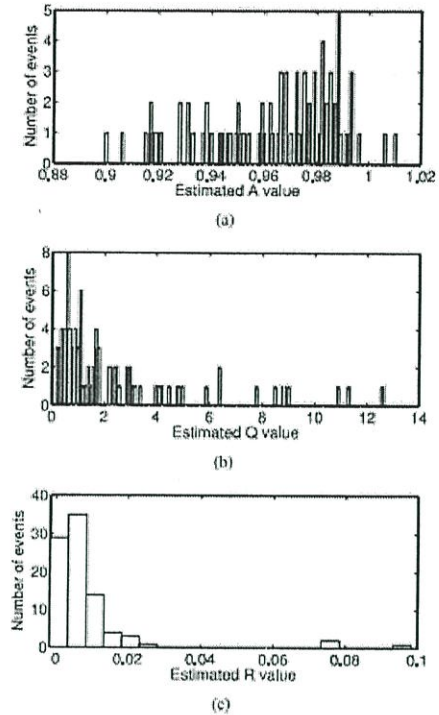


Fig. 7. Histograms of the estimated parameters for the 90 events. (a) A value, (b) Q value and (c) R value.

TABLE II
THE PERCENTAGES OF CORRECT AND INCORRECT LINK QUALITY PREDICTION USING THE PROPOSED MODEL.

		Actual link quality	
		normal	bad
Predicted link quality	normal	93.89%	34.45%
	bad	6.11%	64.55%

quality. The results are shown in Table II. The percentages of correct prediction for the 2 cases (good signal and bad signal) are 93.89% and 64.55%, respectively. Again, the prediction error in the case of bad link quality stems from the wrong lag time used to align the time series.

IV. CONCLUSION

This paper proposes a simple method for satellite link quality prediction using only the observed rainfall rates. We have shown statistically that there is a strong relationship between rainfall rate and satellite signal attenuation time series. This relationship can be modeled using a linear dynamical system response model. The EM algorithm estimates the unknown parameters of the proposed model and the attenuation levels by utilizing the Kalman filter and the fixed-interval smoother. Using the practical 6 dB cut-off criterion, our method gives a

decent link quality prediction performance, with smaller error for predicting the durations of good link quality. The error in bad link quality prediction arises from the mismatch between the expected time lag used within the model and the lags in the actual rainfall events.

Currently, we need to collect data in the time windows of T minutes for processing. Depending on the sampling rate of the satellite receiver and the resolution of the rain gauge, T may be adjusted to operate in a near real-time manner. In addition, the appropriate geo-location of the rain gauge installation along the propagation path should be investigated to decrease the lag time mismatch and increase the prediction performance. These are the subjects of our future work.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank Thaicom PLC. for providing satellite beacon signal data and the location for the rain gauge. Also, we would like to acknowledge the NSTDA-University-Industry Research Collaboration (NUI-RC) scholarship [NUI-RC01-55-035] grant from the National Science and Technology Development Agency (NSTDA).

REFERENCES

- [1] R. K. Crane, *Electromagnetic wave propagation through rain*, Wiley New York, 1996.
- [2] R. K. Crane, "Prediction of attenuation by rain," *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-28, no. 9, pp. 1717–1733, 1980.
- [3] Recommendation ITU-R P.618-11, "Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunications system," 2013.
- [4] M.N.H. Nordin, L.C. Yih, A. Mahmoodbeik, and J.S. Mundeep, "Analysis of rain attenuation model for ku band in cameron highland, malaysia," in *Recent Advances in Automatic Control, Information, and Communications: Proceedings of the 13th International Conference on Applied Informatics and Communications (AIC '13)*, Valencia, Spain, Aug 2013, pp. 287–290.
- [5] D. Lakanchah, N. Leelanuji, N. Hemmakom, and Y. Moriya, "Study on ka band propagation effect by rain," in *Proceedings of the 11th International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2006)*, Singapore, Nov 2006, pp. 1–4.
- [6] J. H. Lee, Y. S. Choi, H. S. Lee, and J. K. Paek, "Real-time estimation of rain attenuation on the satellite link," in *Proceedings of the 57th IEEE Semianual Vehicular Technology Conference (VTC2003-Spring)*, Apr 2003, vol. 4, pp. 2291–2294.
- [7] A.K. Shukla, S. Das, and B. Roy, "Rain attenuation measurements using synthetic storm technique over Ahmedabad," in *Proceedings of the 4th International Conference on Computers and Devices for Communication (CODEC 2009)*, Kolkata, India, Dec 2009, pp. 1–4.
- [8] R. P. Runyon, K. A. Coleman, and D. J. Pittenger, *Fundamental of behavioral statistics*, McGraw-Hill, New York, 1991.
- [9] X. L. Meng and D. B. Rubin, "Maximum likelihood estimation via the ecm algorithm: A general framework," *Biometrika*, vol. 80, no. 2, pp. 267–278, 1993.
- [10] R. H. Shumway and D. S. Stoffer, *Time series analysis and its applications: with R examples*, Springer, 2011.



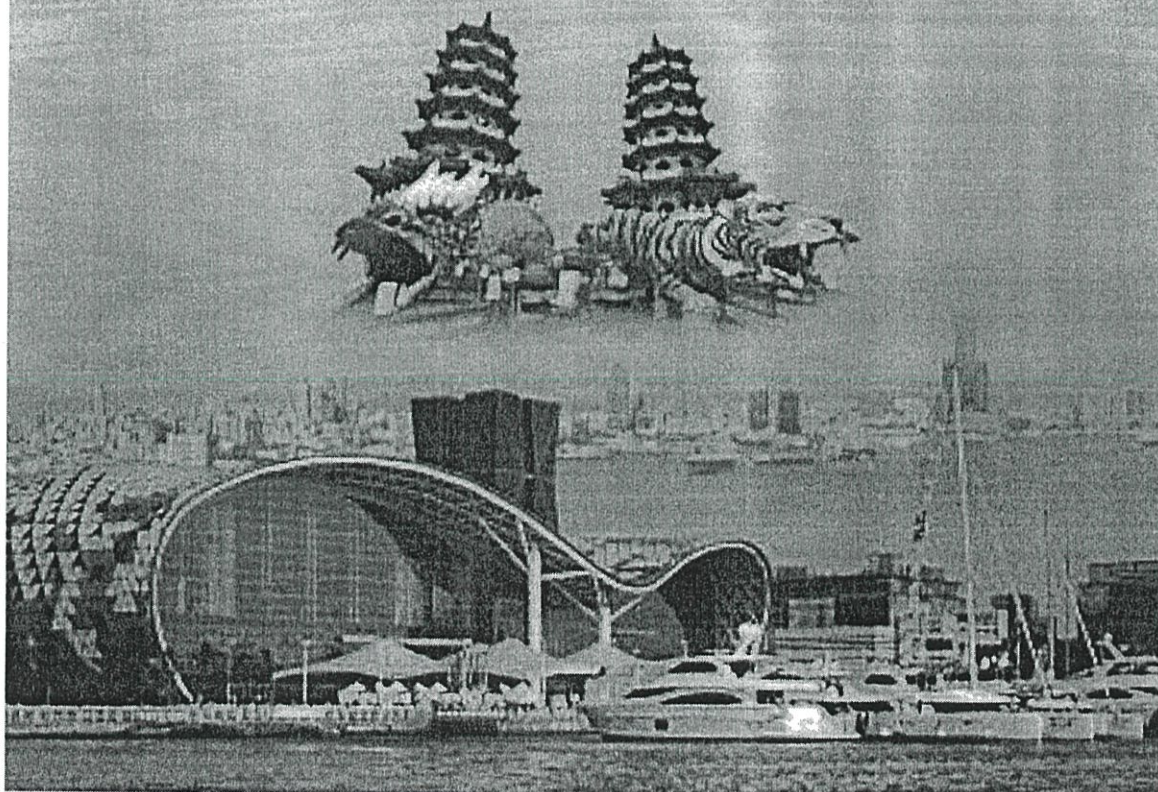
International Symposium on Antennas and Propagation

ISAP 2014

Kaohsiung • Taiwan

FINAL PROGRAM

December 2-5, 2014 | Grand Hi-Lai Hotel, Kaohsiung, Taiwan



A study on Ka-band site switching using advanced prediction for rain-induced attenuation

Jiratchaya Poolswut, Tulaya Limpiti, and Nattakan Puttarak

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Abstract - High frequency satellite communications suffers from rain-induced attenuations, which may cause service discontinuity during high-intensity rain events. To combat this, we propose a novel site switching technique that anticipates signal attenuations using a linear dynamical system response model and performs site switching in advance. Using only the rainfall data measured at a ground station for attenuation prediction, we demonstrate that our method is able to lessen signal attenuation while maintaining link availability.

Index Terms — Attenuation, expectation-maximization, Kalman filter, site switching.

I. INTRODUCTION

Satellite communications in high frequency bands, e.g. Ka-band or Ku-band, suffers from attenuations caused mainly by rain and other atmospheric disturbances. One of the widely used diversity techniques for discontinuity avoidance is site diversity [1], [2]. At least two ground stations with different geo-locations are required. In case of a high rain-induced attenuation event occurring at the main site, the transmitted signal will be sent instead from the secondary site. Normally, site switching is operated *after* severe degradation or signal discontinuity has been observed. This motivates us to develop a site switching technique that predicts attenuation *in advance*, in order to improve the signal quality and maintain link availability during high-intensity rain events.

II. METHOD

A. Data model

We have previously proposed modelling the statistical relationship between signal attenuation and rainfall rate using the linear dynamical system response (LDSR) model as [3],

$$x_{t+1} = ax_t + w_t \quad (1)$$

$$y_{t+1} = cx_t + v_t \quad (2)$$

where t represents time sample with one minute increment; x is the signal attenuation level (dB) and y is the measured rainfall rate (mm/h) shifted by the expected lag of $\tau=14$ minutes obtained from the study in [3]. Equation (1) describes the variation in attenuation and (2) relates the attenuation to the rainfall rate. The noises w_t and v_t are assumed zero-mean Gaussian with variance q and r , respectively. The unknown parameters for the model are $\theta = \{a, c, q, r\}$. The parameter c is estimated from the ratio between the highest rainfall rate and the signal attenuation within the time interval of interest. The remaining unknown parameters $\{a, q, r\}$ are estimated

using the fixed-interval smoother and the expectation-maximization algorithm. Advanced signal attenuation prediction is subsequently calculated using Kalman filter. The detailed calculations can be found in [3] and references therein.

B. Site switching process

The block diagram of our proposed method is given in Fig. 1. Only the rainfall rate measured at the main satellite ground station is used for the attenuation prediction, not the signal itself. We collect rainfall rate data in w -minute intervals and use it to estimate the LDSR model parameter θ . During precipitation time θ is repeatedly updated to minimize modelling error. The current value of θ is then use to predict the signal attenuation x_t for the future f minutes.

Site switching is triggered if the predicted attenuation at the main site is higher than a practical acceptable level of 6 dB. Subsequent transmission is held at the secondary site for h minutes before switched back to the main site.

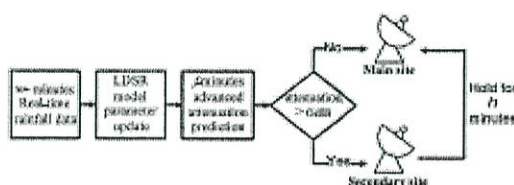


Fig. 1. Block diagram of the proposed site switching process.

III. RESULTS

We demonstrate the capability of our site switching technique using 4-month data from Thailand's rainy season in 2011. The rainfall rate data is from a tipping bucket rain gauge (Casella Co. Ltd.) installed at Thaicom P.L.C. Kaerai satellite station in Nonthaburi, Thailand. The actual signal attenuations are obtained from Thaicom-4 (IPSTAR) satellite beacon signals in Ka-band (20.1998 GHz) received at Kaerai station and at Ladlunluew satellite station in Pathumthani, Thailand. We assume Kaerai station is the main site and Ladlunluew station is the secondary site.

We first investigate the optimal values of the window size w used to update the LDSR parameters, the advancing time f used for advanced attenuation prediction, and the holding time h to stay in operation at the secondary site. Table I and II report the improvement in signal quality at different values of w and f , respectively. The values that give the best signal

quality improvement for most months are $w = 30$ minutes and $f = 5$ minutes.

We also vary the holding time h between 5–30 minutes, but discover that this variable has negligible effect on the percent improvement. Therefore, we use the average duration of attenuation measured at both ground stations as our guide. The averaged attenuations at Kaerai and Ladlunkaew stations are 24.83 minutes and 24.63 minutes, respectively. Hence, we set the value of $h = 24$ minutes in our process.

TABLE I
OPTIMAL WINDOW SIZE (w)

Window size (minute)	Signal quality improvement (%)			
	May	June	July	August
10	42.23	51.27	57.32	N/A
20	26.21	57.79	51.17	24.43
30	56.43	63.18	73.78	10.86
40	25.46	61.50	65.05	11.35

TABLE II
OPTIMAL ADVANCING TIME (f)

Advancing time (minute)	Signal quality improvement (%)			
	May	June	July	August
5	44.57%	61.02%	83.51%	14.28%
10	34.51%	62.61%	77.47%	10.83%
15	34.31%	62.97%	78.13%	7.07%
20	28.77%	63.53%	70.96%	11.07%
25	29.69%	59.54%	71.36%	6.70%
30	26.77%	64.31%	70.69%	9.10%

Examples of signal attenuation levels after utilizing site switching are depicted in Fig. 2 and 3 for May 17–20, 2011 and July 11–14, 2011, respectively. It is evident that the attenuation levels are decreased after incorporating site switching. Fig. 2 illustrates the limitation of our technique when both ground stations suffer from rain-induced attenuation at the same times. However, drastic signal quality improvement is possible if the attenuations at the two stations do not coincide, as can be seen in Fig. 3.

Overall, we test the technique using consecutive rainfall data within each month. The improvements in signal quality after site switching are summarized in Table III. The percent improvement is largest in July because the attenuations at Ladlunkaew station are low. On the other hand, large attenuations at Ladlunkaew limit the improvement in August.

IV. CONCLUSION

This paper presents a novel yet simple technique for advanced site switching using only rainfall rate data at the main satellite ground station. Our technique can significantly improve signal quality with the added benefit of being able to anticipate and prevent signal attenuation before service discontinuity actually happens. If the rainfall data is also available at the secondary site, it is possible to predict attenuations at both sites in advance and use the information

to adjust the holding time more appropriately. This is the topic of our further investigation.

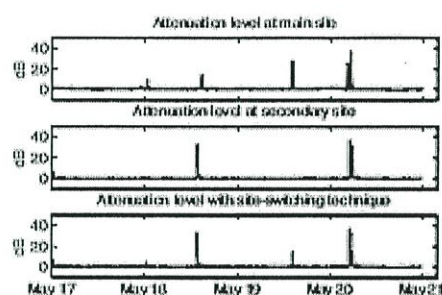


Fig. 2. Attenuation levels during May 17–20, 2011.

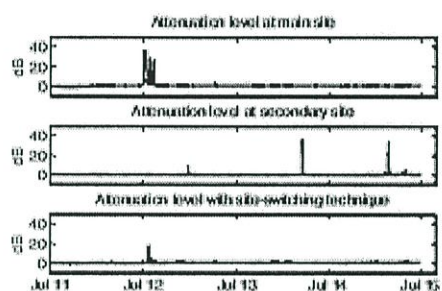


Fig. 3. Attenuation levels during July 11–14, 2011.

TABLE III
SIGNAL QUALITY IMPROVEMENT AFTER SITE SWITCHING

Month	May	June	July	August
Signal quality improvement (%)	41.57	61.02	83.51	14.28

ACKNOWLEDGMENT

This work is partially supported by Grant no. NUI-RC01-55-035 from the National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Thailand. We also thank Thaicom Public Company Limited for providing satellite beacon signal data.

REFERENCES

- [1] L.J. Apollito, *Satellite communications system engineering*, Wiley New York, 2008.
- [2] J.X. You, Y.J. Li, et, and J.T. Ong, "Site diversity gain at the equator: rain-derived links modeling in Singapore," *Int. J. of Satell. Commun. Network*, doi: 10.1002/eqn.1004, 2014.
- [3] J. Pookkiet, T. Limpitai, and N. Pattarak, "A short-term rain-induced attenuation model for satellite link quality prediction," in *Proc. 11th Int. Conf. Electrical Eng., Electronics, Comp., Telecommun. and Info. Tech. (ECTT-CON)*, Nakhon Ratchasima, Thailand, 04–07 May 2014.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวจิรัชญา พูลสวัสดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดจันทบุรี
ที่อยู่	112/218 หมู่ 11 ถนนพระยาตรัง ตำบลท่าช้าง อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี 22000
ประวัติการศึกษา	2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1. J. Poolsawut, T. Limpiti, and N. Puttarak. "A short-term rain-induced attenuation model for satellite link quality prediction" Proc. 11st Int. Conf. Electrical Eng./Electronics, Comp., Telecomm. and Info. Tech. (ECTI-CON), Nakhon Ratchasima, Thailand, 14-17 May 2014. pp. 1-5.

2. J. Poolsawut, T. Limpiti, and N. Puttarak. "A study on Ka-band site switching using advanced prediction for rain-induced attenuation" Proc. 19th International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) 2014, Kaosiung, Taiwan. 2-5 December 2014.