

การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ใช้คลื่นวิทยุ



นายผดุงศักดิ์ เกษตรเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-332-874-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LOCAL RAINFALL RATE MEASUREMENT USING RADIO WAVES



Mr. Padungsak Kasatejaroen

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
--for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1999


ISBN 974-332-874-2


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ใช้คลื่นวิทยุ
โดย นายผดุงศักดิ์ เกษตรเจริญ
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร

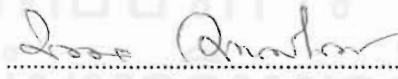
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา กิระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร)

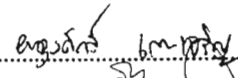
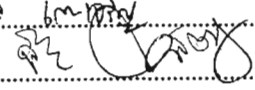

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์)

ผดุงศักดิ์ เกษตรเจริญ : การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ใช้คลื่นวิทยุ (LOCAL RAINFALL RATE MEASUREMENT USING RADIO WAVES) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. จัตรชัย ไวยาพัฒนกร, 106 หน้า, ISBN 974-332-874-2

ฝนเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นอยู่เสมอในประเทศไทย การทราบอัตราการตกของฝนอย่างถูกต้องและรวดเร็วจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อระบบเตือนภัยน้ำท่วมและกิจการต่างๆ เช่น การขนส่งสินค้า เกษตรกรรม เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเสนอการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ใช้คลื่นวิทยุซึ่งทำให้ได้ข้อมูลอัตราการตกของฝนในขณะใดขณะหนึ่ง วิธีการวัดแบ่งเป็นสองลักษณะคือการวัดการสะท้อนและการวัดการส่งผ่าน โดยวิธีการวัดการสะท้อนได้แก่เรดาร์พัลส์สังเคราะห์ ส่วนวิธีการวัดการส่งผ่านได้แก่ระบบมาตรวิทยุระยะไกลมาก การวัดด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์มีความซับซ้อนในการประมวลผลมากกว่าระบบมาตรวิทยุระยะไกลมาก อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการวัดประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขั้ววงจรถ่ายทอดและรับสัญญาณ สายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดสำหรับส่งและรับสัญญาณ เสาตั้งสายอากาศที่สามารถปรับโพลาไรเซชันของสายอากาศได้ และคอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูลและประมวลผล

การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยระบบวัดทั้งสองกระทำที่บริเวณแดดฟ้าของอาคารวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และร้านบ้านแก๊ส อำเภอลำสนธิ จังหวัดชุมพร โดยต้องวัดอัตราการตกของฝนที่แท้จริงด้วยถังวัดน้ำฝนควบคู่กันไปด้วยเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่วัดด้วยคลื่นวิทยุ ผลการวัดถูกนำไปประมวลผลเพื่อหาค่าปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน จากค่าปัจจัยเหล่านี้และอัตราการตกของฝนที่แท้จริงที่วัดได้ ทำให้สามารถหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนได้ โดยใช้หลักการที่ทำให้ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมีค่าน้อยที่สุด ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นขั้นตอนวิธีแบบกฎกำลังซึ่งแบ่งเป็นสองลักษณะ ได้แก่ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวและขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว และมีการตรวจสอบขั้นตอนวิธีด้วยค่าทางสถิติต่างๆ นอกจากนี้ยังมีการใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเพื่อช่วยให้การระบุอัตราการตกของฝนมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ผลการหาและตรวจสอบขั้นตอนวิธีแสดงให้เห็นว่า เรดาร์พัลส์สังเคราะห์มีสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนที่เหนือกว่าระบบมาตรวิทยุระยะไกลมาก

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....
ปีการศึกษา 2542.....

ลายมือชื่อนิสิต 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4070344521: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: LOCAL RAINFALL RATE MEASUREMENT / SYNTHETIC PULSE RADAR /
VERY SHORT RANGE RADIOMETRIC SYSTEM
PADUNGSAK KASATEJAROEN : LOCAL RAINFALL RATE MEASUREMENT
USING RADIO WAVES. THESIS ADVISOR :ASSIST. PROF. CHATCHAI
WAIYAPATTANAKORN, Ph.D. 106 pp. ISBN 974-332-874-2

Rain is a natural phenomenon which always occurs in Thailand. The accurate and timely knowledge of rainfall rate is very useful for flood warning system and other purposes such as transportation and agriculture, etc. For this reason, it is proposed to measure the local instantaneous rainfall rate using radio waves. The measurement methods are the reflection measurement using synthetic pulse radar and the transmission measurement using a very short range radiometric system. The synthetic pulse radar is more complicated in signal processing aspect. The major equipment is the network analyser for generating and receiving signal, the transmitting and receiving pyramidal horn antennas, the polarisable antenna holders and a computer for data collecting and processing.

The local rainfall rate measurements are performed at the rooftop of the Electrical Engineering Department Building, Chulalongkorn University, and at the Ban-Bhasash drugstore, Lang Suan District, Chumporn Province. The actual rainfall rates are also measured to compare with the radio wave measurements. The measurement results are the raw data for post processing to find the parameters used to estimate the rainfall rates. The rainfall rate estimation algorithms are established from these parameters and the actual rainfall rates by the method of minimizing the mean square error. The power-law algorithm used in this research can be divided into two forms, i.e. the single parameter and the dual parameter algorithms. The statistical parameters of all algorithms are calculated to check and compare the algorithms. Furthermore, the multiplicative adjustment factors are used to improve the performance of the algorithms. The results show that the synthetic pulse radar has better performance in rainfall estimation than the very short range radiometric system.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

ปีการศึกษา.....2542.....

ลายมือชื่อนิสิต.....*ณัฐกร*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*ชัชชาติ*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นัทรชัย ไวยำพัฒนกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทางด้านวิชาการโดยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย รวมทั้งยังให้การสนับสนุนด้านการเงิน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับงานวิจัยบางส่วนและค่าเล่าเรียนในสองภาคการศึกษาสุดท้าย นอกจากนี้ทุนวิจัยส่วนที่เหลือได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณสมศักดิ์ โทสังคะหิสากุล หัวหน้าฝ่ายวิเคราะห์ข้อมูล กรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งให้คำแนะนำเบื้องต้นเกี่ยวกับการวัดอัตราการตกของฝน และผู้อำนวยการฝ่ายกองช่างเครื่องมือ กรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์เจ้าหน้าที่กระบอกตวงแก้วสำหรับวัดอัตราการตกของฝน

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนิสิต ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งอนุญาตให้ใช้พื้นที่ติดตั้งอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า รวมทั้งอำนวยความสะดวกตลอดการวิจัย และคุณสมชาย รัตนจินดา ซึ่งให้ความอนุเคราะห์พื้นที่ติดตั้งบ้านแก๊สสำหรับดำเนินการวิจัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ บิดา มารดา ซึ่งได้ให้การสนับสนุนด้านการเงิน ค่าปรึกษา และกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งพี่ๆ และเพื่อนๆ ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ความช่วยเหลือทั้งร่างกายแรงใจจนงานวิจัยสำเร็จด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ตม
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความนำทั่วไป.....	1
การเกิดฝนและลักษณะทางกายภาพของฝน.....	1
การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่.....	2
เค้าโครงวิทยานิพนธ์.....	4
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	5
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	5
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	5
บทที่ 2 การวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการสะท้อน.....	6
ความนำทั่วไป.....	6
หลักการและทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการสะท้อน.....	7
1. ระบบเรดาร์แบบพัลส์ (pulse radar system).....	7
2. ระบบเรดาร์ชนิดพิเศษ (advanced radar system).....	9
2.1 เรดาร์โพลาไรเซชัน (polarisation radar).....	9
2.2 เรดาร์สองความถี่ (dual-frequency radar).....	12
การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์.....	15
1. หลักการและทฤษฎีของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์.....	15
2. ระบบเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	19
3. วิธีการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์.....	21
4. ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน.....	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ผลการวัด.....	24
1. ผลการวัดอัตราการตกของฝนด้วยถังวัดน้ำฝน.....	24
2. ผลการวัดด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์.....	25
2.1 กรณีอากาศปลอดโปร่ง (clear-air event).....	25
2.2 กรณีฝนตก (rainfall event).....	34
การหาและตรวจสอบขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน.....	37
1. ผลการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน.....	38
1.1 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว.....	38
1.2 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว.....	39
2. การตรวจสอบขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน.....	41
การหาตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน.....	49
การใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเฉพาะช่วง.....	53
สรุป.....	55
บทที่ 3 การวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการส่งผ่าน.....	57
ความน่าทัวไป.....	57
หลักการและทฤษฎีของการวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการส่งผ่าน.....	59
1. ระบบมาตรวิทยแบบดั้งเดิม.....	59
2. ระบบมาตรวิทยชนิดพิเศษ.....	61
2.1 ระบบมาตรวิทยโพลาไรเซชัน.....	61
2.2 ระบบมาตรวิทยที่ใช้คลื่นหลายความถี่.....	62
การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยระบบมาตรวิทยระยะใกล้มาก.....	63
1. หลักการของระบบมาตรวิทยระยะใกล้มาก.....	63
2. ระบบมาตรวิทยระยะใกล้มากและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	64
3. วิธีการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยระบบมาตรวิทยระยะใกล้มาก.....	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ผลการวัด.....	68
1. ผลการวัดอัตราการตกของฝนด้วยถังวัดน้ำฝน.....	68
2. ผลการวัดอัตราการตกของฝนด้วยระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มาก.....	69
ผลการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน.....	75
1. ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว.....	75
2. ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว.....	76
การตรวจสอบขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน.....	76
สรุป.....	83
บทที่ 4 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์	
และระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มาก.....	85
การเปรียบเทียบเชิงระบบ.....	85
1. วิธีการวัด.....	85
1.1 ผลกระทบของมิวชวลคัปปลิงระหว่างสายอากาศส่งและรับ.....	85
1.2 ผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนจากพื้นดิน.....	86
2. ทรัพยากรที่ใช้.....	89
3. การประมวลผลสัญญาณ.....	89
การเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝน.....	91
สรุป.....	99
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	100
สรุปผลการวิจัย.....	100
ข้อเสนอแนะ.....	102
รายการอ้างอิง.....	103
ประวัติผู้เขียน.....	106

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	รายละเอียดเกี่ยวกับระบบเรดาร์พัลส์สังเคราะห์.....	20
ตารางที่ 2.2	ค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์.....	22
ตารางที่ 2.3	สรุปข้อมูลอัตราการตกของฝนที่วัดจากถังวัดน้ำฝน (อัตราการตกของฝนที่แท้จริง).....	24
ตารางที่ 2.4	ค่าทางสถิติของค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ (ในหน่วย dB) ในกรณีอากาศปลอดโปร่ง.....	33
ตารางที่ 2.5	ค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ (ในหน่วย dB) สำหรับวันที่ 7 และ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2541.....	37
ตารางที่ 2.6	ผลการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว.....	38
ตารางที่ 2.7	ผลการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว.....	39
ตารางที่ 2.8	ค่าทางสถิติสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว.....	43
ตารางที่ 2.9	ค่าทางสถิติสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว.....	44
ตารางที่ 2.10	เปรียบเทียบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ไม่ใช้และใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณ.....	51
ตารางที่ 2.11	สมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณเฉพาะช่วง.....	54
ตารางที่ 3.1	รายละเอียดของระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก.....	65
ตารางที่ 3.2	ค่าปัจจัยของระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก.....	67
ตารางที่ 3.3	สรุปข้อมูลอัตราการตกของฝนที่วัดจากถังวัดน้ำฝน (อัตราการตกของฝนที่แท้จริง).....	68
ตารางที่ 3.4	ค่าทางสถิติของการลดทอนและการเลื่อนเฟสจากผลการวัดในวัดที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2541.....	72
ตารางที่ 3.5	ผลการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว.....	75
ตารางที่ 3.6	ผลการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว.....	76
ตารางที่ 3.7	ค่าทางสถิติสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว.....	77
ตารางที่ 3.8	ค่าทางสถิติสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว.....	77
ตารางที่ 3.9	เปรียบเทียบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ไม่ใช้และใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณ.....	80
ตารางที่ 3.10	สมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณเฉพาะช่วง.....	82

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.1 ความแตกต่างระหว่างขนาดของสัญญาณที่รับได้ในเส้นทางตรงกับเส้นทางที่สะท้อน จากพื้นดิน.....	87
ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดินที่เปียกน้ำ.....	88
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนที่แท้จริงสำหรับระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก.....	91
ตารางที่ 5.1 สรุปขั้นตอนวิธีที่ดีที่สุดที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน.....	101

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	ถังวัดปริมาณน้ำฝนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว.....	3
รูปที่ 1.2	กระบอกตวงแก้วสำหรับวัดปริมาณน้ำฝน.....	3
รูปที่ 2.1	ระบบเรดาร์สำหรับวัดอัตราการตกของฝน.....	8
รูปที่ 2.2	ปรากฏการณ์การเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝน 1 อนุภาค.....	10
รูปที่ 2.3	ลักษณะของสัญญาณเชิงความถี่และสัญญาณเชิงเวลาที่ได้จากการแปลงกลับฟูรีเยร์.....	16
รูปที่ 2.4	ปริมาตรครอบคลุมโดยลำคลื่นของสายอากาศ.....	18
รูปที่ 2.5	ระบบเรดาร์พัลส์สังเคราะห์สำหรับวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่.....	20
รูปที่ 2.6	แผนภาพการประมวลผลสัญญาณของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์.....	21
รูปที่ 2.7	การกระจายของอัตราการตกของฝนที่วัดจากถังวัดน้ำฝน.....	25
รูปที่ 2.8	ผลการวัดกรณีอากาศปลอดโปร่งสำหรับคูโพลาริเซชัน HH ในวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2541.....	26
รูปที่ 2.9	ผลการวัดกรณีอากาศปลอดโปร่งสำหรับคูโพลาริเซชัน HH ในวันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2541.....	27
รูปที่ 2.10	ค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์สำหรับกรณีอากาศปลอดโปร่ง ในวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2541.....	29
รูปที่ 2.11	ค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์สำหรับกรณีอากาศปลอดโปร่ง ในวันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2541.....	31
รูปที่ 2.12	สัญญาณเชิงตำแหน่งสำหรับแต่ละคูโพลาริเซชัน ในวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2541.....	35
รูปที่ 2.13	สัญญาณเชิงตำแหน่งสำหรับแต่ละคูโพลาริเซชัน ในวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2541.....	36
รูปที่ 2.14	กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝน ที่แท้จริงสำหรับขั้นตอนวิธี R-Qvv40M-DWRvv40M.....	46
รูปที่ 2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ ค่าปัจจัยตัวเดียว.....	47
รูปที่ 2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ ค่าปัจจัยสองตัว.....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว.....	50
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว.....	51
รูปที่ 2.19 กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝน ที่แท้จริงสำหรับขั้นตอนวิธี R-DWRhh40M ในกรณีที่ไม่ใช้ (x) และใช้ (o) ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ.....	52
รูปที่ 2.20 กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝน ที่แท้จริงสำหรับขั้นตอนวิธี R-Qhh40M-DWRhh40M ในกรณีที่ไม่ใช้ (x) และใช้ (o) ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ.....	53
รูปที่ 3.1 หลักการของระบบมาตรวิทยุสำหรับวัดอัตราการตกของฝน.....	60
รูปที่ 3.2 ระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากสำหรับวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่.....	64
รูปที่ 3.3 การกระจายอัตราการตกของฝนที่วัดจากถึงวัดน้ำฝน.....	69
รูปที่ 3.4 ผลการวัดด้วยระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากในวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2541.....	70
รูปที่ 3.5 การลดทอนและการเลื่อนเฟสของผลการวัดในวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2541.....	71
รูปที่ 3.6 ผลการวัดขนาดและเฟสของสัญญาณที่รับได้ในขณะอากาศปลอดโปร่งในวันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2541.....	74
รูปที่ 3.7 กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝน ที่แท้จริงสำหรับขั้นตอนวิธี R- ϕ dr ที่ไม่ใช้ (x) และใช้ (o) ตัวประกอบปรับแต่ง แบบคูณ.....	79
รูปที่ 3.8 กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝน ที่แท้จริงสำหรับขั้นตอนวิธี R-TBvv ที่ไม่ใช้ (x) และใช้ (o) ตัวประกอบปรับแต่ง แบบคูณ.....	79
รูปที่ 3.9 กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝน ที่แท้จริงสำหรับขั้นตอนวิธี R-TBvv-TBvh ที่ไม่ใช้ (x) และใช้ (o) ตัวประกอบปรับแต่ง แบบคูณ.....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1	มิวซลคัปปลิงที่เกิดขึ้นระหว่างสายอากาศส่งและรับ.....	86
รูปที่ 4.2	ผลกระทบจากคลื่นที่สะท้อนจากพื้นดิน.....	87
รูปที่ 4.3	ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการรบกวนบางความถี่ของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์.....	90
รูปที่ 4.4	เปรียบเทียบการกระจายอัตรากการตกของฝนที่แท้จริง.....	92
รูปที่ 4.5	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวซึ่งไม่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณ.....	93
รูปที่ 4.6	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวซึ่งใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณเฉพาะช่วง.....	94
รูปที่ 4.7	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวซึ่งไม่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณ.....	95
รูปที่ 4.8	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวซึ่งใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณเฉพาะช่วง.....	96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

β	ค่าคงที่ของระบบเรดาร์
λ	ความยาวคลื่น
τ	ความกว้างพัลส์
ϕ	ความกว้างลำคลื่นในระนาบระดับ (horizontal plane)
θ	ความกว้างลำคลื่นในระนาบยก (elevation plane)
σ_{Err}	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อน
$\bar{\phi}$	ปริมาณการเลื่อนเฟสเฉลี่ยเชิงเวลา
\bar{A}	ปริมาณการลดทอนเฉลี่ยเชิงเวลา
BW	ความกว้างแถบของสัญญาณเชิงความถี่
$CORR$	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
DWR	อัตราส่วนความยาวคลื่นคู่
Err	ความคลาดเคลื่อน
F	ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ
ME	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย
MSE	กำลังสองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย
G	อัตราขยายของสายอากาศ
P_r	กำลังที่รับได้
P_t	กำลังที่ส่งออกไป
Q	ค่าปัจจัย Q
R	อัตราการตกของฝน
TB	อุณหภูมิความสว่าง
\bar{T}	อุณหภูมิเฉลี่ย
α_a	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนกำลังคลื่นเนื่องจากฝน
Z	ตัวประกอบสภาพสะท้อนของเรดาร์
c	ความเร็วคลื่นในอวกาศว่าง
$k(s)$	ฟังก์ชันการลดทอนจำเพาะเนื่องจากฝน
r	ระยะทาง
t	เวลา



บทที่ 1

บทนำ

ความนำทั่วไป

ฝนเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นอยู่เสมอและมีอิทธิพลต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ สำหรับในประเทศไทยมีฝนตกชุกเกือบตลอดทั้งปี ซึ่งมีอิทธิพลต่อกิจการต่างๆ เช่น เกษตรกรรม วิศวกรรม และการขนส่ง เป็นต้น การที่สามารถทราบปริมาณการตกของฝนไม่ว่าจะอยู่ในรูปปริมาณน้ำฝนตลอดวันหรืออัตราการตกของฝนในขณะใดๆ จะเป็นประโยชน์ในกิจการต่างๆ เหล่านี้ นอกจากนี้หากสามารถทราบปริมาณการตกของฝนอย่างถูกต้องและรวดเร็วแล้ว จะทำให้การทำงานของระบบเตือนภัยน้ำท่วมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

ปริมาณการตกของฝนที่นิยามวัด คือ ปริมาณน้ำฝนตลอดวัน ทั้งนี้เนื่องจกง่ายต่อการวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ยุ่งยาก ปริมาณน้ำฝนตลอดวันจะบอกเป็นความสูงของระดับน้ำฝน (หน่วยเป็นมิลลิเมตรหรือนิ้ว) ที่อยู่ในภาชนะรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน ส่วนปริมาณการตกของฝนอีกอย่างหนึ่ง ได้แก่ อัตราการตกของฝนขณะใดๆ จะมีความยุ่งยากในการวัดและอุปกรณ์มากกว่า อย่างไรก็ตามการทราบอัตราการตกของฝนขณะใดๆ สามารถใช้หาปริมาณน้ำฝนตลอดวันได้เช่นกัน โดยทั่วไปอัตราการตกของฝนขณะใดๆ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อชั่วโมงหรือนิ้วต่อชั่วโมง

การเกิดฝนและลักษณะทางกายภาพของฝน

ฝนเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติซึ่งเกิดจากไอน้ำที่อยู่ในบรรยากาศ และเกิดจากกระบวนการ 2 กระบวนการ ได้แก่ (H. Sauvageot 1992)

1. การควบแน่น (condensation) เมื่อไอน้ำผ่านกระบวนการควบแน่นจะกลายเป็นเม็ดเมฆ (cloud droplets) ซึ่งเป็นการเริ่มต้นของการเกิดฝน โดยเกิดขึ้นได้สองแนวทาง คือการเกิดฝนโดยทางตรง ได้แก่ การที่เม็ดเมฆรวมกันเข้าจนมีน้ำหนักมากขึ้นตกลงมาในชั้นบรรยากาศที่ต่ำลง เมื่อปะทะกับอุณหภูมิต่ำขึ้นเม็ดเมฆจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำกลายเป็นฝนในที่สุด และการเกิดฝนโดยทางอ้อม ได้แก่ เม็ดเมฆกลายเป็นเกล็ดน้ำแข็งโดยผ่านกระบวนการแข็งตัวแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous freezing) เกล็ดน้ำแข็งเหล่านี้ก็จะรวมตัวกันเข้าจนน้ำหนักมากขึ้นและตกลงมายังบรรยากาศชั้นที่ต่ำลงซึ่งมีอุณหภูมิต่ำขึ้น ทำให้เกล็ดน้ำแข็งละลายกลายเป็นฝน

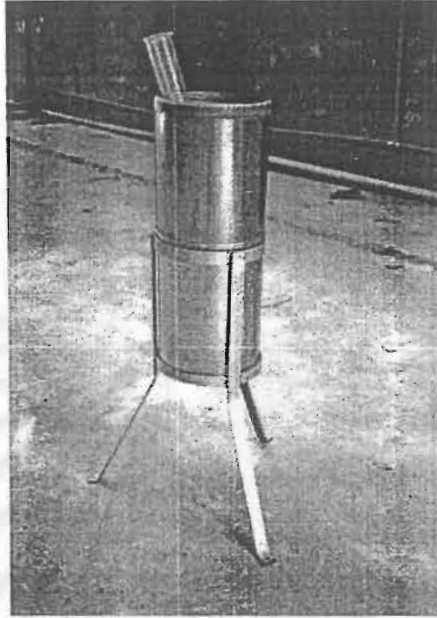
2. การตกผลึก (deposition) เมื่อไอน้ำมีการแข็งตัวและตกผลึกกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง (ice crystals) และเมื่อมีการตกผลึกอีกครั้งหนึ่งกลายเป็นผลึกหิมะ (snow crystals) หลังจากนั้นเมื่อผลึกหิมะนี้รวมกันจนมีน้ำหนักมากขึ้น ตกลงมาปะทะกับชั้นบรรยากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูงขึ้น ผลึกหิมะเหล่านี้จะละลายกลายเป็นฝน

สำหรับฝนแต่ละอนุภาคนั้น มีลักษณะทางกายภาพที่สำคัญ 4 ประการ ได้แก่

1. ขนาดและรูปร่าง (size and shape) ฝนแต่ละอนุภาคมีรูปร่างแตกต่างกันขึ้นกับขนาดของอนุภาคฝนเอง โดยที่อนุภาคฝนที่มีขนาดเล็กจะมีรูปร่างค่อนข้างเป็นทรงกลม ส่วนอนุภาคฝนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีรูปร่างเป็นทรงกลมแบนหัว คือมีลักษณะแบนที่ฐานของทรงกลมด้านใดด้านหนึ่ง
2. ความเร็วปลายในการตก (terminal fall velocity) ฝนจะมีความเร็วปลายในการตกคงที่ และฝนขนาดต่างกัน จะมีความเร็วปลายในการตกต่างกันด้วย โดยฝนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะมีความเร็วปลายในการตกสูงกว่าฝนที่มีอนุภาคขนาดเล็ก
3. การกระจายของขนาดอนุภาคฝน (drop size distribution) เป็นลักษณะทางกายภาพของฝน ซึ่งขึ้นกับพื้นที่แต่ละแห่งและอัตราการตกของฝน โดยทั่วไปเมื่ออัตราการตกของฝนสูงกว่า 20 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง มักจะประมาณการกระจายของขนาดอนุภาคฝนเป็นการกระจายแบบลอว์และพาร์สันส์ (Law and Parsons distribution) (D. C. Hogg, 1989) อย่างไรก็ตาม การหาการกระจายขนาดอนุภาคฝนที่แท้จริงกระทำได้อย่างเนื่องจากการกระจายของอนุภาคฝนมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา
4. แนวการวางตัวของอนุภาคฝน (rain drop alignment) สมบัติทางกายภาพของฝนนี้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูงเนื่องจากผลของลม กล่าวคือ เมื่อมีลมพัดทำให้แนวการวางตัวของอนุภาคฝนเปลี่ยนไป ทำให้เกิดมุมเอียงเชิงกายภาพขึ้น มุมเอียงเชิงกายภาพนี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นเนื่องจากฝนนั่นเอง

การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่

การวัดปริมาณน้ำฝนกระทำโดยใช้อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน (rain gauge) ซึ่งมีลักษณะเป็นถังรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 หรือ 8 นิ้ว และมีกรวยต่อลงไปยังภาชนะทรงกระบอกที่อยู่ภายในอีกชั้นหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และเมื่อต้องการวัดปริมาณน้ำฝน ก็จะเทน้ำฝนที่อยู่ในภาชนะทรงกระบอกลงในกระบอกตวง แก้วสำหรับวัดปริมาณน้ำฝนซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 1.2 ลักษณะการวัดปริมาณน้ำฝนโดยใช้ถังวัดปริมาณน้ำฝนนี้เป็น การวัดอัตราการตกของฝนแบบเฉพาะที่นั่นเอง



รูปที่ 1.1 ถังวัดปริมาณน้ำฝนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว



รูปที่ 1.2 กระจกบอกตวงแก้วสำหรับวัดปริมาณน้ำฝน

สำหรับการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยถังวัดปริมาณน้ำฝนนั้น เป็นการพัฒนาดังวัดปริมาณน้ำฝนให้มีความสามารถในการบอกอัตราการตกของฝนได้ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. ถังวัดปริมาณน้ำฝนแบบกราฟ ถังวัดปริมาณน้ำฝนแบบนี้จะมีปากกาสำหรับเขียนกราฟต่อกับอุปกรณ์เซนเซอร์ (sensor) ที่อยู่ในถังวัดปริมาณน้ำฝนแบบธรรมดา เมื่อน้ำฝนไหลเข้าไปในถัง ทำให้ระดับน้ำสูงขึ้น เซนเซอร์จะทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปยังปากกาเขียนกราฟ ซึ่งจะเขียนกราฟบนกระดาษต่อเนื่องตลอดเวลา เมื่อต้องการทราบอัตราการตกของฝน สามารถกระทำได้โดยคำนวณจากความชันของกราฟนั่นเอง
2. ถังวัดปริมาณน้ำฝนแบบพัลส์ ถังวัดปริมาณน้ำฝนแบบนี้จะมีอุปกรณ์เซนเซอร์ซึ่งตรวจจับน้ำหนักของน้ำฝนที่ตกลงมาในถัง เมื่อน้ำหนักของน้ำฝนเทียบเท่ากับน้ำฝนปริมาณหนึ่งแล้ว (0.1-0.5 มิลลิเมตร ขึ้นกับความละเอียดของเครื่องมือวัด) ก็จะส่งสัญญาณพัลส์ไป 1 ครั้ง ดังนั้นการที่จะทราบอัตราการตกของฝนจะต้องมีวงจรถ่ายเวลาและวงจรรับจำนวนพัลส์

ในงานวิจัยนี้นำเสนอการใช้คลื่นวิทยุในการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ ข้อได้เปรียบของการวัดอัตราการตกของฝนด้วยคลื่นวิทยุ คือมีความรวดเร็วในการบอกอัตราการตกสูง และมีความละเอียดเชิงเวลาที่สูงกว่าการใช้ถังวัดปริมาณน้ำฝน ทำให้ได้ข้อมูลอัตราการตกของฝนในขณะใดขณะหนึ่ง ซึ่งเป็นประโยชน์ในระบบเตือนภัยน้ำท่วมเป็นอย่างดี

เค้าโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยคลื่นวิทยุ วิธีการวัดอัตราการตกของฝนที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็นสองวิธี ได้แก่ เรดาร์พัลส์สังเคราะห์ (synthetic pulse radar) ซึ่งเป็นการวัดการสะท้อนและระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก (very short range radiometer) ซึ่งเป็นการวัดการส่งผ่าน ในบทที่ 2 และ 3 ของวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่แบบสะท้อนและแบบส่งผ่านตามลำดับ โดยแสดงทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของวิธีการวัด วิธีการวัดที่ใช้ในงานวิจัย ผลการวัด รวมทั้งการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนและการตรวจสอบขั้นตอนวิธีที่ทำได้ ส่วนในบทที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ทั้งแบบสะท้อนและแบบส่งผ่านที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 2 และ 3 และในบทที่ 5 ซึ่งเป็นบทสรุปเกี่ยวกับการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยคลื่นวิทยุทั้งหมดและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ และระบบมาตรวิทยุระยะไกล้มาก
2. เพื่อเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีต่างๆ และหาขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมสำหรับระบุอัตราการตกของฝน

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและสร้างระบบวัดอัตราการตกของฝนด้วยระบบเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะไกล้มาก
2. ดำเนินการวัด ณ บริเวณดาดฟ้าอาคารวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. วิเคราะห์ข้อมูลที่วัดได้ เพื่อเปรียบเทียบและหาขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมสำหรับระบุอัตราการตกของฝน

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาวิธีวัดอัตราการตกของฝน และออกแบบระบบวัดอัตราการตกของฝนด้วยระบบเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะไกล้มาก
2. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่จะใช้ในภาคสนาม
3. ดำเนินการเก็บข้อมูลจากบริเวณดาดฟ้าอาคารวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. วิเคราะห์ข้อมูลที่วัดได้ และเปรียบเทียบขั้นตอนวิธี รวมทั้งหาขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมเพื่อใช้ระบุอัตราการตกของฝน
5. สรุปงานวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยระบบเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ และระบบมาตรวิทยุระยะไกล้มาก
2. ขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมเพื่อใช้ระบุอัตราการตกของฝนในประเทศไทย

บทที่ 2

การวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการสะท้อน

ความนำทั่วไป

ฝนเป็นหยดน้ำขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่ในบรรยากาศอย่างไม่เป็นระเบียบเป็นจำนวนมาก สมบัติความเป็นไดอิเล็กทริกของน้ำฝนทำให้สามารถสะท้อนคลื่นวิทยุได้ และความสามารถสะท้อนคลื่นวิทยุของฝนจะขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของฝน ได้แก่ ขนาดของหยดน้ำฝน การกระจายขนาดของหยดน้ำฝน ความเร็วปลายในการตกของฝน ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้เป็นตัวกำหนดอัตราการตกของฝนนั่นเอง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้คลื่นวิทยุในย่านความถี่ที่เหมาะสมเพื่อวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการสะท้อนได้

เรดาร์เป็นระบบตรวจจับและหาตำแหน่งของวัตถุด้วยคลื่นวิทยุโดยอาศัยการวัดการสะท้อน วิธีการนี้เริ่มมีการวิจัยและพัฒนามาตั้งแต่ ค.ศ. 1938 ระบบเรดาร์อุตุนิยมวิทยาได้รับการคิดค้นขึ้นตั้งแต่ ค.ศ. 1941 (Sauvageot, 1992) ต่อจากนั้นระบบเรดาร์อุตุนิยมวิทยาก็ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งในส่วนของระบบสายอากาศ เครื่องส่ง เครื่องรับ การใช้ความถี่ รวมทั้งกรรมวิธีในการประมวลผล สำหรับระบบเรดาร์เพื่อตรวจจับฝนก็มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเช่นกัน โดยทั่วไปการศึกษาเพื่อหาและเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีต่างๆ ที่ใช้บอกอัตราการตกของฝนนั้นสามารถกระทำได้ 2 แนวทาง คือการจำลองเหตุการณ์การตกของฝนและการวัดด้วยระบบเรดาร์โดยตรง หรืออาจทำทั้งสองแนวทางควบคู่กันไป นอกจากนี้การหาและเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีต่างๆ ที่ใช้บอกอัตราการตกของฝนจำเป็นต้องกระทำในแต่ละพื้นที่ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของฝนมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่นั่นเอง

การศึกษาเพื่อหาและเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีต่างๆ ที่ใช้บอกอัตราการตกของฝนด้วยระบบเรดาร์นั้นมีผู้ศึกษาวิจัยอย่างมากมาย อาทิ Bringi, Chandrasekar, Meischner et al. (1991) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเรดาร์ที่ใช้คุณสมบัติของโพลาไรเซชันของคลื่น โดยศึกษาลักษณะการจำลองการกระจายขนาดของอนุภาคฝนเป็นแบบแกมมา เพื่อคำนวณค่าปัจจัยเกี่ยวกับโพลาไรเซชันของคลื่น รวมทั้งใช้ข้อมูลจากระบบเรดาร์อุตุนิยมวิทยา 3 ระบบ ได้แก่ CP-2 RADAR, Cimarron RADAR และ POLDIRAD เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองผลการเปรียบเทียบ แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของผลการจำลองกับผลการวัดเป็นอย่างดี และ Galati, Gorgucci, Naldi et al. (1995) ได้จำลองการกระจายขนาดของอนุภาคฝนเป็นแบบแกมมา และศึกษาเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการบอกอัตราการตกของฝน 2 ขั้นตอนวิธี คือ ขั้นตอนวิธีที่ใช้ตัวประกอบสภาพสะท้อน (reflectivity factor) และ ขั้นตอนวิธีที่ใช้ผลต่างของการเลื่อนเฟสจำเพาะ (specific differential phase shift) ซึ่งผลของการคำนวณเชิงเลขสำหรับคลื่น 3 ย่านความถี่ คือ ย่าน S ย่าน C และย่าน X แสดงให้เห็นว่า

ขั้นตอนวิธีที่ใช้ตัวประกอบสภาพสะท้อนจะใช้ได้ดีเมื่ออัตราการตกของฝนมีค่าต่ำ ส่วนขั้นตอนวิธีที่ใช้การเลื่อนเฟสจำเพาะจะใช้ได้ดีเมื่ออัตราการตกของฝนมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ May, Keenan, Zrnica et al. (1999) ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการประมาณอัตราการตกของฝนด้วยเรดาร์ซึ่งใช้ความยาวคลื่น 5 เซนติเมตรด้วยขั้นตอนวิธีสองขั้นตอนวิธี คือขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าตัวประกอบสภาพสะท้อนและขั้นตอนวิธีที่ใช้การเลื่อนเฟสจำเพาะ โดยในงานวิจัยนี้มีการคำนึงถึงผลของการลดทอนสัญญาณและสิ่งรบกวนในระบบด้วย ผลการศึกษาพบว่าเมื่อกำจัดผลของการลดทอนสัญญาณและสิ่งรบกวนในระบบแล้ว ทำให้การประมาณอัตราการตกของฝนด้วยขั้นตอนวิธีทั้งสองแบบมีความถูกต้องดีพอสมควร โดยที่ขั้นตอนวิธีที่ใช้การเลื่อนเฟสจำเพาะมีความถูกต้องและแม่นยำกว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ตัวประกอบสภาพสะท้อน อย่างไรก็ตาม การประมาณอัตราการตกของฝนด้วยเรดาร์ยังมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น (Mingworth, 1993) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของการกระจายของหยาดน้ำฟ้า การสะท้อนจากส่วนที่ละลายจากหยาดน้ำฟ้า ส่วนพุงเกินจากหยาดน้ำฟ้าที่ตกในระดับต่ำที่ระยะไกล และผลจากสิ่งรบกวนในระบบเรดาร์ จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดระยะไกลทั้งสิ้น ดังนั้นหากระบบวัดอัตราการตกของฝนเป็นระบบขนาดเล็ก ซึ่งได้แก่ระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่จะสามารถลดความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ได้

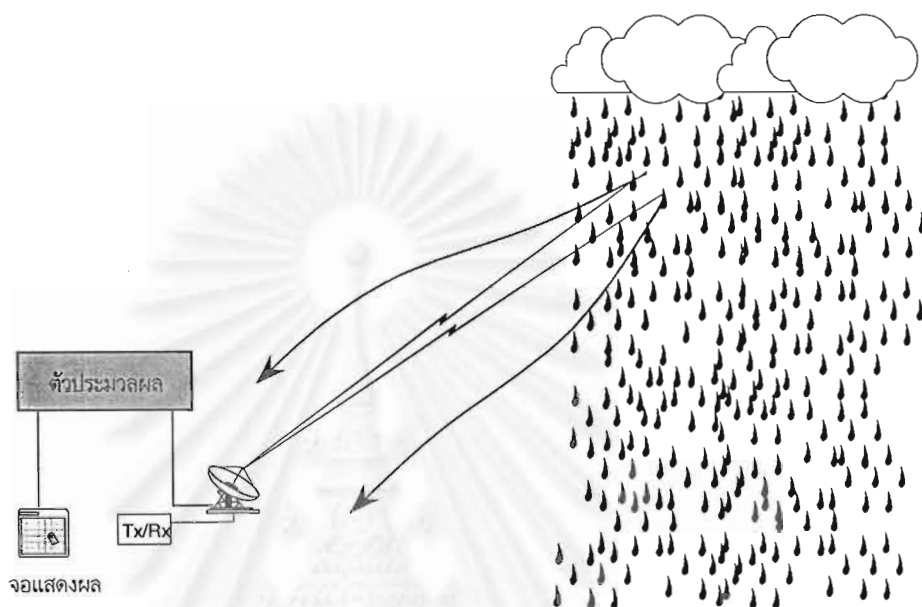
หลักการและทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดแบบสะท้อน

การวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการสะท้อน อาศัยความแตกต่างของระดับกำลังสัญญาณสะท้อนที่อัตราการตกของฝนและระยะต่างๆ เพื่อบ่งบอกหรือแยกแยะอัตราการตกของฝน ในระบบเรดาร์สำหรับวัดอัตราการตกของฝน (rain radar system) ระดับกำลังสัญญาณสะท้อนเนื่องจากฝนจะแสดงอยู่ในรูปตัวประกอบสภาพสะท้อน ดังนั้นเรดาร์สำหรับวัดอัตราการตกของฝนจึงใช้ตัวประกอบสภาพสะท้อนนี้เพื่อบ่งบอกอัตราการตกของฝน ระบบเรดาร์สำหรับวัดอัตราการตกของฝนอาจจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือระบบเรดาร์แบบพัลส์ (pulse radar system) และเรดาร์ชนิดพิเศษ (advanced radar system) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ระบบเรดาร์แบบพัลส์ (pulse radar system)

ระบบเรดาร์แบบพัลส์สามารถใช้ในการวัดอัตราการตกของฝนได้ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์กำเนิดคลื่นในรูปของพัลส์ สายอากาศส่งและรับซึ่งมักจะเป็นสายอากาศตัวเดียวกัน ระบบประมวลผลสัญญาณ และจอภาพแสดงผล หลักการทำงานของระบบเรดาร์แบบนี้คือพัลส์ที่เกิดจากอุปกรณ์กำเนิดคลื่นจะแพร่กระจายไปในบรรยากาศโดยผ่านสายอากาศส่ง เมื่อพัลส์ที่แพร่กระจายออกไปตกกระทบกับฝน จะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนหรือการกระเจิงคลื่น และจะมีพลังงานเพียงบางส่วนเท่านั้นที่กลับมาถึง

สายอากาศรับ กำลังของคลื่นที่กลับมายังสายอากาศรับจะถูกประมวลผลเพื่อหาอัตราการตกของฝน และเวลาที่คลื่นเดินทางในอากาศจะสามารถใช้คำนวณหาตำแหน่งที่เกิดฝนตกได้ และเนื่องจากสายอากาศส่งทำการส่งพัลส์ออกไปเป็นจังหวะอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถวัดอัตราการตกของฝนได้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา



รูปที่ 2.1 ระบบเรดาร์แบบพัลส์สำหรับวัดอัตราการตกของฝน

จากกำลังของสัญญาณที่สะท้อนจากฝน ความยาวคลื่น สมบัติของสายอากาศส่งและรับ และระยะจากเรดาร์ สามารถคำนวณค่าตัวประกอบสภาพสะท้อนของเรดาร์ได้ตามสมการเรดาร์อุทุนิยมวิทยา ซึ่งแสดงดังสมการ (2.1) (Serafin, 1991)

$$Z = \left(\frac{512\lambda^2}{\pi^3 |K|^2 P_r c \tau G^2 \theta \phi} \right) \times P_r \times r^2 \quad (2.1)$$

โดยที่ Z เป็นตัวประกอบสภาพสะท้อนของเรดาร์ P_r เป็นกำลังคลื่นสะท้อนเฉลี่ยในเชิงเวลาที่รับได้ r เป็นระยะจากเรดาร์ λ เป็นความยาวคลื่น $|K|^2$ เป็นค่าคงที่ขึ้นกับดัชนีหักเหของอนุภาค สำหรับอนุภาคที่เป็นหยดน้ำและความยาวคลื่นเป็นเซนติเมตร $|K|^2 \approx 0.93$ P_r เป็นกำลังที่ส่ง c เป็นความเร็วคลื่นในอวกาศว่าง τ เป็นความกว้างพัลส์ G เป็นอัตราขยายของสายอากาศ θ และ ϕ เป็นความกว้างลำคลื่นของสายอากาศในระนาบยก (elevation plane) และ ระนาบระดับ (horizontal plane) ตามลำดับ (ในที่นี้สมมติว่า ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศทั้งสองระนาบมีค่าน้อยมาก) โดยทั่วไปตัวประกอบสภาพสะท้อนมีหน่วยเป็น mm^6/m^3 หรือ dB

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบสภาพสะท้อนกับอัตราการตกของฝน มักแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์แบบกฎกำลังตามสมการ (2.2)

$$Z = aR^b \quad (2.2)$$

โดยที่ Z เป็นตัวประกอบสภาพสะท้อน (mm^6/m^3) R เป็นอัตราการตกของฝน (mm/hr) และ a กับ b เป็นค่าคงที่ขึ้นกับแต่ละขั้นตอนวิธี จากความสัมพันธ์แบบกฎกำลังนี้ทำให้สามารถใช้ตัวประกอบสภาพสะท้อนในการระบุอัตราการตกของฝนได้

ด้วยเหตุผลที่ว่าเรดาร์เป็นระบบวัดซึ่งให้ข้อมูลระยะไกล ดังนั้นจึงมีคลาดเคลื่อนในการวัดอัตราการตกของฝนค่อนข้างสูง เนื่องจากสิ่งรบกวนต่างๆ ในระบบ และอีกประการหนึ่ง คือสมการเรดาร์อุตุนิยมวิทยาตามสมการ (2.1) นั้น เป็นการพิจารณาการสะท้อนหรือการกระเจิงคลื่นเนื่องจากฝนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น สำหรับกรณีที่คลื่นแพร่กระจายเข้าไปในบริเวณที่ฝนตก จะเกิดปรากฏการณ์การกระเจิงคลื่นหลายครั้ง (multiple scattering) ขึ้น ผลของการกระเจิงคลื่นหลายครั้งนี้มิได้รวมเข้าไปในสมการเรดาร์อุตุนิยมวิทยา ทำให้การหาตัวประกอบสภาพสะท้อนมีความคลาดเคลื่อน และส่งผลไปถึงการบอกอัตราการตกของฝนด้วย จากเหตุผลดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาาระบบเรดาร์สำหรับวัดอัตราการตกของฝนให้มีความแม่นยำในการระบุอัตราการตกของฝนมากขึ้น ซึ่งก็คือระบบเรดาร์ชนิดพิเศษ (advanced radar system) นั่นเอง

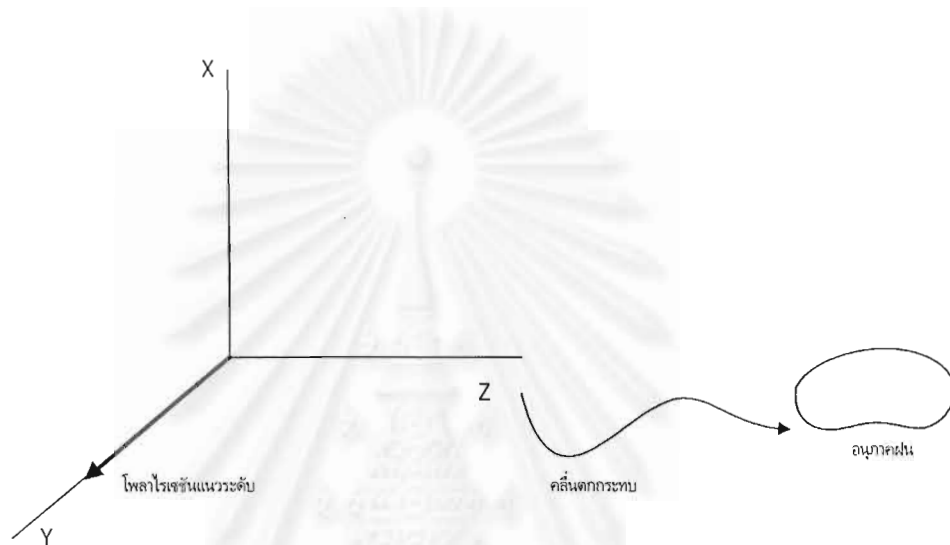
2. ระบบเรดาร์ชนิดพิเศษ (advanced radar system)

ระบบเรดาร์ชนิดพิเศษเป็นเรดาร์แบบพัลส์ซึ่งได้รับการพัฒนาให้มีสมรรถนะในการบอกอัตราการตกของฝนมากยิ่งขึ้น แนวทางการพัฒนาแบ่งได้เป็นสองแนวทาง คือ เรดาร์โพลาไรเซชันและเรดาร์สองความถี่ ซึ่งเรดาร์ทั้งสองแบบนี้มีรายละเอียดดังนี้

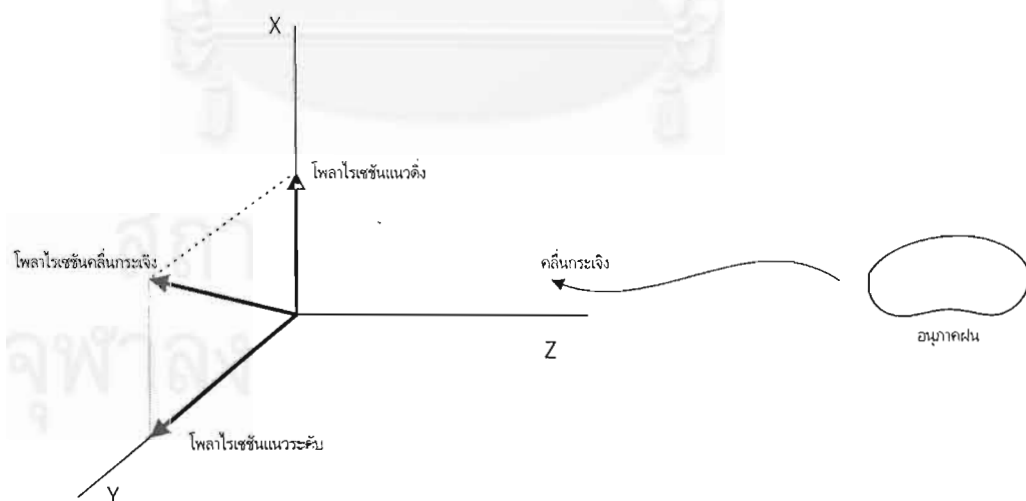
2.1 เรดาร์โพลาไรเซชัน (polarisation radar)

เมื่อคลื่นแพร่กระจายเข้าไปในฝนจะเกิดปรากฏการณ์การกระเจิงคลื่น โดยคลื่นกระเจิงจะแพร่กระจายออกไปทุกทิศทาง กำลังของคลื่นกระเจิงในแต่ละทิศทางขึ้นกับลักษณะสมบัติของตัวกระเจิง (scatterer) ซึ่งได้แก่อนุภาคฝน นอกจากคลื่นจะกระเจิงออกไปทุกทิศทางแล้วยังมีการเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นเกิดขึ้นด้วย ปรากฏการณ์การเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นนี้เกิดจากแนวการวางตัวของอนุภาคฝนที่เกิดมุมเอียงเชิงกายภาพขึ้น เมื่อพิจารณาที่สายอากาศรับคลื่นกระเจิงจะมาถึงสายอากาศรับได้จากหลายทิศทางและคลื่นที่มาถึงสายอากาศรับในแต่ละทิศทางจะมีโพลาไรเซชันเปลี่ยนไป คลื่นรวมที่สายอากาศรับจึงมักมีโพลาไรเซชันเปลี่ยนไปเสมอ

เมื่อพิจารณาคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแนวระดับ (horizontal polarisation) แพร่กระจายไปตกกระทบกับอนุภาคฝน 1 อนุภาค ดังรูปที่ 2.2 ก คลื่นที่กระเจิงออกจากฝนอนุภาคนี้ในทิศทางเดียวกับคลื่นตกกระทบ จะมีการเปลี่ยนโพลาไรเซชันไปตามรูปที่ 2.2 ข ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถพิจารณาโพลาไรเซชันของคลื่นกระเจิงเป็นสองโพลาไรเซชันที่ตั้งฉากกัน คือโพลาไรเซชันแนวระดับซึ่งเป็นโพลาไรเซชันเดียวกับคลื่นตกกระทบ และโพลาไรเซชันแนวตั้ง (vertical polarisation)



(ก) คลื่นโพลาไรเซชันแนวระดับแพร่กระจายเข้าตกกระทบอนุภาคฝน



(ข) คลื่นกระเจิงที่มีการเปลี่ยนโพลาไรเซชัน

รูปที่ 2.2 ปรัชการการณ์การเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นเนื่องจากฝน 1 อนุภาค

จากปรากฏการณ์การเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นเนื่องจากฝน ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากโพลาไรเซชันของคลื่นที่เปลี่ยนไปนี้ เป็นข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อช่วยในการบอกร่องการตกของฝนให้แม่นยำขึ้น โดยทั่วไปในระบบเรดาร์ตรวจจับฝนที่ใช้โพลาไรเซชันเดียว มักใช้โพลาไรเซชันแนวระดับเนื่องจากอนุภาคฝนมีรูปร่างเป็นทรงกลมแบนชั่ว ซึ่งจะตอบสนองกับคลื่นโพลาไรเซชันแนวระดับได้ดีกว่าคลื่นโพลาไรเซชันแนวตั้ง เมื่อมีการพัฒนาเป็นเรดาร์โพลาไรเซชัน จึงวัดคลื่นกระเจิงในโพลาไรเซชันร่วม (co-polarisation) และโพลาไรเซชันไขว้ (cross polarisation) โดยโพลาไรเซชันร่วม หมายถึง ส่งและรับคลื่นที่กระเจิงกลับมาด้วยโพลาไรเซชันแนวระดับ (HH) หรือแนวตั้ง (VV) ส่วนโพลาไรเซชันไขว้ หมายถึง ส่งคลื่นด้วยโพลาไรเซชันแนวระดับและรับคลื่นที่กระเจิงกลับมาด้วยโพลาไรเซชันแนวตั้ง (HV) หรือกลับกัน (VH)

ข้อมูลเกี่ยวกับโพลาไรเซชันที่เพิ่มขึ้นนำไปสู่ค่าปัจจัยที่ใช้ในการบอกร่องการตกของฝนที่มากขึ้น ซึ่งค่าปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ (Illingworth, 1993)

- ตัวประกอบสภาพสะท้อนในโพลาไรเซชันต่างๆ ได้แก่ Z_{HH} , Z_{VV} และ Z_{VH} ซึ่งหาได้จากสมการเรดาร์อุตุนิยมวิทยาตามสมการที่ (2.1) โดยใช้กำลังเชิงเวลาที่รับได้ (P_r) เป็นกำลังในโพลาไรเซชันต่างๆ ที่พิจารณา
- ตัวประกอบสภาพสะท้อนผลต่าง (differential reflectivity factor: Z_{DR}) คือ อัตราส่วนระหว่างตัวประกอบสภาพสะท้อนเมื่อส่งและรับคลื่นด้วยโพลาไรเซชันที่ตั้งฉากกัน ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Z_{DR}(dB) = 10 \log \left(\frac{Z_{HH}}{Z_{VV}} \right) \quad (2.3)$$

- อัตราส่วนการเปลี่ยนโพลาไรเซชันเชิงเส้น (Linear Depolarization Ratio: LDR) คือ อัตราส่วนของตัวประกอบสภาพสะท้อนเมื่อรับคลื่นด้วยโพลาไรเซชันไขว้กับโพลาไรเซชันร่วม สำหรับกรณีที่ส่งคลื่นด้วยโพลาไรเซชันแนวระดับ จะได้อัตราส่วนการเปลี่ยนโพลาไรเซชันเชิงเส้นดังนี้

$$LDR(dB) = 10 \log \left(\frac{Z_{VH}}{Z_{HH}} \right) \quad (2.4)$$

ค่าปัจจัยเหล่านี้สามารถนำมาประกอบกันเพื่อช่วยในการระบุร่องการตกของฝนให้แม่นยำขึ้นที่อัตราการตกสูงๆ ตัวอย่างขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยเกี่ยวกับโพลาไรเซชันของคลื่นเป็นไปตามสมการที่ (2.5) ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัย Z_{HH} ในหน่วย mm^6/m^3 และ Z_{HV} ในหน่วย dB ประกอบกันเป็นความสัมพันธ์แบบกำลังเพื่อใช้ในการบอกร่องการตกของฝน โดยขั้นตอนวิธีนี้ใช้ได้ดีเมื่ออัตราการตกของฝนเป็น 10-100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง (Galati, Gorgucci, Naldi et al, 1995)

$$R = aZ_{HH}^b Z_{HV}^c \quad (2.5)$$

การใช้ค่าปัจจัยเกี่ยวกับโพลาริเซชันประกอบกันเพื่อช่วยในการบอกอัตราการตกของฝน ทำให้เรดาร์แบบนี้มีสมรรถนะดีขึ้น กล่าวคือ สามารถบอกอัตราการตกของฝนได้ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าปัจจัยเกี่ยวกับโพลาริเซชันเหล่านี้ มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของอนุภาคฝนค่อนข้างสูง (Brown and Holt) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นตลอดเวลา ทำให้การวัดอัตราการตกของฝนด้วยเรดาร์โพลาริเซชันยังมีข้อผิดพลาดอันเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนจากการวัดค่าปัจจัยเกี่ยวกับโพลาริเซชันเหล่านี้

เมื่อคลื่นวิทยุแพร่กระจายเข้าไปในบริเวณฝน นอกจากจะมีการเปลี่ยนโพลาริเซชันแล้ว ยังเกิดการลดทอนอีกด้วย โดยทั่วไปการลดทอนเนื่องจากฝนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการตกของฝนสูงขึ้น และเมื่อความถี่สูงขึ้น (ความยาวคลื่นต่ำลง) ส่งผลให้การลดทอนมีค่ามากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม หากความยาวคลื่นมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคฝนมากๆ เช่น ความถี่ย่านเอสและย่านแอล การลดทอนจะมีค่าน้อยมาก ทำให้สามารถขยี้ผลของการลดทอนเนื่องจากฝนได้ ซึ่งความสัมพันธ์ของตัวประกอบสภาพสะท้อนกับกำลังที่รับได้ในกรณีทะเลผลของการลดทอนเป็นไปตามสมการ (2.1) สำหรับสมการเรดาร์อุตุนิยมวิทยาเมื่อคำนึงถึงการลดทอนจะเป็นไปตามสมการที่ (2.6) (Marzoug and Anayenc, 1991)

$$Z = \left(\frac{512\lambda^2}{\pi^3 |K|^2 P_r c \tau G^2 \theta \phi} \right) \times P_r \times r^2 \times \exp(-0.2 \ln 10 \times \int_0^r k(s) ds) \quad (2.6)$$

โดย $k(s)$ เป็นฟังก์ชันของการลดทอนกำลังคลื่นเนื่องจากฝนต่อระยะทาง หรือเรียกว่า การลดทอนจำเพาะ (specific attenuation) ดังนั้น $\int_0^r k(s) ds$ จึงเป็นการรวมการลดทอนกำลังคลื่นเนื่องจากฝนตลอดระยะทาง r นั้นเอง พจน์เอกซ์โพเนนเชียลที่เพิ่มขึ้นมาในสมการเรดาร์เป็นส่วนที่แสดงการลดทอนเนื่องจากฝนนั่นเอง ดังนั้นหากใช้เรดาร์ในย่านความถี่ที่สูงขึ้น เช่น ในย่านซี ตัวประกอบสภาพสะท้อนที่วัดได้จะรวมผลของการลดทอนไปด้วย จึงส่งผลต่อการประมาณอัตราการตกของฝนด้วยเช่นกัน

จากข้อจำกัดของเรดาร์โพลาริเซชันเหล่านี้ ทำให้มีการพัฒนาระบบเรดาร์ให้ใช้การลดทอนกำลังคลื่นเพื่อระบุอัตราการตกของฝน ซึ่งก็ได้แก่เรดาร์สองความถี่นั่นเอง

2.2 เรดาร์สองความถี่ (dual-frequency radar)

นอกจากเรดาร์โพลาริเซชันซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยในการบอกอัตราการตกของฝนให้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้นแล้ว ยังมีการพัฒนาเรดาร์ไปอีกแนวทางหนึ่ง คือเรดาร์สองความถี่ โดยอาศัยหลักการว่า ฝนมีความสามารถในการตอบสนองต่อคลื่นวิทยุในแต่ละความถี่แตกต่างกัน โดยทั่วไป การเลือกความถี่ในระบบเรดาร์สองความถี่นี้ มักเป็นความถี่ย่านที่ไม่มีการลดทอน (non-attenuating frequency) และความถี่ย่านที่มีการลดทอน (attenuating frequency) เรดาร์สองความถี่นี้อาศัยการลดทอนกำลังคลื่นเนื่องจากฝน

เพื่อช่วยในการระบุดัชนีการตกของฝน เมื่อพิจารณาสมการเรดาร์อุตุนิยมวิทยากรณีคำนึงถึงการลดทอนตามสมการ (2.6) จะเห็นได้ว่า กำลังของคลื่นสะท้อนที่รับได้ (P_r) ขึ้นกับค่าปัจจัยสองตัว คือ ตัวประกอบสภาพสะท้อนของเรดาร์ (Z) และการลดทอนกำลังคลื่นเนื่องจากฝน (k) การใช้คลื่นสองความถี่ในระบบเรดาร์เพื่อกำจัดปัจจัยตัวประกอบสภาพสะท้อนของเรดาร์ออกไป ทำให้กำลังของคลื่นสะท้อนที่รับได้ขึ้นกับการลดทอนกำลังคลื่นเนื่องจากฝนเท่านั้น การพิจารณาดังกล่าวกระทำได้ดังนี้ (Oguchi, Ishida and Ihara, 1994)

พิจารณาสมการ (2.6) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$P_r = \frac{\beta Z}{r^2} \exp(-0.2 \ln 10 \times \int_0^r k(s) ds) \quad (2.7)$$

โดย $\beta = \frac{\pi^3 |K|^2 P_r c \tau G^2 \theta \phi}{512 \lambda^2}$ เป็นค่าคงที่ขึ้นกับระบบเรดาร์

เมื่อพิจารณาเป็นเรดาร์สองความถี่ อัตราส่วนของกำลังคลื่นทั้งสองความถี่ที่รับได้ที่ระยะ r เป็นดังนี้

$$\frac{P_1(r)}{P_2(r)} = \frac{\beta_1 Z_1(r)}{\beta_2 Z_2(r)} \exp(-0.2 \ln 10 \times \int_0^r (k_1(s) - k_2(s)) ds) \quad (2.8)$$

โดยดัชนีล่าง 1 หมายถึงความถี่ที่หนึ่งซึ่งเป็นความถี่ที่ต่ำ ส่วนดัชนีล่าง 2 หมายถึงความถี่ที่สองและเป็นความถี่ที่สูงกว่า

ในทำนองเดียวกันสำหรับที่ระยะ $r + \Delta r$

$$\frac{P_1(r + \Delta r)}{P_2(r + \Delta r)} = \frac{\beta_1 Z_1(r + \Delta r)}{\beta_2 Z_2(r + \Delta r)} \exp(-0.2 \ln 10 \times \int_0^{r+\Delta r} (k_1(s) - k_2(s)) ds) \quad (2.9)$$

หาอัตราส่วนระหว่างสมการ (2.8) และสมการ (2.9) เพื่อกำจัดค่าคงที่ในระบบเรดาร์ β_1 และ β_2

$$\frac{\frac{P_1(r)}{P_2(r)}}{\frac{P_1(r + \Delta r)}{P_2(r + \Delta r)}} = \frac{\frac{Z_1(r)}{Z_2(r)}}{\frac{Z_1(r + \Delta r)}{Z_2(r + \Delta r)}} \exp(0.2 \ln 10 \times (k_1(r) - k_2(r)) \Delta r) \quad (2.10)$$

หากเลือก Δr ให้มีค่าน้อยมาก ทำให้สามารถประมาณอัตราส่วนของตัวประกอบสภาพสะท้อนให้เป็นไปตามสมการ (2.11)

$$\frac{\frac{Z_1(r)}{Z_2(r)}}{\frac{Z_1(r + \Delta r)}{Z_2(r + \Delta r)}} = \frac{Z_1(r)}{Z_2(r)} \approx 1 \quad (2.11)$$

ดังนั้นสมการ (2.10) สามารถเขียนได้เป็น

$$-10 \log \left(\frac{\frac{P_1(r)}{P_2(r)}}{\frac{P_1(r+\Delta r)}{P_2(r+\Delta r)}} \right) = -10 \log(\exp(0.2 \ln 10 \times (k_1(r) - k_2(r)) \Delta r)) \quad (2.12 \text{ ก})$$

หรือ

$$Q = -2[k_1(r) - k_2(r)]\Delta r \quad (2.12 \text{ ข})$$

จากสมการ (2.12) จะเห็นได้ว่าค่าปัจจัยคิว (Q) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังคลื่นสองความถี่ที่รับได้ที่ระยะ r และ $r + \Delta r$ ขึ้นกับผลต่างของการลดทอนจำเพาะ (specific attenuation) ของคลื่นสองความถี่ $k_1(r) - k_2(r)$ หรือถ้าพิจารณาสมการ (2.12 ข) ค่าปัจจัย Q ก็คือผลต่างของการลดทอนกำลังคลื่นสองทางในระยะ Δr นั้นเอง

เนื่องจากการลดทอนกำลังคลื่นขึ้นกับอัตราการตกของฝน ดังนั้นค่าปัจจัย Q จึงเป็นค่าปัจจัยตัวหนึ่งที่สามารถบ่งบอกอัตราการตกของฝนได้ และโดยทั่วไปการลดทอนกำลังคลื่นเนื่องจากฝนจะไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงการกระจายของอนุภาคฝนมากนัก (Brown and Holt) ดังนั้นค่าปัจจัย Q จึงเป็นค่าปัจจัยที่มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงการกระจายของอนุภาคฝนได้ดี

ค่าปัจจัย Q เป็นค่าปัจจัยซึ่งพิจารณาภายใต้เงื่อนไข 2 ประการ คือ ใช้คลื่นสองความถี่และระยะทางที่พิจารณาอย่างน้อย ทำให้สามารถกำจัดตัวประกอบสภาพสะท้อนได้ อย่างไรก็ตามหากพิจารณากำลังคลื่นที่สะท้อนกลับมาที่ระยะทางหนึ่งๆ สำหรับคลื่นทั้งสองความถี่พบว่ากำลังคลื่นทั้งสองจะมีค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นกับความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นและความสามารถในการสะท้อนคลื่นของฝนในแต่ละความถี่ ดังนั้นหากพิจารณาตัวประกอบสภาพสะท้อนจากกำลังคลื่นที่รับได้ของคลื่นทั้งสองความถี่จะไม่สามารถแยกแยะการลดทอนกำลังคลื่นออกไปได้ ตัวประกอบสภาพสะท้อนที่รวมผลของการลดทอนเข้าไปด้วยของคลื่นทั้งสองความถี่นี้สามารถนำมาประกอบกันเป็นค่าปัจจัยอีกตัวหนึ่งที่ใช้ในการบอกรัตราส่วนการตกของฝนได้เช่นกัน โดยค่าปัจจัยนี้เรียกว่า “อัตราส่วนความยาวคลื่นคู่” (dual wavelength ratio: DWR) ซึ่งมีนิยามเป็นไปตามสมการ (2.13) (Brown and Holt)

$$DWR = 10 \log \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad (2.13)$$

โดยอัตราส่วนความยาวคลื่นคู่มีหน่วยเป็น dB และตัวประกอบสภาพสะท้อนทั้งสองความถี่มีหน่วยเป็น mm^6/m^3

ค่าปัจจัยของเรดาร์สองความถี่ได้แก่ ค่าปัจจัย Q และอัตราส่วนความยาวคลื่นคู่ ช่วยให้การวัด อัตราการตกของฝนด้วยคลื่นวิทยุมีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้เรดาร์สองความถี่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับทั้งสองความถี่ ซึ่งเป็นการเพิ่มความยุ่งยากให้กับระบบ รวมทั้งเป็นการสิ้นเปลืองมากขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ ปัญหาอีกประการหนึ่งของเรดาร์สองความถี่คือความไม่เข้ากันของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้งสองความถี่ (pattern mismatch) กล่าวคือ แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้งสองความถี่มีลักษณะต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปสายอากาศใช้งานที่ความถี่สูงมักมีความกว้างลำคลื่นแคบกว่าสายอากาศที่ใช้งานที่ความถี่ต่ำ ทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณที่ครอบคลุมโดยลำคลื่นของสายอากาศทั้งสองความถี่ ปัญหาความไม่เข้ากันของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้งสองความถี่นี้เป็นปัญหาที่สำคัญและมักจะเกิดกับระบบเรดาร์สองความถี่เสมอ

การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์

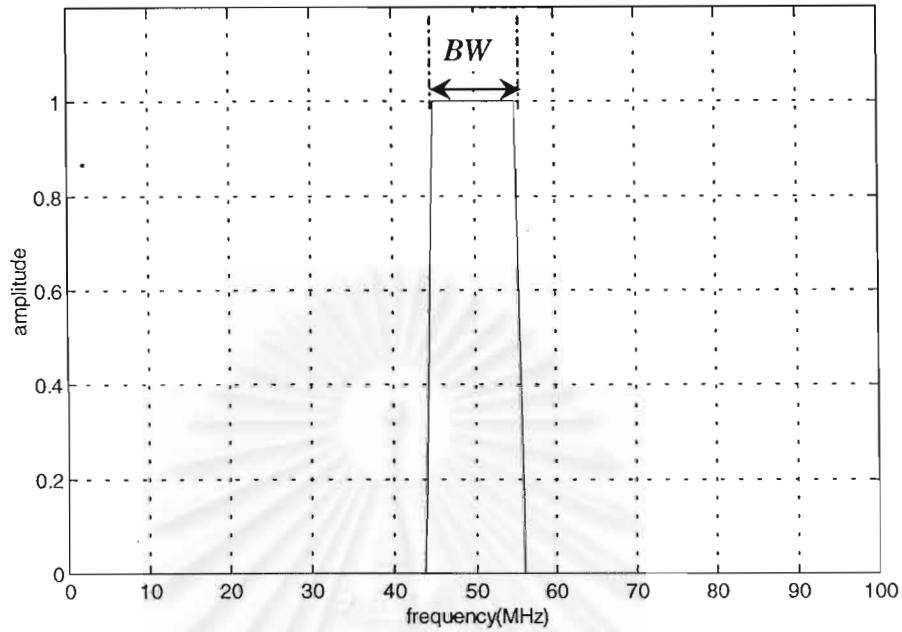
ดังที่กล่าวแล้วว่าการวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการสะท้อนนิยมใช้ระบบเรดาร์แบบพัลส์ และมีการพัฒนาให้ระบบเรดาร์มีความสามารถทางโพลาริเซชันและใช้คลื่นสองความถี่พร้อมกันเพื่อให้มีสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามทำให้ความซับซ้อนในระบบและวิธีการวัดมากขึ้นรวมทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาบางประการต่อระบบวัดเพิ่มขึ้นด้วย และเนื่องจากระบบเรดาร์เป็นการวัดข้อมูลระยะไกลจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการระบุอัตราการตกของฝน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่โดยใช้เรดาร์พัลส์สังเคราะห์ (synthetic pulse radar) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. หลักการและทฤษฎีของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์

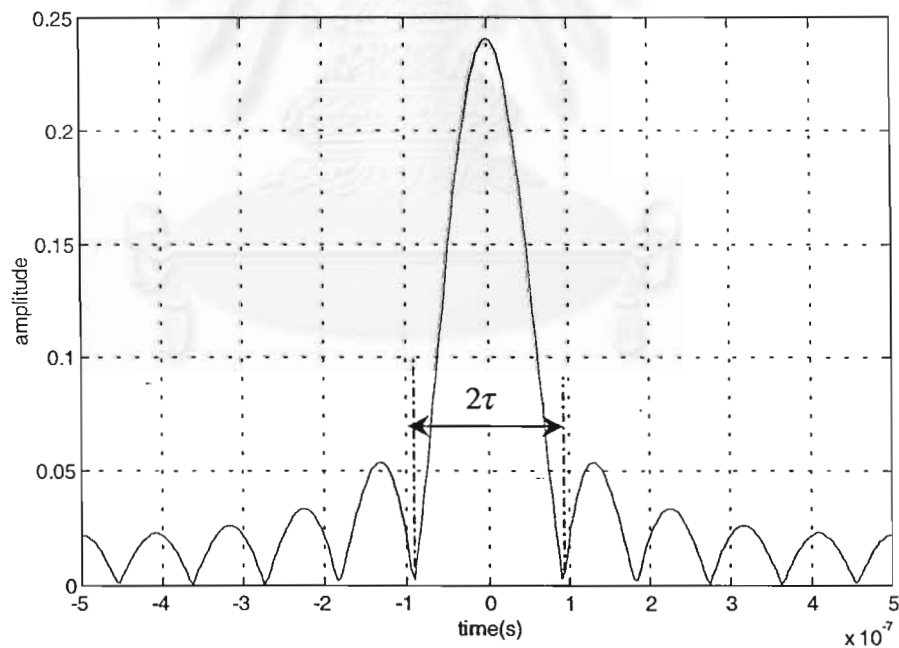
จากหลักการที่ว่าสัญญาณเชิงความถี่สามารถถูกแปลงเป็นสัญญาณเชิงเวลาได้ โดยการใช้การแปลงกลับฟูรีเยร์ (inverse Fourier transform) สำหรับกรณีที่สัญญาณเชิงความถี่มีลักษณะเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม สัญญาณเชิงเวลาที่ได้จากการแปลงกลับฟูรีเยร์จะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันซิงก์ (sinc function) นั่นคือเกิดพัลส์สังเคราะห์ขึ้นที่เวลาต่างๆ และพัลส์สังเคราะห์มีขนาดลดลงตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นระบบเรดาร์ที่ใช้หลักการแบบนี้จึงเรียกว่า เรดาร์พัลส์สังเคราะห์ (synthetic pulse radar)

ความกว้างของพัลส์สังเคราะห์ (τ) ของสัญญาณเชิงเวลา มีความสัมพันธ์กับความกว้างแถบของสัญญาณเชิงความถี่ (BW) ตามสมการ (2.14)

$$\tau = \frac{1}{BW} \quad (2.14)$$



(ก) สัญญาณเชิงความถี่ในรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีความกว้างแถบ 10 MHz



(ข) สัญญาณเชิงเวลาที่ได้จากการแปลงกลับฟูรีเยร์ของสัญญาณเชิงความถี่ในรูป (ก) รูปที่ 2.3 ลักษณะของสัญญาณเชิงความถี่และสัญญาณเชิงเวลาที่ได้จากการแปลงกลับฟูรีเยร์

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่า สัญญาณเชิงความถี่ในรูปที่ 2.3 (ก) มีความกว้างแถบ 10 MHz ส่วนสัญญาณเชิงเวลาในรูปที่ 2.3 (ข) มีความกว้างพัลส์สังเคราะห์เป็น 1×10^{-7} วินาที

จากหลักการของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์เมื่อนำมาใช้ในการวัดอัตราการตกของฝน สามารถกระทำได้โดยวัดสัญญาณที่สะท้อนจากฝนทั้งขนาดและเฟสในช่วงความถี่หนึ่ง จากนั้นแปลงสัญญาณนั้นเป็นสัญญาณเชิงเวลาโดยอาศัยการแปลงกลับฟูรีเยร์ ผลที่ได้ก็คือกำลังที่รับได้ในเชิงเวลาซึ่งจะอยู่ในรูปพัลส์ที่เวลาต่างๆ และเวลาดังกล่าวสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของระยะทางโดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการ (2.15) สำหรับเวลาที่น้อยกว่าศูนย์ไม่มีความหมายในเชิงกายภาพจึงไม่นำมาพิจารณา

$$r = \frac{ct}{2} \quad (2.15)$$

โดยที่เลข 2 หมายถึงการคิดระยะทางที่คลื่นเดินทางไปและกลับ

ดังนั้นระยะไกลสุด (r_{\max}) สำหรับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์สามารถหาได้จากเวลามากที่สุด (t_{\max}) ซึ่งขึ้นกับจำนวนจุดข้อมูลของเชิงความถี่ (M) และความกว้างพัลส์สังเคราะห์ (τ) ตามสมการ (2.16)

$$r_{\max} = \frac{ct_{\max}}{2} = \frac{c \frac{(M-1)\tau}{2}}{2} = \frac{(M-1)c\tau}{4} \quad (2.16)$$

สมการเรดาร์อุตุนิยมวิทยาสำหรับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์

เมื่อพิจารณาสมการเรดาร์อุตุนิยมวิทยาร่วมกับหลักการของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ ทำให้สามารถสร้างสมการเรดาร์อุตุนิยมวิทยาสำหรับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ที่ได้นี้

จากสมการเรดาร์อุตุนิยมวิทยา

$$Z = \left(\frac{512\lambda^2}{\pi^3 |K|^2 P_r c \tau G^2 \theta \phi} \right) \times P_r \times r^2$$

แทนค่า $\tau = \frac{1}{BW}$ จากสมการ (2.14) และ $r = \frac{ct}{2}$ จากสมการ (2.15) จะได้

$$Z = \left(\frac{128\lambda^2 c(BW)}{\pi^3 |K|^2 G^2 \theta \phi} \right) \times \frac{P_r}{P_t} \times t^2 \quad (2.17)$$

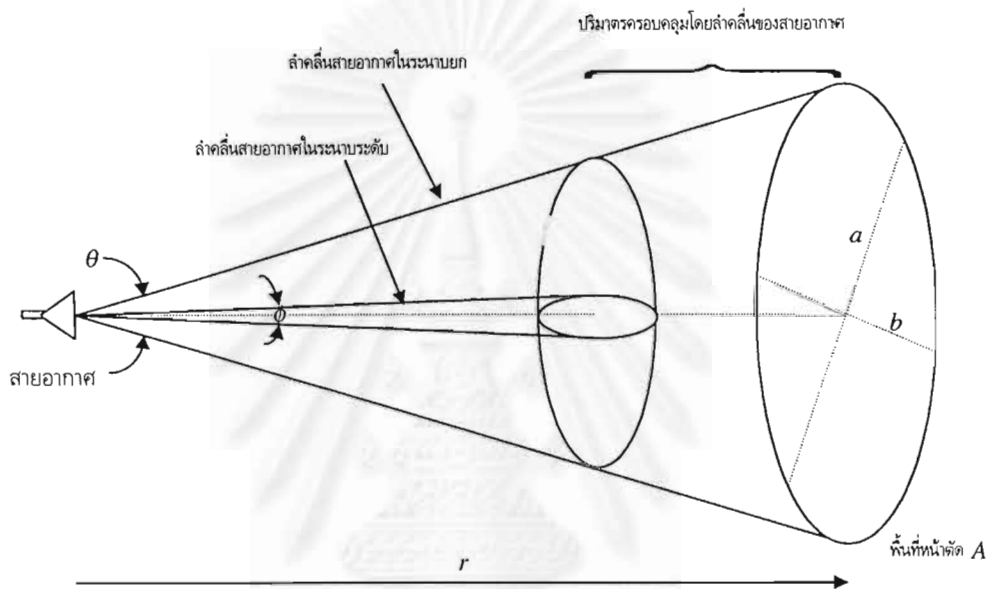
โดยความยาวคลื่น (λ) หากจากความถี่กลางของความกว้างแถบของสัญญาณเชิงความถี่ที่พิจารณา ถ้าให้

$\beta' = \left(\frac{128\lambda^2 c(BW)}{\pi^3 |K|^2 G^2 \theta \phi} \right)$ เป็นค่าคงที่ของเรดาร์ขึ้นกับสมบัติของของอุปกรณ์และค่าปัจจัยของระบบ จะได้ว่า

$$Z = \beta' \times \frac{P_r}{P_t} \times t^2 \quad (2.18)$$

สมการเรดาร์อุตุนิยมวิทยาสำหรับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ในกรณีที่ความกว้างลำคลื่นสายอากาศมีค่ามาก

สมการ (2.17) เป็นสมการเรดาร์อุตุนิยมวิทยาสำหรับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ภายใต้ข้อสมมติที่ว่าสายอากาศที่ใช้มีความกว้างลำคลื่นที่แคบมาก ซึ่งความกว้างลำคลื่นของสายอากาศเป็นตัวกำหนดปริมาตรครอบคลุมของเรดาร์นั่นเอง



รูปที่ 2.4 ปริมาตรครอบคลุมโดยลำคลื่นของสายอากาศ

จากรูปที่ 2.4 ปริมาตรครอบคลุมของลำคลื่นจากสายอากาศกำหนดด้วยพื้นที่หน้าตัดของลำคลื่นสายอากาศและความกว้างพัลส์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$V = A \times \frac{c\tau}{2} \quad (2.19)$$

โดยที่ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของลำคลื่นสายอากาศที่ระยะ r หากพิจารณาในกรณีทั่วไป คือ ลำคลื่นของสายอากาศในระนาบยกและระนาบระดับมีค่าไม่เท่ากัน พื้นที่ดังกล่าวจึงเป็นพื้นที่วงรีนั่นเอง ทำให้สมการ (2.19) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$V = \pi ab \times \frac{c\tau}{2} = \pi \left[\left[r \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \left[r \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \right] \right] \times \frac{c\tau}{2}$$

$$V = \pi r^2 \frac{c\tau}{2} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.20)$$

สำหรับกรณีสายอากาศมีความกว้างลำคลื่นทั้งสองระนาบน้อย ทำให้สามารถประมาณได้ว่า $\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \approx \frac{\theta}{2}$

และ $\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \approx \frac{\phi}{2}$ สมการเรดาร์อุทุนิยมวิทยาที่เป็นไปตามสมการ (2.1) นั่นเอง

เมื่อใช้ปริมาตรที่ครอบคลุมโดยความกว้างลำคลื่นของสายอากาศในสมการ (2.20) แล้ว สมการเรดาร์อุทุนิยมวิทยาสำหรับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ (สมการ (2.17)) จะเป็นดังนี้

$$Z = \left(\frac{32\lambda^2 c(BW)}{\pi^3 |K|^2 G^2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \tan\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right) \times \frac{P_r}{P_t} \times t^2 \quad (2.21)$$

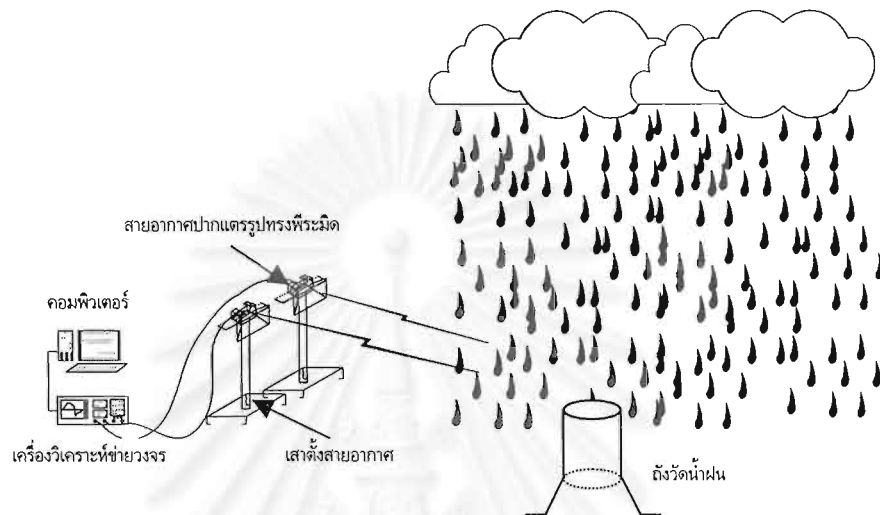
ทำให้ค่าคงที่ของระบบเรดาร์เปลี่ยนเป็น

$$\beta'' = \frac{32\lambda^2 c(BW)}{\pi^3 |K|^2 G^2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \tan\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (2.22)$$

2. ระบบเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เรดาร์พัลส์สังเคราะห์สำหรับวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีลักษณะของระบบดังรูปที่ 2.5 และรายละเอียดของระบบแสดงอยู่ในตารางที่ 2.1 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์นี้ประกอบด้วย 1.) เครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจร (network analyzer) ทำหน้าที่กำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ย่านซีปอนให้กับสายอากาศส่ง และทำหน้าที่รับคลื่นสะท้อนจากสายอากาศรับเก็บเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลต่อไป 2.) สายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด (pyramidal horn antennas) จำนวนสองตัวทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับ 3.) เสาตั้งสายอากาศได้รับการออกแบบให้สามารถปรับโพลาไรเซชันของสายอากาศเป็นโพลาไรเซชันแนวตั้งและแนวระดับได้ 4.) คอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูลจากเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจร การที่สามารถปรับโพลาไรเซชันของสายอากาศส่งและรับได้ ทำให้เรดาร์พัลส์สังเคราะห์นี้มีความสามารถทางโพลาไรเซชัน (polarisation capability) โดยที่คู่โพลาไรเซชันที่พิจารณาประกอบด้วย โพลาไรเซชันร่วม (co-polarisation) ได้แก่ กรณีที่สายอากาศส่งและรับอยู่ในโพลาไรเซชันเดียวกัน ซึ่งแบ่งได้เป็นสองกรณี คือ โพลาไรเซชันแนวตั้ง (VV) และโพลาไรเซชันแนวระดับ (HH) และโพลาไรเซชันไขว้ (cross polarisation) คือ กรณีที่สายอากาศส่งและสายอากาศรับมีโพลาไรเซชันที่ตั้งฉากกัน ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะกรณีที่สายอากาศส่งมีโพลาไรเซชันแนวตั้ง ส่วนสายอากาศรับมีโพลาไรเซชันแนวระดับ (VH)

ส่วนการวัดอัตราการตกของฝนที่แท้จริง (actual rainfall rate) กระทำโดยใช้ถังวัดน้ำฝน (rain gauge) รองรับน้ำฝนเป็นระยะเวลา 3 นาที ในแต่ละครั้งของการวัด โดยระยะเวลา 3 นาทีนี้เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ในช่วงความถี่แถบ 4070-4130 MHz



รูปที่ 2.5 ระบบเรดาร์พัลส์สังเคราะห์สำหรับวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่

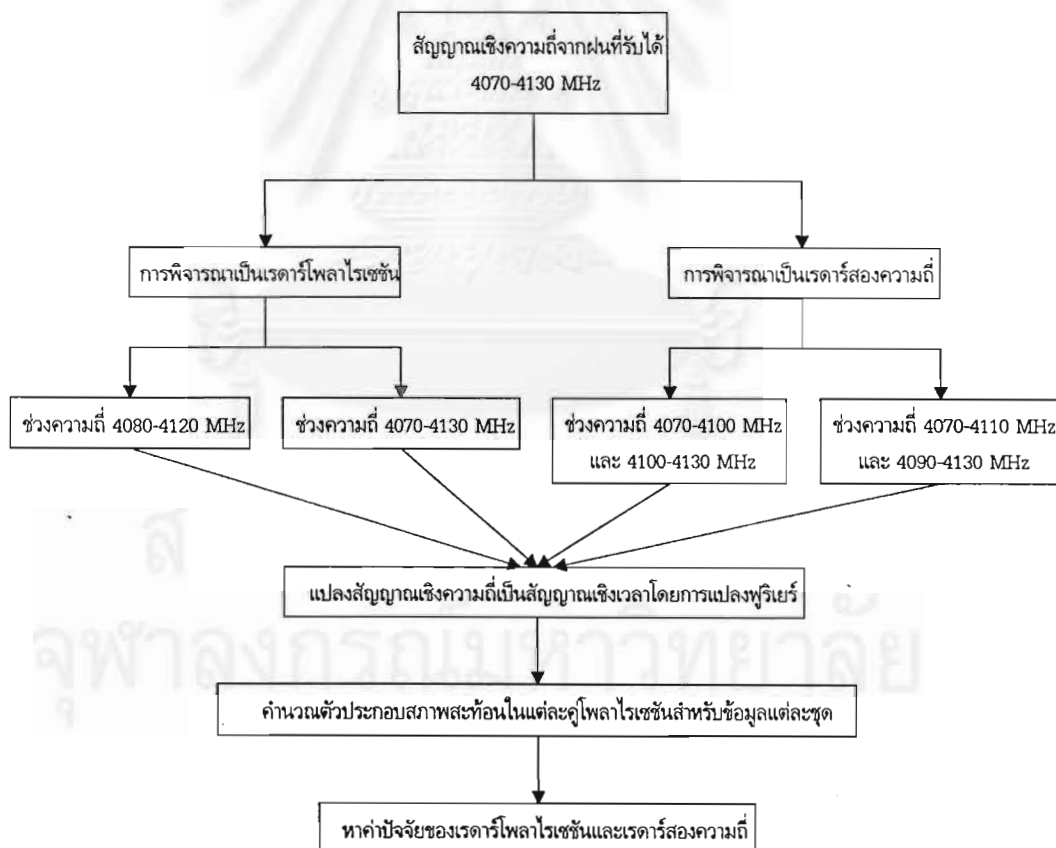
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดเกี่ยวกับระบบเรดาร์พัลส์สังเคราะห์

อุปกรณ์ส่งและรับคลื่น	เครื่องวิเคราะห์ขั้ววงจร รุ่น HP-8753
สายอากาศ	
ชนิด	ปากแตรรูปทรงพีระมิด
ช่วงความถี่ใช้งาน	3.3-4.9 GHz
อัตราขยาย	13.7 dB
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	35° ทั้งระนาบยกและระนาบระดับ
สถานะโพลาไรเซชันของสายอากาศ	สายอากาศส่ง สายอากาศรับ
	V V
	V H
	H H
	V หมายถึงโพลาไรเซชันแนวตั้ง H หมายถึงโพลาไรเซชันแนวระดับ
ความถี่แถบของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์	4070-4130 MHz
ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล 1 ชุด	3 นาที (1 นาทีต่อคู่โพลาไรเซชัน)

3. วิธีการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์

จากหลักการและทฤษฎีของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์จะต้องวัดสัญญาณเชิงความถี่ทั้งขนาดและเฟส แล้วจึงนำไปประมวลผลเป็นสัญญาณเชิงเวลาในภายหลัง เมื่อพิจารณาสมการเรดาร์อุทุนิยมวิทยาสำหรับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ (สมการ (2.21)) พบว่า สิ่งที่จะต้องวัดได้แก่ อัตราส่วนของกำลังที่รับได้กับกำลังที่ส่ง (P_r/P_t) การวัดอัตราส่วนดังกล่าวนี้สามารถกระทำได้โดยการเปรียบเทียบระบบด้วยการต่อตรง (through calibration) สายแแกนร่วมที่ต่อกับสายอากาศส่งและรับทั้งสองเข้าด้วยกัน จากนั้นจึงนำสายแแกนร่วมทั้งสองต่อเข้ากับสายอากาศส่งและรับ สัญญาณที่รับได้ก็คืออัตราส่วนของกำลังที่รับได้กับกำลังที่ส่งนั่นเอง

เมื่อได้อัตราส่วนของกำลังที่รับได้กับกำลังที่ส่งของคลื่นที่สะท้อนจากฝน ซึ่งเป็นสัญญาณเชิงความถี่แล้ว การประมวลผลสัญญาณสามารถกระทำตามแผนภาพในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพการประมวลผลสัญญาณของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์

พิจารณารูปที่ 2.6 เริ่มต้นด้วยสัญญาณเชิงความถี่จากฝนทั้งขนาดและเฟสในช่วง 4070-4130 MHz สามารถพิจารณาเป็นเรดาร์โพลาริเซชันและเรดาร์สองความยาวคลื่นได้พร้อมกัน กล่าวคือ การพิจารณาเป็นเรดาร์โพลาริเซชัน กระทำโดยแปลงสัญญาณเชิงความถี่ในคูโพลาริเซชันแต่ละคู่เป็นสัญญาณเชิงเวลา จากนั้นนำไปหาตัวประกอบสภาพสะท้อนและหาค่าปัจจัยของเรดาร์โพลาริเซชัน ส่วนการพิจารณาเป็นเรดาร์สองความถี่นั้นสามารถกระทำได้โดยแบ่งสัญญาณเชิงความถี่เป็นข้อมูลสองชุดที่มีความถี่กลางต่างกัน ทำให้สามารถพิจารณาข้อมูลสองชุดนี้เป็นข้อมูลของความถี่สองความถี่นั่นเอง จากนั้นจึงแปลงข้อมูลเชิงความถี่ทั้งสองชุดนี้เป็นข้อมูลเชิงเวลาเพื่อหาตัวประกอบสภาพสะท้อนและค่าปัจจัยของเรดาร์สองความถี่ต่อไป นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเปรียบเทียบผลการเลือกใช้ความกว้างแถบที่แตกต่างกัน โดยเรดาร์โพลาริเซชันเปรียบเทียบกรณีความกว้างแถบเป็น 40 MHz (ช่วงความถี่ 4080-4120 MHz) และ 60 MHz (ช่วงความถี่ 4070-4130 MHz) ส่วนกรณีเรดาร์สองความถี่เปรียบเทียบกรณีความกว้างแถบเป็น 30 MHz (ช่วงความถี่ 4070-4100 MHz กับ 4100-4130 MHz) และ 40 MHz (ช่วงความถี่ 4070-4110 MHz กับ 4090-4130 MHz)

จากวิธีการวัดดังกล่าวจะเห็นว่าเรดาร์พัลส์สังเคราะห์สามารถใช้เป็นเรดาร์โพลาริเซชันและเรดาร์สองความถี่ได้พร้อมกัน และเนื่องจากใช้อุปกรณ์เพียงชุดเดียว ทำให้สามารถจัดปัญหาความไม่เข้ากันของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ใช้งานทั้งสองความถี่ได้อีกด้วย ด้วยเหตุนี้เรดาร์พัลส์สังเคราะห์จึงสามารถหาค่าปัจจัยของเรดาร์โพลาริเซชันและเรดาร์สองความถี่ได้พร้อมกัน ทำให้มีค่าปัจจัยให้พิจารณามากขึ้น จึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวัดอัตราการตกของฝน ค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์สรุปอยู่ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์

ค่าปัจจัย	คูโพลาริเซชัน	สัญลักษณ์
เรดาร์โพลาริเซชัน		
ตัวประกอบสภาพสะท้อน	VV	Zvv40M Zvv60M
	VH	Zvh40M Zvh60M
	HH	Zhh40M Zhh60M
ตัวประกอบสภาพสะท้อนผลต่าง		Zdr40M Zdr60M
อัตราส่วนการเปลี่ยนโพลาริเซชันเชิงเส้น		LDR40M LDR60M
เรดาร์สองความถี่		
ค่าปัจจัย Q	VV	Qvv30M Qvv40M
	HH	Qhh30M Qhh40M
อัตราส่วนความยาวคลื่นคู่	VV	DWRvv30M DWRvv40M
	HH	DWRhh30M DWRhh40M

โดยตัวเลขด้านหลังสัญลักษณ์แสดงความกว้างแถบของสัญญาณเชิงความถี่ เช่น Zv40M หมายถึงตัวประกอบสภาพสะท้อนในการรวมโพลาไรเซชัน VV และความกว้างแถบเป็น 40 MHz เป็นต้น และเนื่องจากค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์เหล่านี้เป็นค่าปัจจัยที่ขึ้นกับระยะทางทั้งสิ้น ดังนั้นจึงหาค่าปัจจัยเหล่านี้ในรูปค่าเฉลี่ยเชิงระยะทาง ซึ่งระยะทางดังกล่าวจะต้องมีค่าไม่มากนัก

4. ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน

เมื่อดำเนินการวัดอัตราการตกของฝนด้วยถังวัดน้ำฝนและเรดาร์พัลส์สังเคราะห์แล้ว จากนั้นต้องหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน โดยขั้นตอนวิธีดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกของฝนที่แท้จริงกับค่าปัจจัยต่างๆ ที่ได้จากรadarพัลส์สังเคราะห์ สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นขั้นตอนวิธีแบบกฎกำลัง (power-law algorithm) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

4.1 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว

ขั้นตอนวิธีแบบนี้ คือ การใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกของฝนที่แท้จริงกับค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์เพียงตัวเดียว ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$R = \alpha X^\beta \quad (2.23)$$

โดยที่ R เป็นอัตราการตกของฝนที่แท้จริงมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อชั่วโมง X เป็นค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ที่เลือกใช้ และ α กับ β เป็นค่าคงที่สำหรับแต่ละขั้นตอนวิธี

4.2 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว

ขั้นตอนวิธีแบบนี้เป็นการใช้ค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์สองตัวเพื่อช่วยในการบอกอัตราการตกของฝนให้มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น โดยขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$R = aX_1^b X_2^c \quad (2.24)$$

โดยที่ R เป็นอัตราการตกของฝนที่แท้จริงมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อชั่วโมง X_1 และ X_2 เป็นค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ที่เลือกใช้ และ a , b และ c เป็นค่าคงที่สำหรับแต่ละขั้นตอนวิธี

การทำขั้นตอนวิธีทั้งสองแบบนี้คือการหาค่าคงที่ต่างๆ (α, β, a, b, c) ของขั้นตอนวิธีแต่ละขั้นตอนวิธี ซึ่งสามารถกระทำโดยการแปลงสมการ (2.23) และสมการ (2.24) ให้เป็นสมการเชิงเส้นของตัวแปรลอการิทึม จากนั้นหาเส้นความถดถอย (regression line) หรือเส้นประมาณ (estimation line) ที่ทำให้ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาด (Mean Square Error : MSE) มีค่าต่ำที่สุด สำหรับกรณีขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวใช้หลักการของการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ส่วนกรณีขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัย

สองตัวใช้หลักการของการถดถอยพหุคูณ (multiple regression) สัมประสิทธิ์ของเส้นประมาณก็คือค่าคงที่ต่างๆ ของขั้นตอนวิธีแต่ละขั้นตอนวิธีนั่นเอง นอกจากนี้ยังหาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination : R^2) ซึ่งเป็นค่าปัจจัยที่ใช้บอกสหสัมพันธ์ของเส้นประมาณกับจุดข้อมูล โดยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 เส้นประมาณที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่ามากหมายถึงเส้นประมาณดังกล่าวกับจุดข้อมูลมีสหสัมพันธ์กันดีกว่าเส้นประมาณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจน้อย ซึ่งหมายความว่า เส้นประมาณนั้นเป็นเส้นประมาณที่ดีนั่นเอง

ผลการวัด

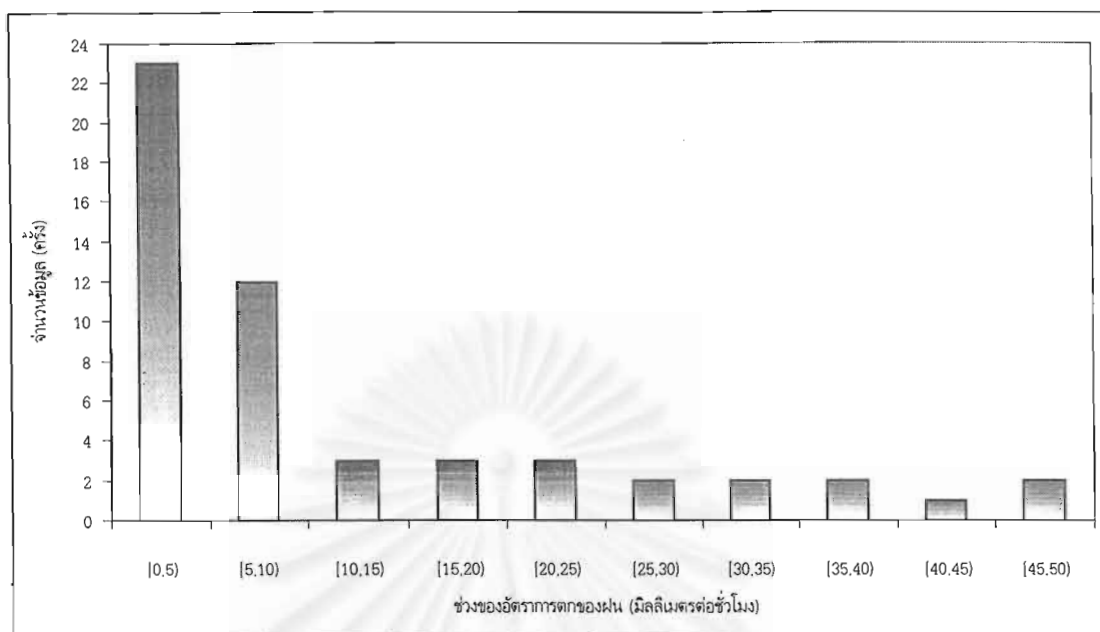
การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์กระทำที่บริเวณหาดฟ้า อาคารวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระหว่างเดือนเมษายนถึงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2541 และระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2542 ผลการวัดดังกล่าวสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วน คือ ผลการวัดอัตราการตกของฝนด้วยถังวัดน้ำฝนและผลการวัดด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการวัดอัตราการตกของฝนด้วยถังวัดน้ำฝน

การวัดอัตราการตกของฝนด้วยถังวัดน้ำฝนกระทำควบคู่ไปกับการวัดอัตราการตกของฝนด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ เพื่อให้ทราบอัตราการตกของฝนที่แท้จริง ดังที่กล่าวแล้วว่า ระยะเวลาในการวัดแต่ละครั้งคือ 3 นาที และอัตราการตกของฝนที่แท้จริงอยู่ในหน่วยมิลลิเมตรต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงต้องคำนวณปริมาณน้ำฝนที่วัดได้ในระยะเวลาที่ทำการวัดให้เป็นอัตราการตกของฝนในหน่วยมิลลิเมตรต่อชั่วโมง ตลอดช่วงเวลาที่ทำการวัด อัตราการตกของฝนที่วัดจากถังวัดน้ำฝนสรุปได้ตามตารางที่ 2.3 และการกระจายของอัตราการตกของฝนแสดงอยู่ในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอัตราการตกของฝนต่ำกว่า 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และข้อมูลก็มีการกระจายค่อนข้างสูงอีกด้วย

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อมูลอัตราการตกของฝนที่วัดจากถังวัดน้ำฝน (อัตราการตกของฝนที่แท้จริง)

จำนวนข้อมูล	อัตราการตกของฝน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)				
	น้อยที่สุด	มากที่สุด	ค่ากลาง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
53	0.4	50.0	5.8	11.2	13.3



รูปที่ 2.7 การกระจายของอัตราการตกของฝุ่นที่วัดจากถ้ำวัดน้ำฝน

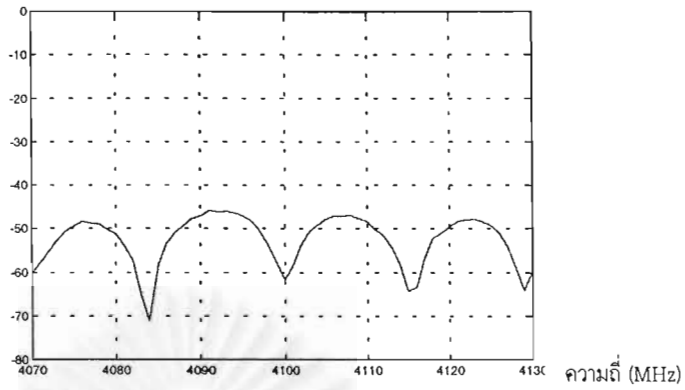
2. ผลการวัดด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์

ผลการวัดด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์แบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือกรณีอากาศปลอดโปร่งและกรณีฝนตก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 กรณีอากาศปลอดโปร่ง (clear-air event)

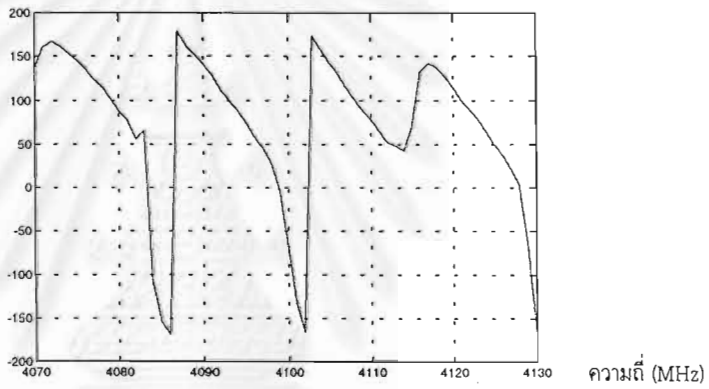
การวัดด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ในกรณีอากาศปลอดโปร่ง กระทำเพื่อให้ทราบลักษณะของสัญญาณทั้งเชิงความถี่และสัญญาณเชิงเวลา(หรือสัญญาณเชิงตำแหน่ง) นอกจากนี้ยังทำให้ทราบตำแหน่งของสิ่งกีดขวางที่อยู่ภายในลำคลื่นของสายอากาศที่อาจรบกวนระบบ การที่สามารถทราบตำแหน่งและขนาดของการรบกวนทำให้สามารถจัดการรบกวนนั้นๆ ได้ได้ในการประมวลผลสัญญาณ สำหรับผลการวัดในกรณีอากาศปลอดโปร่งสำหรับคูโพลาริเซชัน HH ในวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2541 และ วันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2541 แสดงอยู่ในรูปที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ

กำลังสัมพัทธ์



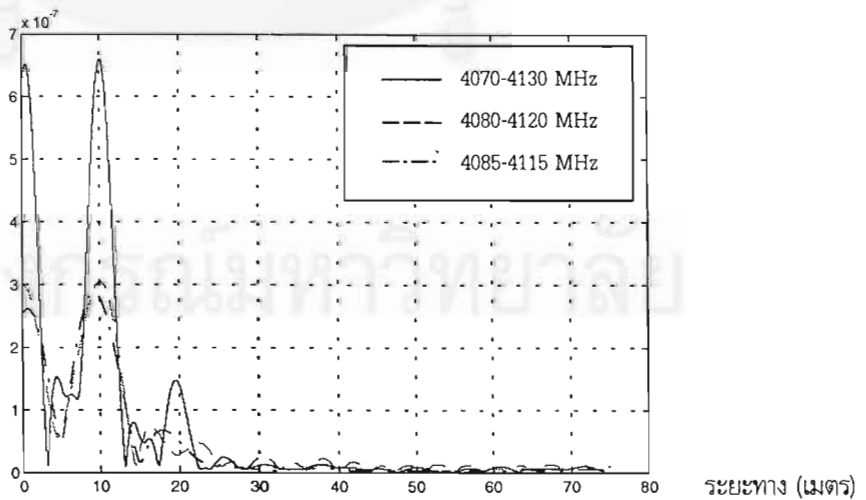
(ก) กำลังสัมพัทธ์ของสัญญาณเชิงความถี่ในช่วงความถี่ 4070-4130 MHz

เฟส(องศา)

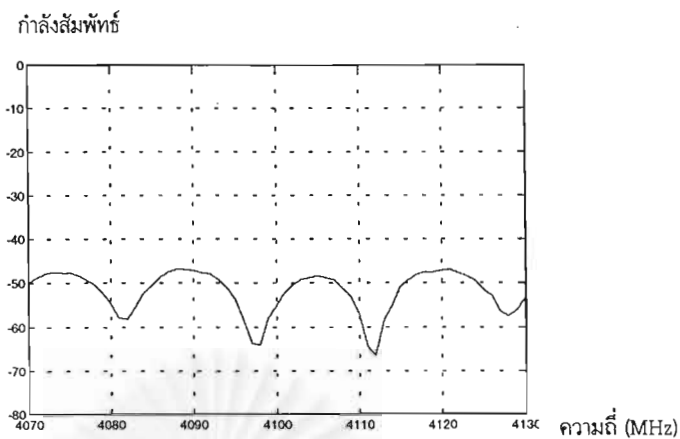


(ข) เฟสของสัญญาณเชิงความถี่ในช่วงความถี่ 4070-4130 MHz

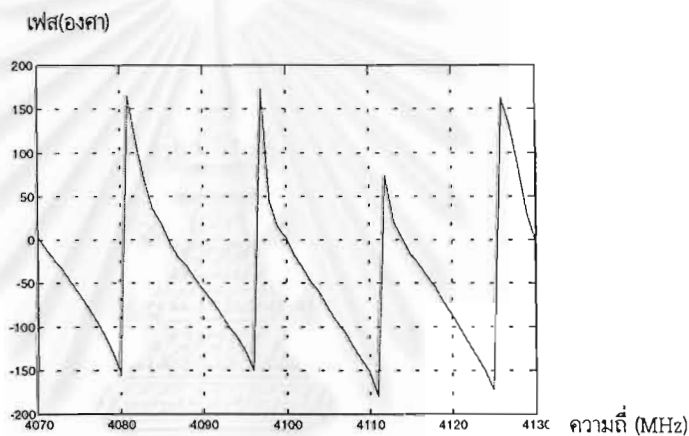
กำลังสัมพัทธ์



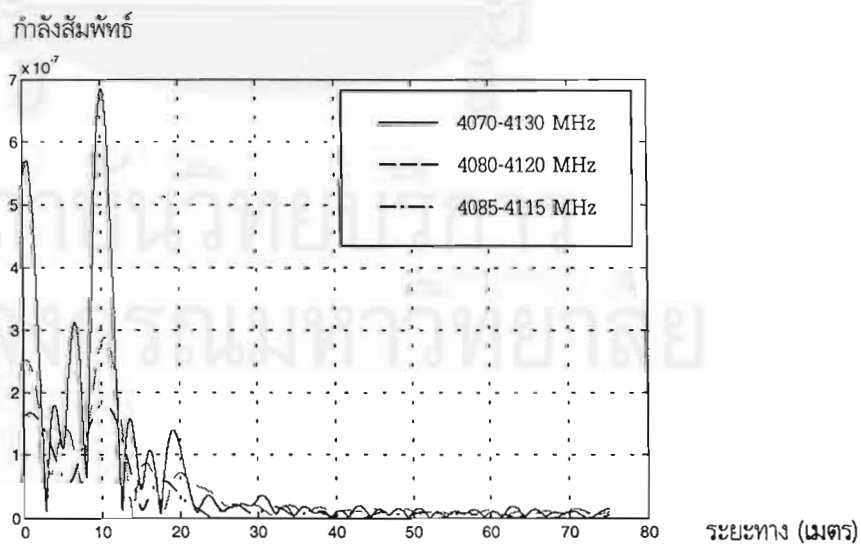
(ค) สัญญาณเชิงตำแหน่งเมื่อเลือกความกว้างแถบของสัญญาณเชิงความถี่ต่างกัน
รูปที่ 2.8 ผลการวัดกรณีอากาศปลอดโปร่งสำหรับคูโพลไรเซชัน HH ในวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2541



(ก) กำลังสัมพัทธ์ของสัญญาณเชิงความถี่ในช่วงความถี่ 4070-4130 MHz



(ข) เฟสของสัญญาณเชิงความถี่ในช่วงความถี่ 4070-4130 MHz



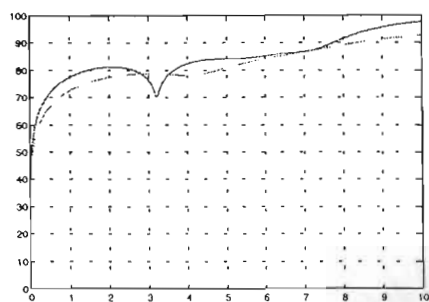
(ค) สัญญาณเชิงตำแหน่งเมื่อเลือกความกว้างแถบของสัญญาณเชิงความถี่ต่างกัน

รูปที่ 2.9 ผลการวัดกรณีอากาศปลอดโปร่งสำหรับคูโพลาริเซชัน HH ในวันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2541

จากผลการวัดกรณีอากาศปลอดภัยในรูปที่ 2.8 และ 2.9 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสัญญาณเชิงความถี่ (รูป (ก) และ (ข)) ของทั้งสองรูปพบว่ามีค่าแตกต่างกัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากเฟสของสัญญาณเชิงความถี่ ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสายอากาศส่งและสายอากาศรับ อย่างไรก็ตามหากพิจารณารูป 2.8 (ค) และ 2.9 (ค) ซึ่งเป็นสัญญาณเชิงตำแหน่งที่ได้จากการแปลงกลับฟูริเยร์ของสัญญาณเชิงความถี่แล้วจึงแปลงแกนเวลาเป็นแกนตำแหน่ง พบว่า สัญญาณเชิงตำแหน่งที่ได้ มียอดแหลมเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดที่ระยะ 1 เมตรและ 10 เมตรจากสายอากาศ ตรงกันทั้งสองรูป เมื่อพิจารณาจากพื้นที่ที่ทำการวัด พบว่า ยอดแหลมที่ตำแหน่ง 10 เมตร เกิดจากคลื่นเดินทางไปสะท้อนกับสิ่งกีดขวางที่อยู่ด้านหลังของสายอากาศซึ่งได้แก่ รั้วเหล็ก ส่วนยอดแหลมที่ตำแหน่ง 1 เมตร เกิดจากผลของพูข้างและพูหลังของสายอากาศ กล่าวคือ คลื่นที่ออกจากสายอากาศในทิศทางของพูข้างและพูหลังของสายอากาศ เดินทางไปตกกระทบสิ่งกีดขวางรอบๆ สายอากาศ เช่น ตู้เหล็กสำหรับเก็บอุปกรณ์ เสาเหล็ก เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ในการประมวลผลสัญญาณในกรณีฝนตก จึงเลือกระยะที่ใช้ในการเฉลี่ยค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์เป็น 4-6 เมตร ซึ่งระยะดังกล่าวเป็นระยะที่มีได้รวมสิ่งรบกวนเหล่านี้เข้าป้อนนั่นเอง

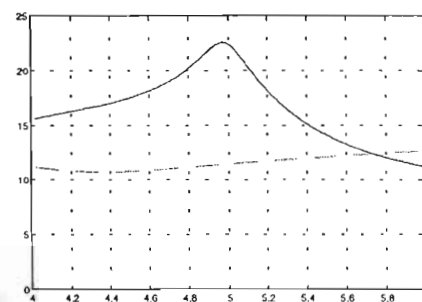
เมื่อประมวลผลสัญญาณเชิงความถี่สำหรับกรณีอากาศปลอดภัยในรูปที่ 2.8 และ 2.9 ตามกระบวนการของการประมวลผลสัญญาณของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ ผลการหาค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์แสดงอยู่ในรูปที่ 2.10 และ 2.11 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยต่างๆ ในหน่วย dB กับระยะทาง โดยที่รูป (ก) เป็นค่าปัจจัยของเรดาร์โพลาริเซชัน ส่วนรูป (ข) เป็นค่าปัจจัยของเรดาร์สองความถี่ จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการเลือกช่วงความถี่ที่แตกต่างกันทำให้ค่าปัจจัยที่ได้มีค่าแตกต่างกัน แต่ก็มีแนวโน้มเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าปัจจัยของเรดาร์โพลาริเซชัน ในรูปที่ 2.10 (ก) และ 2.11 (ก) พบว่าตัวประกอบสภาพสะท้อนในคูโพลาริเซชัน HH VV และ VH มีแนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือ สัญญาณที่มีความกว้างแถบมากกว่าจะให้ค่าปัจจัยเหล่านี้ที่ระดับสูงกว่า ส่วนค่าปัจจัย Zdr และ LDR ซึ่งเป็นอัตราส่วนของตัวประกอบสภาพสะท้อนในคูโพลาริเซชันต่างๆ นั้น แสดงเฉพาะในช่วงระยะทาง 4-6 เมตรเท่านั้น โดยจะเห็นได้ว่า หากช่วงความถี่ที่พิจารณากว้าง จะทำให้ลักษณะของค่าปัจจัยที่ได้มีความเปลี่ยนแปลงมาก ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณเชิงความถี่ที่มีความกว้างแถบมาก เมื่อพิจารณาเป็นสัญญาณเชิงเวลาจะมีความละเอียดเชิงระยะทาง (range resolution) มากไปด้วย ส่งผลให้ค่าปัจจัยที่หามาจากสัญญาณเชิงเวลานี้มีความเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาลักษณะค่าปัจจัยของเรดาร์สองความถี่ ในรูปที่ 2.10 (ข) และ 2.11 (ข) ซึ่งแสดงเฉพาะช่วงระยะทาง 4-6 เมตรเช่นกัน พบว่า อัตราส่วนของตัวประกอบสภาพสะท้อนในคูโพลาริเซชัน HH และ VV มีค่าใกล้เคียงกับ 1 ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ (2.11) และค่าปัจจัย Q รวมทั้งอัตราส่วนความยาวคลื่นคู่ของทั้งสองช่วงความถี่ที่มีความกว้างแถบต่างกัน ก็มีแนวโน้มเดียวกันทั้งการรวมโพลาริเซชัน HH และ VV นอกจากนี้ช่วงความถี่ที่เลือกใช้มีผลต่อความแปรเปลี่ยนของค่าปัจจัยที่ได้เช่นกัน

Zhh (dB)



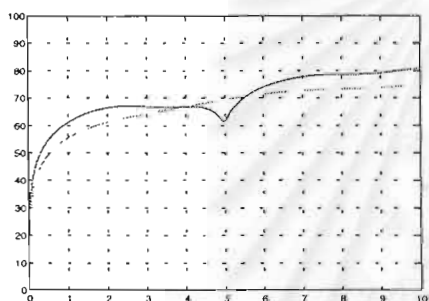
ระยะทาง (เมตร)

Zdr (dB)



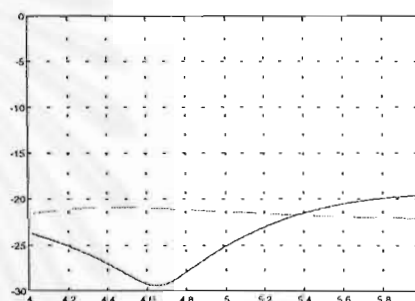
ระยะทาง (เมตร)

Zvv (dB)



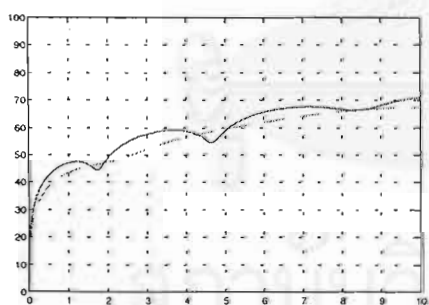
ระยะทาง (เมตร)

LDR (dB)



ระยะทาง (เมตร)

Zvh (dB)



ระยะทาง (เมตร)

(ก) ค่าปัจจัยของเรดาร์โพลาริเซชัน

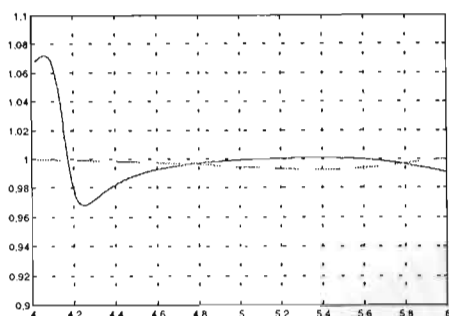
รูปที่ 2.10 ค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์สำหรับกรณีอากาศปลอดโปร่ง

ในวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2541

โดย—— หมายถึงกรณี que เลือกช่วงความถี่ 4070-4130 MHz

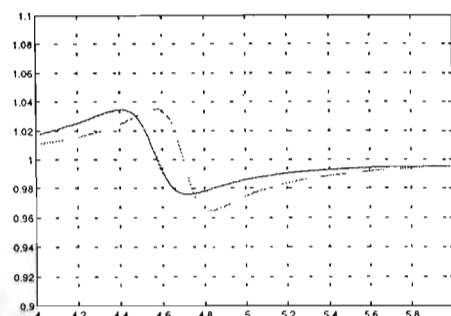
และ--- หมายถึงกรณี que เลือกช่วงความถี่ 4080-4120 MHz

อัตราส่วนตัวประกอบสภาพสะท้อนในคูโพลาริเซชันHH

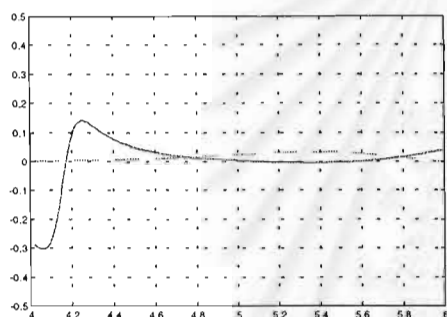


ระยะทาง (เมตร)

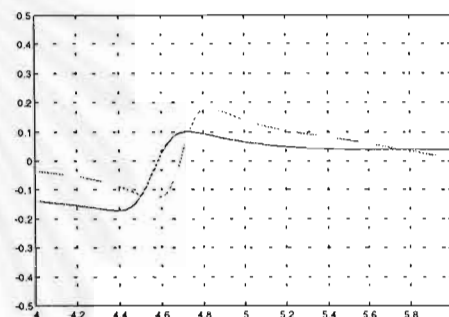
อัตราส่วนตัวประกอบสภาพสะท้อนในคูโพลาริเซชันVV



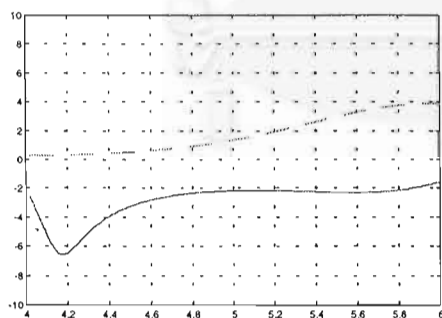
ระยะทาง (เมตร)

O_{hh} (dB)

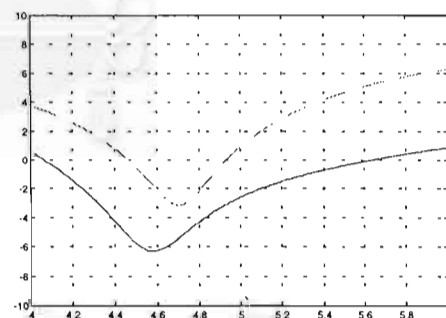
ระยะทาง (เมตร)

O_{vv} (dB)

ระยะทาง (เมตร)

DWR_{hh} (dB)

ระยะทาง (เมตร)

DWR_{vv} (dB)

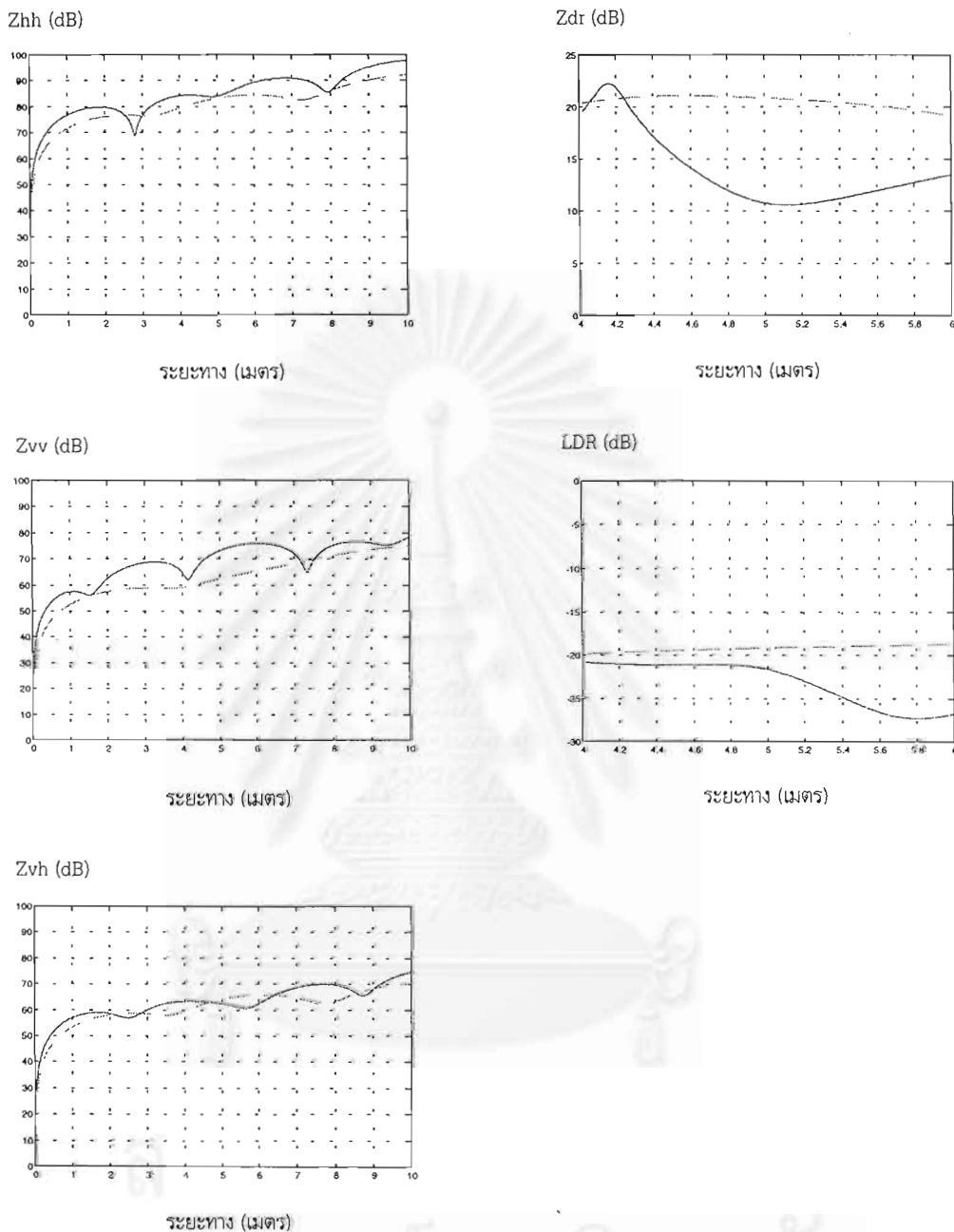
ระยะทาง (เมตร)

(ข) ค่าปัจจัยของเรตาร์สองความถี่

รูปที่ 2.10 (ต่อ)

โดย—— หมายถึงกรณีทีเลือกช่วงความถี่ 4070-4110 MHz กับ 4090-4130 MHz

และ--- หมายถึงกรณีทีเลือกช่วงความถี่ 4070-4100 MHz กับ 4100-4130 MHz



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 (ก) ค่าปัจจัยของเรดาร์โพลาริเซชัน

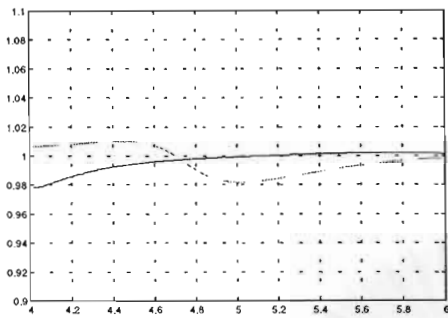
รูปที่ 2.11 ค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์สำหรับกรณีอากาศพลอดไปรง

ในวันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2541

โดย—— หมายถึงกรณีที่เลือกช่วงความถี่ 4070-4130 MHz

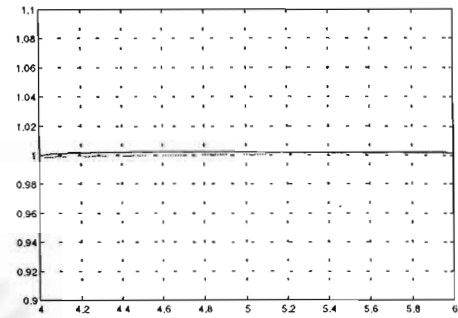
และ--- หมายถึงกรณีที่เลือกช่วงความถี่ 4080-4120 MHz

อัตราส่วนตัวประกอบสภาพสะท้อนในคูโพลาริเซชันHH



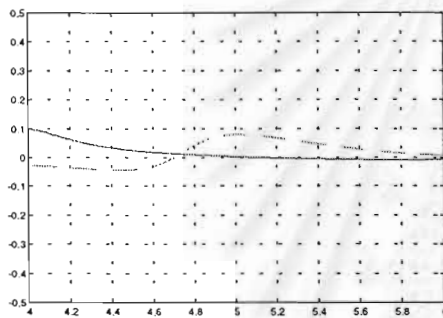
ระยะทาง (เมตร)

อัตราส่วนตัวประกอบสภาพสะท้อนในคูโพลาริเซชันVV



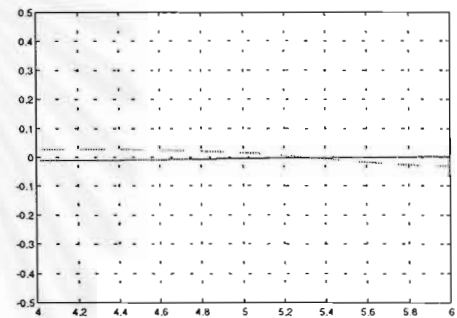
ระยะทาง (เมตร)

Qhh (dB)



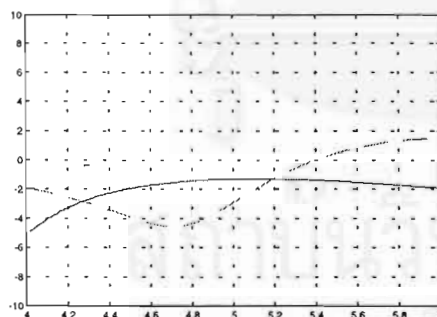
ระยะทาง (เมตร)

Qvv (dB)



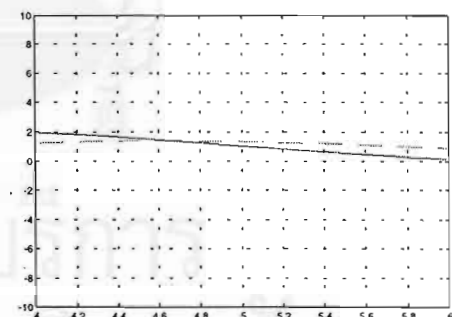
ระยะทาง (เมตร)

DWRhh (dB)



ระยะทาง (เมตร)

DWRvv (dB)



ระยะทาง (เมตร)

(ข) ค่าปัจจัยของเรตาร์สองความถี่

รูปที่ 2.11 (ต่อ)

โดย—— หมายถึงกรณี que เลือกช่วงความถี่ 4070-4110 MHz กับ 4090-4130 MHz

และ-- หมายถึงกรณี que เลือกช่วงความถี่ 4070-4100 MHz กับ 4100-4130 MHz

สำหรับค่าทางสถิติของค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ในกรณีอากาศปลอดโปร่งจากข้อมูลจำนวน 19 ชุด แสดงอยู่ในตารางที่ 2.4 โดยค่าปัจจัยเหล่านี้เป็นค่าเฉลี่ยเชิงระยะทางในช่วง 4-6 เมตร เมื่อพิจารณาจากตารางจะเห็นได้ว่า ค่าปัจจัยในกรณีอากาศปลอดโปร่งเหล่านี้มีการแปรเปลี่ยนค่อนข้างสูง การที่เป็นเช่นนี้น่าจะมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของสายอากาศส่งและรับในแต่ละครั้งที่ทำการวัด ดังนั้นการใช้เรดาร์พัลส์สังเคราะห์ในการวัดอัตราการตกของฝนจึงจำเป็นต้องปรับเทียบด้วยอากาศปลอดโปร่ง (clear air calibration) ซึ่งเป็นการวัดสัญญาณจากฝนเทียบกับสัญญาณในกรณีอากาศปลอดโปร่งเพื่อขจัดผลของความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งของสายอากาศดังกล่าว อีกทั้งยังเป็นการพิจารณาเฉพาะสัญญาณจากฝนเท่านั้นด้วย

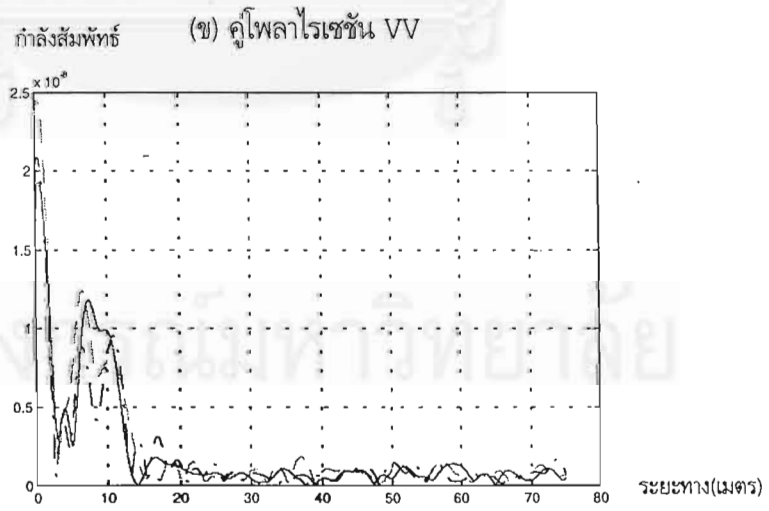
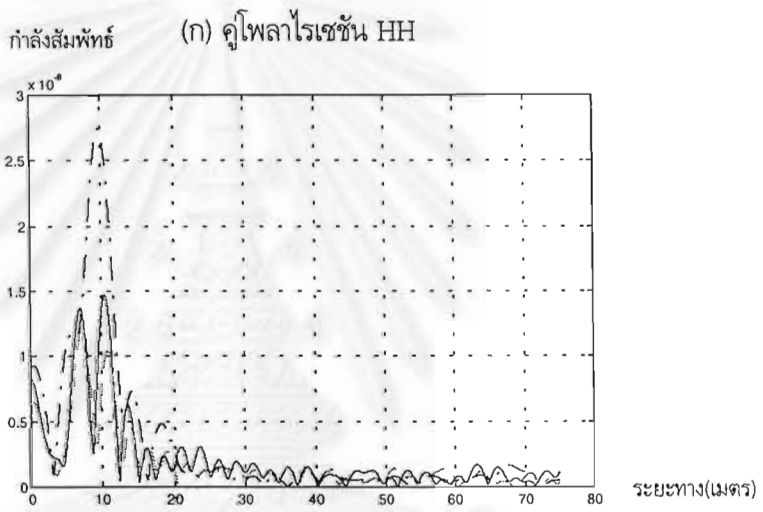
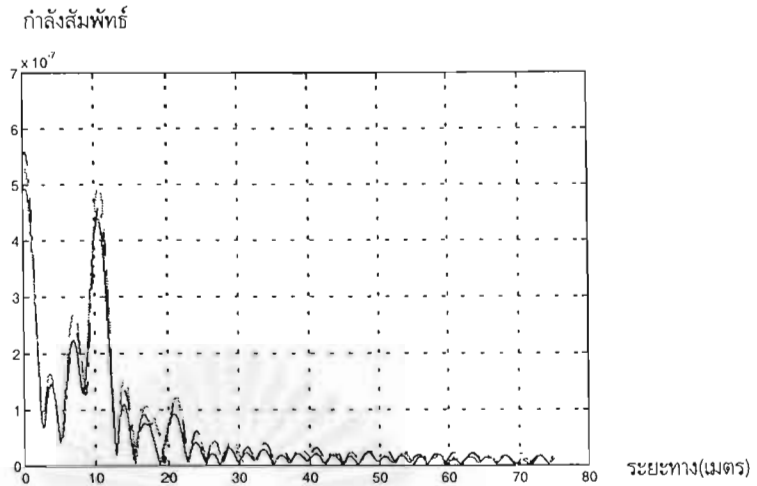
ตารางที่ 2.4 ค่าทางสถิติของค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ (ในหน่วย dB) ในกรณีอากาศปลอดโปร่ง

ค่าปัจจัย	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Zhh60M	90.8860	80.5262	84.4599	2.6705
Zvv60M	86.3125	68.1829	75.1140	7.0145
Zvh60M	76.8403	61.3723	68.4755	5.2311
Zdr60M	21.4837	-0.0164	10.4037	6.3152
LDR60M	-9.0274	-22.9243	-15.2919	4.4427
Zhh40M	86.8827	75.6694	81.3466	2.9336
Zvv40M	82.5838	62.6701	71.3977	6.6936
Zvh40M	74.0649	58.9713	65.9290	4.5561
Zdr40M	20.5292	-2.3144	10.0608	6.3211
LDR40M	-7.0296	-21.4267	-15.3546	4.2521
Ohh40M	0.0366	-0.0224	0.0047	0.0156
DWRhh40M	5.9626	-4.9192	0.3460	3.4456
Qvv40M	0.0188	-0.0270	-0.0007	0.0119
DWRvv40M	7.5566	-1.5922	2.4646	2.7141
Ohh30M	0.0265	-0.0298	0.0032	0.0152
DWRhh30M	8.0509	-2.5488	1.4923	2.5872
Qvv30M	0.0663	-0.0182	0.0107	0.0209
DWRvv30M	10.3365	-0.4071	3.0310	2.6363

2.2 กรณีฝนตก (rainfall event)

การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ เป็นการวัดสัญญาณเชิงความถี่ในกรณีฝนตก จากนั้นทำการประมวลผลสัญญาณเพื่อหาค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ และหาขั้นตอนวิธีในการประมาณอัตราการตกของฝนด้วยค่าปัจจัยเหล่านี้กับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง สัญญาณเชิงความถี่ที่วัดจากบริเวณที่ฝนตกในแต่ละคูโพลาริเซชัน จะถูกแปลงเป็นสัญญาณเชิงเวลาหรือสัญญาณเชิงตำแหน่งด้วยกระบวนการเช่นเดียวกับกรณีอากาศปลอดโปร่ง เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของสัญญาณในกรณีอากาศปลอดโปร่งและกรณีที่ฝนตกที่อัตราการตกของฝนต่างๆ กัน สัญญาณเชิงตำแหน่งสำหรับช่วงความถี่ 4070-4130 MHz และคูโพลาริเซชัน HH VV และ VH ในวันที่ 7 และ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2541 เป็นดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 2.5 เป็นการเปรียบเทียบค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ในกรณีอากาศปลอดโปร่งและกรณีฝนตกสำหรับทั้งสองวันดังกล่าว

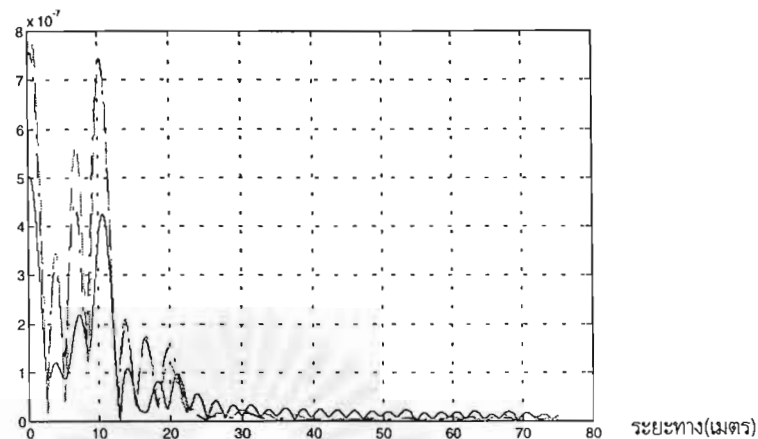
จากหลักการโดยทั่วไปที่ว่า เมื่อฝนตกคลื่นจะสะท้อนกับอนุภาคฝนซึ่งมีอยู่อย่างมากมายในอากาศ กลับมายังสายอากาศรับ ดังนั้นสัญญาณเชิงตำแหน่งที่ได้จึงน่าจะมีขนาดมากกว่าเมื่ออากาศปลอดโปร่ง และเมื่ออัตราการตกของฝนยิ่งสูง หมายถึง มีอนุภาคฝนในอากาศมากขึ้น สัญญาณที่รับได้น่าจะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาจากรูปที่ 2.12 และ 2.13 พบว่า ลักษณะของสัญญาณที่ได้ไม่สอดคล้องกับหลักการดังกล่าว ทั้งนี้เนื่องจากผลของการเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นและการลดทอนกำลังคลื่นเนื่องจากฝน ซึ่งสามารถยกตัวอย่างเพื่ออธิบายได้ดังนี้ จากตารางที่ 2.5 สำหรับวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2541 พิจารณาค่าปัจจัย Zhh60M จะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราการตกของฝนเป็น 7 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง Zhh60M ที่หาได้มีค่าต่ำกว่าเมื่ออากาศปลอดโปร่ง แต่หากพิจารณาค่าปัจจัย Zvh60M ที่อัตราการตกของฝนดังกล่าวพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นไปอีกสำหรับอัตราการตกของฝน 22 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เป็นการบ่งบอกถึงการเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นเนื่องจากฝน ดังนั้นการที่ค่าปัจจัย Zhh60M ที่วัดได้ในขณะฝนตกมีค่าต่ำกว่าเมื่ออากาศปลอดโปร่งก็เนื่องจากการเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นนั่นเอง จากผลการหาค่าปัจจัยของวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2541 จะเห็นความแตกต่างที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน กล่าวคือ ค่าปัจจัย Zhh60M และ Zvv60M ที่หาได้เมื่อฝนตกมีค่าสูงกว่าเมื่ออากาศปลอดโปร่ง แต่ค่าปัจจัย Zvh60M กลับมีค่าต่ำลง การที่เกิดความไม่แน่นอนของแนวโน้มของค่าปัจจัยแต่ละตัวเหล่านี้ ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวอาจมีความผิดพลาดในการระบุอัตราการตกของฝน ส่งผลให้มีการใช้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวเพื่อชดเชยผลของการลดทอนและการเปลี่ยนโพลาไรเซชันเนื่องจากฝนเป็นการช่วยให้การประมาณอัตราการตกของฝนมีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น



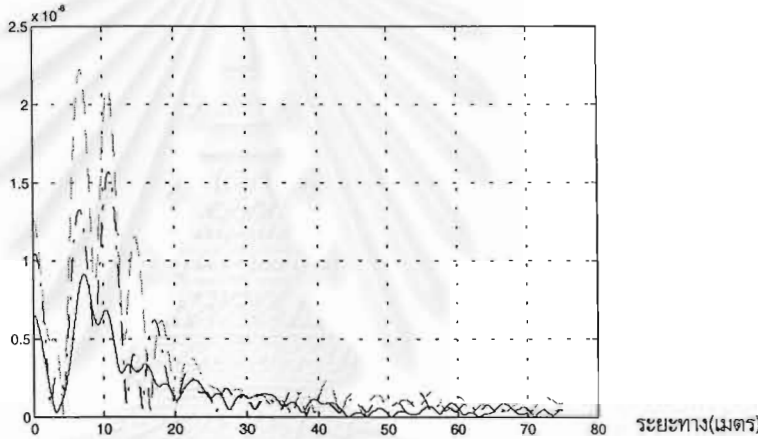
(ค) คูโพลาริเซชัน VH

รูปที่ 2.12 สัญญาณเชิงตำแหน่งสำหรับคูโพลาริเซชันแต่ละคู่ ในวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2541 โดย — เป็นกรณีอากาศปลอดโปร่ง -- เมื่อ $R = 22 \text{ mm/hr}$ และ --- เมื่อ $R = 7 \text{ mm/hr}$

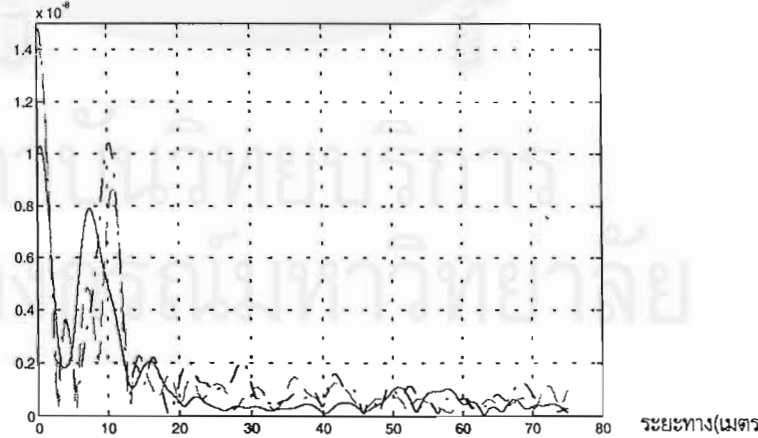
กำลังสัมพัทธ์



กำลังสัมพัทธ์ (ก) คูโพลาริเซชัน HH



กำลังสัมพัทธ์ (ข) คูโพลาริเซชัน VV



(ค) คูโพลาริเซชัน VH

รูปที่ 2.13 สัญญาณเชิงตำแหน่งสำหรับคูโพลาริเซชันแต่ละคู่ ในวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2541 โดย — เป็นกรณีอากาศปลอดโปร่ง --- เมื่อ $R = 6.4$ mm/hr และ - - - เมื่อ $R = 20$ mm/hr

ตารางที่ 2.5 ค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ (ในหน่วย dB) สำหรับวันที่ 7 และ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2541

ค่าปัจจัย	วันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2541			วันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2541		
	อากาศ ปลอดโปร่ง	7 mm/hr	22 mm/hr	อากาศ ปลอดโปร่ง	6.4 mm/hr	20 mm/hr
Zhh60M	83.2854	82.7770	83.5982	83.7147	86.9004	87.1161
Zvv60M	70.3060	73.7179	69.8328	69.3505	73.7909	72.0080
Zvh60M	69.8797	70.5308	72.6940	69.0027	66.1174	66.0319
Zdr60M	15.2792	9.6827	14.9594	15.9971	11.9324	17.5968
LDR60M	-13.3724	-11.9654	-10.3527	-15.0307	-19.8716	-20.3152
Zhh40M	82.4714	83.7903	83.7446	84.3884	80.7291	82.6684
Zvv40M	69.7046	70.4364	68.5105	68.4535	71.2011	68.4255
Zvh40M	67.0000	63.6226	68.5135	66.3627	64.3045	65.6955
Zdr40M	12.8603	13.3451	15.7184	15.8695	9.7665	14.5694
LDR40M	-15.3462	-19.8716	-15.0307	-17.8516	-16.4397	-16.7572
Ohh40M	-0.0071	-0.0171	-0.0098	-0.0224	0.0042	0.0114
DWRhh40M	-1.6905	-1.1213	-1.1405	3.6105	-1.5187	-3.9536
Qvv40M	-0.0017	0.0022	0.0048	0.0000	0.0011	0.0162
DWRvv40M	2.7041	-0.3431	2.5970	4.2941	0.4087	-1.7145
Ohh30M	-0.0270	-0.0406	-0.0270	-0.0105	0.0088	0.0261
DWRhh30M	3.2589	2.8769	2.3224	3.8277	-0.7301	-2.0254
Qvv30M	-0.0149	-0.0318	-0.0214	0.0121	0.0013	0.0178
DWRvv30M	2.1577	3.2873	1.3522	5.4230	-2.3462	-1.2984

การหาและตรวจสอบขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน

ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการบอกอัตราการตกของฝนเป็นความสัมพันธ์แบบกำลังระหว่างค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์กับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง โดยขั้นตอนวิธีที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองแบบ คือ ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวและขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว การหาขั้นตอนวิธีกระทำโดยใช้หลักการที่ทำให้กำลังสองของความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังทำการตรวจสอบขั้นตอนวิธีที่ได้ด้วยการคำนวณอัตราการตกของฝนด้วยขั้นตอนวิธีนั้นๆ เพื่อเปรียบเทียบกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง และหาค่า

ทางสถิติต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการบอกร่องการตกของฝนสำหรับแต่ละชั้นตอนวิธี ผลการหาชั้นตอนวิธีและการตรวจสอบชั้นตอนวิธีมีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการหาชั้นตอนวิธีที่ใช้ในการบอกร่องการตกของฝน

ผลการหาชั้นตอนวิธี ได้แก่ค่าคงที่สำหรับชั้นตอนวิธีแต่ละชั้นตอนวิธี และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ซึ่งแบ่งตามชนิดของชั้นตอนวิธีได้ดังนี้

1.1 ชั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว

จากสมการ (2.23) ซึ่งเป็นสมการแสดงชั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว ค่าคงที่สำหรับชั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวได้แก่ α และ β ผลการหาค่าคงที่ทั้งสอง รวมทั้งสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับค่าปัจจัยของเรคาร์พัลส์สังเคราะห์แต่ละตัว แสดงอยู่ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลการหาชั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว

ชั้นตอนวิธี	α	β	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
R-Zhh60M	4.5393	0.1731	0.0035
R-Zvv60M	5.5187	-1.1179	0.1735
R-Zvh60M	4.8020	0.3029	0.0442
R-Zdr60M	5.4068	0.5944	0.0739
R-LDR60M	5.2324	0.4983	0.0986
R-Zhh40M	4.3244	-0.4968	0.0681
R-Zvv40M	4.3037	0.1371	0.0090
R-Zvh40M	5.3889	0.2209	0.0224
R-Zdr40M	4.0607	-0.2518	0.0445
R-LDR40M	6.5342	0.4768	0.1175
R-Qhh40M	4.8915	-39.7590	0.0146
R-DWRhh40M	3.7887	-0.9510	0.2439
R-Qvv40M	5.0698	-46.0600	0.0250
R-DWRvv40M	3.9342	-0.2679	0.0192

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

R-Qhh30M	4.5508	-33.5140	0.0206
R-DWRhh30M	4.5992	-1.0898	0.1866
R-Qvv30M	2.9289	-72.1110	0.1218
R-DWRvv30M	3.3804	-0.6733	0.1548

จากผลดังกล่าวจะเห็นว่า เมื่อใช้ค่าปัจจัยของเรตาร์โพลาริเซชัน ขั้นตอนวิธีที่หาได้มีความสัมพันธ์ทั้งในลักษณะลดลง ($\beta < 0$) และ เพิ่มขึ้น ($\beta > 0$) แต่เมื่อใช้ค่าปัจจัยของเรตาร์สองความถี่ พบว่าขั้นตอนวิธีที่หาได้มีความสัมพันธ์ในลักษณะลดลงทั้งหมด โดยขั้นตอนวิธีที่มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุดคือ ขั้นตอนวิธี R-DWRhh40M (0.2439) รองลงมาได้แก่ขั้นตอนวิธี R-DWRhh30M (0.1866) R-Zvv60M (0.1735) และ R-DWRvv30M (0.1548) ตามลำดับ โดยขั้นตอนวิธีที่เหลือมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจไม่เกิน 0.1500 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยที่มีความกว้างแถบต่างกัน พบว่า ค่าคงที่ทั้งสองของขั้นตอนวิธีที่ได้มีความแตกต่างกันด้วย

1.2 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว

ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวเป็นไปตามสมการ (2.24) โดยค่าปัจจัยที่เลือกใช้นั้นเป็นค่าปัจจัยของเรตาร์โพลาริเซชันหรือเรตาร์สองความถี่เพียงอย่างเดียว กล่าวคือ ไม่เลือกใช้ค่าปัจจัยของเรตาร์โพลาริเซชันร่วมกับเรตาร์สองความถี่ ผลการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวแสดงอยู่ในตารางที่ 2.7 โดยค่าปัจจัยตัวแรกหมายถึง X_1 และค่าปัจจัยตัวที่สองหมายถึง X_2 ในสมการ (2.24) เช่น R-Zhh60M-Zvv60M จะได้ว่า R หมายถึงอัตราการตกของฝนที่แท้จริง Zhh60M และ Zvv60M หมายถึง X_1 และ X_2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.7 ผลการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว

ขั้นตอนวิธี	a	b	c	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
R-Zhh60M-Zvv60M	5.4288	0.3143	-1.1506	0.1850
R-Zhh60M-Zvh60M	4.8756	-0.1473	0.3371	0.0462
R-Zhh60M-Zdr60M	5.5534	-0.1756	0.6476	0.0769
R-Zhh60M-LDR60M	5.1630	0.2097	0.5028	0.1038
R-Zvv60M-Zvh60M	5.7485	-1.1072	0.2912	0.2144
R-Zvv60M-Zdr60M	5.5422	-1.0953	0.0290	0.1736
R-Zvv60M-LDR60M	5.9256	-0.9736	0.3631	0.2230

ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

R-Zvh60M-Zdr60M	5.6397	0.2984	0.5892	0.1168
R-Zvh60M-LDR60M	5.2889	-0.1351	0.6151	0.1020
R-Zdr60M-LDR60M	6.5746	0.7414	0.5947	0.2099
R-Zhh40M-Zvv40M	3.9647	-0.5198	0.1765	0.0828
R-Zhh40M-Zvh40M	5.9507	-0.7773	0.4892	0.1561
R-Zhh40M-Zdr40M	4.1315	-0.3949	-0.1184	0.0751
R-Zhh40M-LDR40M	5.9415	-0.3013	0.3978	0.1394
R-Zvv40M-Zvh40M	5.0486	0.1436	0.2253	0.0322
R-Zvv40M-Zdr40M	4.2267	-0.2443	-0.4075	0.0560
R-Zvv40M-LDR40M	6.1010	0.1495	0.4804	0.1282
R-Zvh40M-Zdr40M	5.0491	0.3713	-0.3547	0.1004
R-Zvh40M-LDR40M	6.2163	-0.1830	0.5883	0.1265
R-Zdr40M-LDR40M	5.7979	-0.1880	0.4397	0.1416
R-Qhh40M-DWRhh40M	4.1117	-55.9054	-0.9824	0.2726
R-Qhh40M-Qvv40M	5.1442	-20.4078	-37.8569	0.0281
R-Qhh40M-DWRvv40M	4.1668	-43.5083	-0.2872	0.0366
R-DWRhh40M-Qvv40M	4.1672	-0.9473	-44.1915	0.2670
R-DWRhh40M-DWRvv40M	3.5944	-0.9334	-0.0971	0.2464
R-Qvv40M-DWRvv40M	4.3727	-42.9660	-0.2440	0.0409
R-Qhh30M-DWRhh30M	4.5330	-51.6167	-1.1831	0.2342
R-Qhh30M-Qvv30M	2.7661	19.9051	-82.1601	0.1264
R-Qhh30M-DWRvv30M	3.1179	-65.0664	-0.8103	0.2261
R-DWRhh30M-Qvv30M	2.3823	-1.4510	-105.4219	0.4263
R-DWRhh30M-DWRvv30M	3.7982	-0.8009	-0.4193	0.2336
R-Qvv30M-DWRvv30M	2.3681	-62.1258	-0.6032	0.2435

พิจารณาจากตารางที่ 2.7 พบว่า ขั้นตอนวิธีที่มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุดเท่ากับ 0.4263 ได้แก่ ขั้นตอนวิธี R-DWRhh30M-Qvv30M และรองลงมาคือขั้นตอนวิธี R-Qhh40M-DWRhh40M (0.2726) และ R-DWRhh40M-Qvv40M (0.2670) ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ขั้นตอนวิธีที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงเหล่านี้มีค่าปัจจัย DWRhh40M และ DWRhh30M เป็นส่วนประกอบทั้งสิ้น ทั้งนี้เนื่องจากขั้นตอนวิธีที่ใช้

ค่าปัจจัย DWRhh40M หรือ DWRhh30M เพียงตัวเดียวมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูงอยู่แล้ว การใช้ค่าปัจจัยอื่นร่วมกับค่าปัจจัยทั้งสองนี้ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ได้มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูงขึ้นไปอีก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การใช้ค่าปัจจัยสองตัวเพื่อระบุอัตราการตกของฝน ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ได้มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงขึ้น อย่างไรก็ตามขั้นตอนวิธีที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงกว่า มิได้หมายความว่า ขั้นตอนวิธีนั้นจะสามารถบอกอัตราการตกของฝนได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำกว่าเสมอไป ซึ่งจะเห็นได้จากผลการตรวจสอบขั้นตอนวิธีในหัวข้อถัดไป

2. การตรวจสอบขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน

เมื่อทราบขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนทั้งหมดแล้ว การตรวจสอบขั้นตอนวิธีเหล่านั้น จะทำได้โดยการใช้ขั้นตอนวิธีที่ได้คำนวณอัตราการตกของฝน อัตราการตกของฝนที่คำนวณได้จะเป็นอัตราการตกของฝนจากการประมาณ (estimated rain rate : R_{est}) จากนั้นทำการเปรียบเทียบอัตราการตกของฝนจากการประมาณนี้กับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง (actual rain rate : R_{act}) ทำให้ทราบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีแต่ละขั้นตอนวิธี โดยที่สมรรถนะของขั้นตอนวิธี หมายถึง ความสามารถในการระบุอัตราการตกของฝนของขั้นตอนวิธีแต่ละขั้นตอนวิธี ซึ่งพิจารณาจากค่าทางสถิติต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ความผิดพลาดสูงสุดและต่ำสุด (maximum and minimum error : Err_{max} และ Err_{min}) หมายถึง ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาดระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง (Error : Err) ซึ่งมีนิยามตามสมการ (2.25) โดยจะเห็นได้ว่า หากความผิดพลาดดังกล่าวมีค่ามากกว่าศูนย์ หมายถึงการประมาณค่าเกินจริง ในทางกลับกันหากความผิดพลาดมีค่าน้อยกว่าศูนย์ หมายถึง การประมาณค่าต่ำกว่าจริง

$$Err = R_{est} - R_{act} \quad (2.25)$$

จากความหมายของความผิดพลาดสูงสุดและต่ำสุด สามารถเขียนได้ตามสมการ (2.26)

$$Err_{max} = \max(abs(Err)) \quad (2.26 ก)$$

$$Err_{min} = \min(abs(Err)) \quad (2.26 ข)$$

โดย $\max(x)$ และ $\min(x)$ หมายถึง ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของชุดข้อมูล x ตามลำดับ ส่วน $abs(\cdot)$ หมายถึง ค่าสัมบูรณ์

- ความผิดพลาดเฉลี่ย (Mean Error : ME) ค่าทางสถิตินี้เป็นการพิจารณาภาพรวมของข้อมูลทั้งหมด มีนิยามตามสมการ (2.27) โดยขั้นตอนวิธีใดมีความผิดพลาดเฉลี่ยมีค่ามากกว่าศูนย์ หมายความว่า ขั้นตอนวิธีนั้นให้การประมาณค่าที่เกินจริง และหากมีความผิดพลาดเฉลี่ยน้อยกว่าศูนย์ ก็หมายความว่า ขั้นตอนวิธีนั้นมีการประมาณค่าต่ำกว่าจริง

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Err_i \quad (2.27)$$

โดย N เป็นจำนวนข้อมูล และ Err_i เป็นความผิดพลาดของข้อมูลที่ i ตามสมการ (2.25)

- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาด (Standard Deviation of Error : σ_{Err}) เป็นการพิจารณาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นว่ามีการกระจายมากน้อยเพียงใด มีนิยามตามสมการ (2.28) หากขั้นตอนวิธีใดมีค่าทางสถิตินี้มาก หมายถึง ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีการกระจายมาก แสดงว่า ขั้นตอนวิธีนั้นๆ ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน

$$\sigma_{Err} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Err_i - ME)^2} \quad (2.28)$$

- กำลังสองของความผิดพลาดเฉลี่ย (Mean Square Error : MSE) เป็นค่าทางสถิติอีกตัวหนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาภาพรวมของข้อมูลทั้งหมด ซึ่งมีนิยามตามสมการ (2.29) ความจำเป็นในการใช้ค่าทางสถิตินี้ร่วมกับความผิดพลาดเฉลี่ยเพื่อพิจารณาภาพรวมของข้อมูลทั้งหมด เนื่องจากการใช้ความผิดพลาดเฉลี่ยเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถแสดงสมรรถนะของขั้นตอนวิธีได้อย่างเพียงพอ เช่น ในกรณีนี้ขั้นตอนวิธีที่ให้ความผิดพลาดเฉลี่ยเป็นศูนย์ มิได้หมายความว่า ขั้นตอนวิธีนั้นไม่มีความผิดพลาดเลย แต่อาจมีความผิดพลาดในลักษณะประมาณค่าเกินจริงและลักษณะประมาณค่าต่ำกว่าจริงเท่ากันก็ได้ เป็นต้น

$$MSE = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (Err_i)^2 \quad (2.29)$$

- สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient : $CORR$) ระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง เป็นค่าทางสถิติที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสองชุด โดยที่สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีนิยามตามสมการ (2.30) และมีค่าอยู่ในช่วง $(-1,1)$ หรือ $-1 \leq CORR \leq 1$ การที่สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่ามากหมายถึงข้อมูลทั้งสองชุดมีความสัมพันธ์กันมาก ซึ่งอาจเป็นความสัมพันธ์ในทิศทางตามกันหรือทิศทางตรงข้ามกันก็ได้ ขึ้นกับค่าของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ กล่าวคือ หากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเป็นบวกหมายถึงข้อมูลทั้งสองชุดมีความสัมพันธ์กันในทิศทางตามกัน แต่ถ้ามีค่าเป็นลบหมายถึงข้อมูลทั้งสองชุดมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกัน

$$CORR = \frac{Cov(R_{est}, R_{act})}{\sigma_{R_{est}} \sigma_{R_{act}}} \quad (2.30)$$

โดย $Cov(R_{est}, R_{act})$ เป็นความแปรปรวนร่วม (covariance) ระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณและอัตราการตกของฝนที่แท้จริงมีนิยามเป็นไปตามสมการ (2.31) ซึ่ง $mean(x)$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล x

$$Cov(R_{est}, R_{act}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{est}^i - \text{mean}(R_{est})) (R_{act}^i - \text{mean}(R_{act})) \quad (2.31)$$

$\sigma_{R_{est}}$ กับ $\sigma_{R_{act}}$ หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการตกของฝนจากการประมาณและอัตราการตกของฝนที่แท้จริงตามลำดับ โดยมีค่าเป็นไปตามสมการ (2.32)

$$\sigma_{R_{est}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_{est}^i - \text{mean}(R_{est}))^2} \quad (2.32 \text{ ก})$$

$$\sigma_{R_{act}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_{act}^i - \text{mean}(R_{act}))^2} \quad (2.32 \text{ ข})$$

ผลการหาค่าทางสถิติเหล่านี้สำหรับขั้นตอนวิธีต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 2.8 ซึ่งเป็นกรณีขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว และตารางที่ 2.9 เป็นกรณีขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว

ตารางที่ 2.8 ค่าทางสถิติสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว

ขั้นตอนวิธี	Err_{max}	Err_{min}	ME	σ_{Err}	MSE	$CORR$
R-Zhh60M	46.2094	0.0535	-6.54	13.34	225.96	0.0063
R-Zvv60M	46.9171	0.0246	-5.61	12.82	200.38	0.2753
R-Zvh60M	46.8375	0.3408	-6.33	13.13	217.41	0.1922
R-Zdr60M	46.5654	0.2351	-6.13	13.41	222.28	0.0718
R-LDR60M	44.8998	0.0094	-6.05	13.09	212.71	0.1917
R-Zhh40M	43.2402	0.1723	-6.12	12.88	208.18	0.2649
R-Zvv40M	45.6954	0.0366	-6.51	13.40	227.22	-0.0720
R-Zvh40M	45.7007	0.1880	-6.43	13.07	217.10	0.2554
R-Zdr40M	44.1296	0.0021	-6.34	13.28	221.48	0.0969
R-LDR40M	38.4443	0.1061	-5.90	12.22	188.33	0.4404
R-Qhh40M	46.4043	0.0357	-6.49	13.34	225.26	0.0245
R-DWRhh40M	33.3371	0.0957	-5.12	10.99	150.44	0.6144
R-Qvv40M	45.2304	0.3962	-6.43	13.42	226.45	-0.0208
R-DWRvv40M	44.8732	0.1592	-6.46	13.42	227.05	-0.0501

ตารางที่ 2.8 (ต่อ)

R-Qhh30M	46.3650	0.4373	-6.45	13.09	217.83	0.2655
R-DWRhh30M	38.4085	0.0219	-5.45	11.97	177.08	0.4643
R-Qvv30M	47.0294	0.0082	-5.99	13.06	211.29	0.2043
R-DWRvv30M	44.1509	0.0301	-5.72	13.41	217.43	0.0973

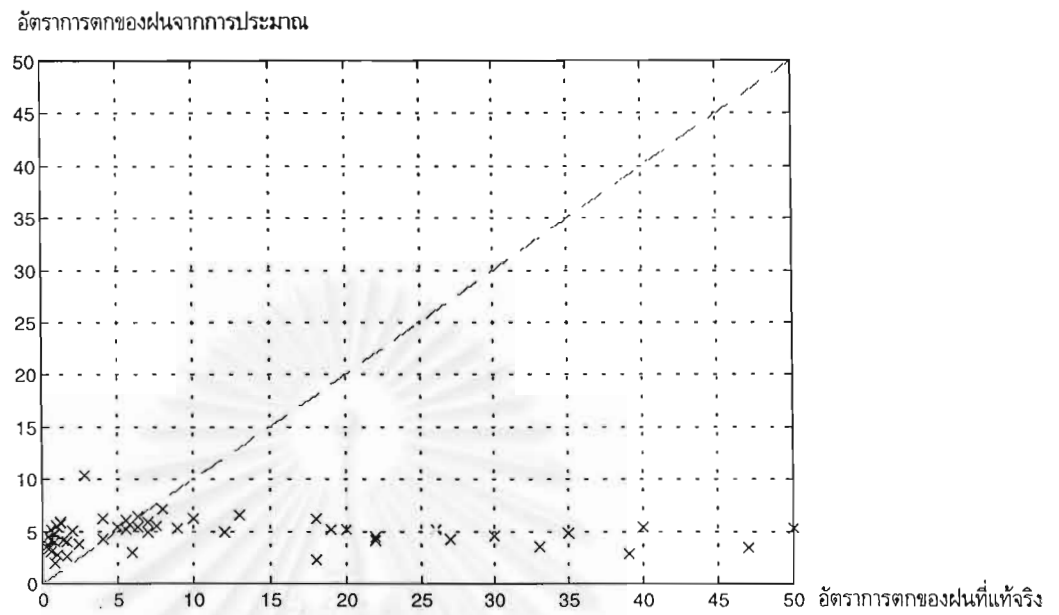
ตารางที่ 2.9 ค่าทางสถิติสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว

ขั้นตอนวิธี	Err_{max}	Err_{min}	ME	σ_{Err}	MSE	$CORR$
R-Zhh60M-Zvv60M	47.8511	0.1307	-5.60	12.85	200.85	0.2699
R-Zhh60M-Zvh60M	46.4285	0.1829	-6.32	13.13	217.39	0.1856
R-Zhh60M-Zdr60M	45.9327	0.1896	-6.10	13.43	222.57	0.0715
R-Zhh60M-LDR60M	45.9563	0.0885	-6.01	13.04	210.93	0.2097
R-Zvv60M-Zvh60M	47.8386	0.0491	-5.44	12.65	193.87	0.3210
R-Zvv60M-Zdr60M	46.9360	0.0270	-5.61	12.84	200.87	0.2701
R-Zvv60M-LDR60M	46.4975	0.1024	-5.46	12.58	192.25	0.3436
R-Zvh60M-Zdr60M	47.6163	0.5539	-5.87	13.17	212.68	0.1763
R-Zvh60M-LDR60M	43.8261	0.0630	-6.04	13.12	213.34	0.1811
R-Zdr60M-LDR60M	46.3791	0.1287	-5.41	12.77	196.79	0.2879
R-Zhh40M-Zvv40M	43.9473	0.2014	-6.10	12.91	208.52	0.2645
R-Zhh40M-Zvh40M	35.9676	0.0026	-5.57	11.59	169.21	0.5310
R-Zhh40M-Zdr40M	43.8596	0.0284	-6.12	12.90	208.73	0.2639
R-Zhh40M-LDR40M	36.1890	0.0425	-5.77	12.03	182.08	0.4903
R-Zvv40M-Zvh40M	45.9892	0.0617	-6.40	13.16	219.16	0.1825
R-Zvv40M-Zdr40M	44.1728	0.0201	-6.27	13.07	214.88	0.2172
R-Zvv40M-LDR40M	39.1619	0.0620	-5.89	12.37	192.18	0.4167
R-Zvh40M-Zdr40M	42.9055	0.0239	-6.05	12.96	209.34	0.2476
R-Zvh40M-LDR40M	36.2375	0.1924	-5.90	12.22	188.41	0.4724
R-Zdr40M-LDR40M	36.5903	0.1374	-5.86	12.33	190.54	0.4495
R-Qhh40M-DWRhh40M	30.8454	0.1700	-5.15	10.95	149.78	0.6622
R-Qhh40M-Qvv40M	45.8208	0.0831	-6.41	13.41	225.99	-0.0092

ตารางที่ 2.9 (ต่อ)

R-Qhh40M-DWRvv40M	46.0531	0.1090	-6.38	13.46	226.89	-0.0407
R-DWRhh40M-Qvv40M	35.9297	0.0287	-4.99	11.22	154.16	0.5693
R-DWRhh40M-DWRvv40M	33.8065	0.0001	-5.11	11.15	153.88	0.5867
R-Qvv40M-DWRvv40M	44.7371	0.0864	-6.36	13.48	227.36	-0.0506
R-Qhh30M-DWRhh30M	38.5453	0.4695	-4.93	10.85	145.37	0.5976
R-Qhh30M-Qvv30M	46.7883	0.0554	-5.94	13.16	213.16	0.1662
R-Qhh30M-DWRvv30M	44.4759	0.1489	-5.19	13.34	209.41	0.1926
R-DWRhh30M-Qvv30M	36.8240	0.0405	-4.23	11.14	145.09	0.5566
R-DWRhh30M-DWRvv30M	40.8422	0.0565	-5.25	12.53	188.63	0.3431
R-Qvv30M-DWRvv30M	44.9285	0.0506	-5.26	13.51	214.93	0.1157

พิจารณาตารางที่ 2.8 และ 2.9 จะเห็นว่า ความผิดพลาดสูงสุดของทุกชั้นตอนวิธีมีค่ามากกว่า 30 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และมีลักษณะเป็นการประมาณต่ำกว่าจริงทั้งหมด ส่วนความผิดพลาดต่ำสุดมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยมีทั้งการประมาณค่าต่ำกว่าจริงและเกินจริง การที่ความผิดพลาดสูงสุดมีค่ามาก เนื่องจากข้อจำกัดของชั้นตอนวิธีแบบกำลัง กล่าวคือชั้นตอนวิธีแบบกำลังไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าปัจจัยมากนัก ทำให้เกิดการประมาณอัตราการตกของฝนต่ำกว่าจริงที่อัตราการตกสูง เมื่อพิจารณาความผิดพลาดเฉลี่ย จะเห็นว่า มีค่าน้อยกว่าศูนย์ทั้งหมด คือ มีค่าอยู่ระหว่าง -6.6 กับ -4.2 ซึ่งหมายความว่าชั้นตอนวิธีทั้งหมดมีลักษณะการประมาณค่าต่ำกว่าจริง สำหรับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดมีค่าอยู่ระหว่าง 10.9 กับ 13.5 ซึ่งจะเห็นว่ามีการกระจายของความผิดพลาดค่อนข้างสูง ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าสูงสุดและต่ำสุดของความผิดพลาดต่างกันมากนั่นเอง เมื่อพิจารณาค่ากำลังสองของความผิดพลาดเฉลี่ย พบว่า ชั้นตอนวิธี R-DWRhh40M เป็นชั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวที่มีค่ากำลังสองของความผิดพลาดต่ำที่สุดเท่ากับ 150.44 และชั้นตอนวิธี R-DWRhh30M-Qvv30M เป็นชั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวที่มีค่ากำลังสองของความผิดพลาดต่ำที่สุดเท่ากับ 145.09 นอกจากนี้ชั้นตอนวิธีทั้งสองนี้ยังให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงเกินกว่า 0.5500 อีกด้วย สำหรับชั้นตอนวิธีที่ให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดคือ ชั้นตอนวิธี R-Qhh40M-DWRhh40M ซึ่งมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงถึง 0.6622 นอกจากนี้ยังมีบางชั้นตอนวิธีที่ให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าน้อยกว่าศูนย์ แสดงว่าชั้นตอนวิธีนั้นๆ ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการบอกอัตราการตกของฝน เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกของฝนที่แท้จริงกับอัตราการตกของฝนจากการประมาณ มีลักษณะตรงกันข้ามกัน โดยจะเห็นได้จากตัวอย่างในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นกราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง เมื่อใช้ชั้นตอนวิธี R-Qvv40M-DWRvv40M ซึ่งมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น -0.0506

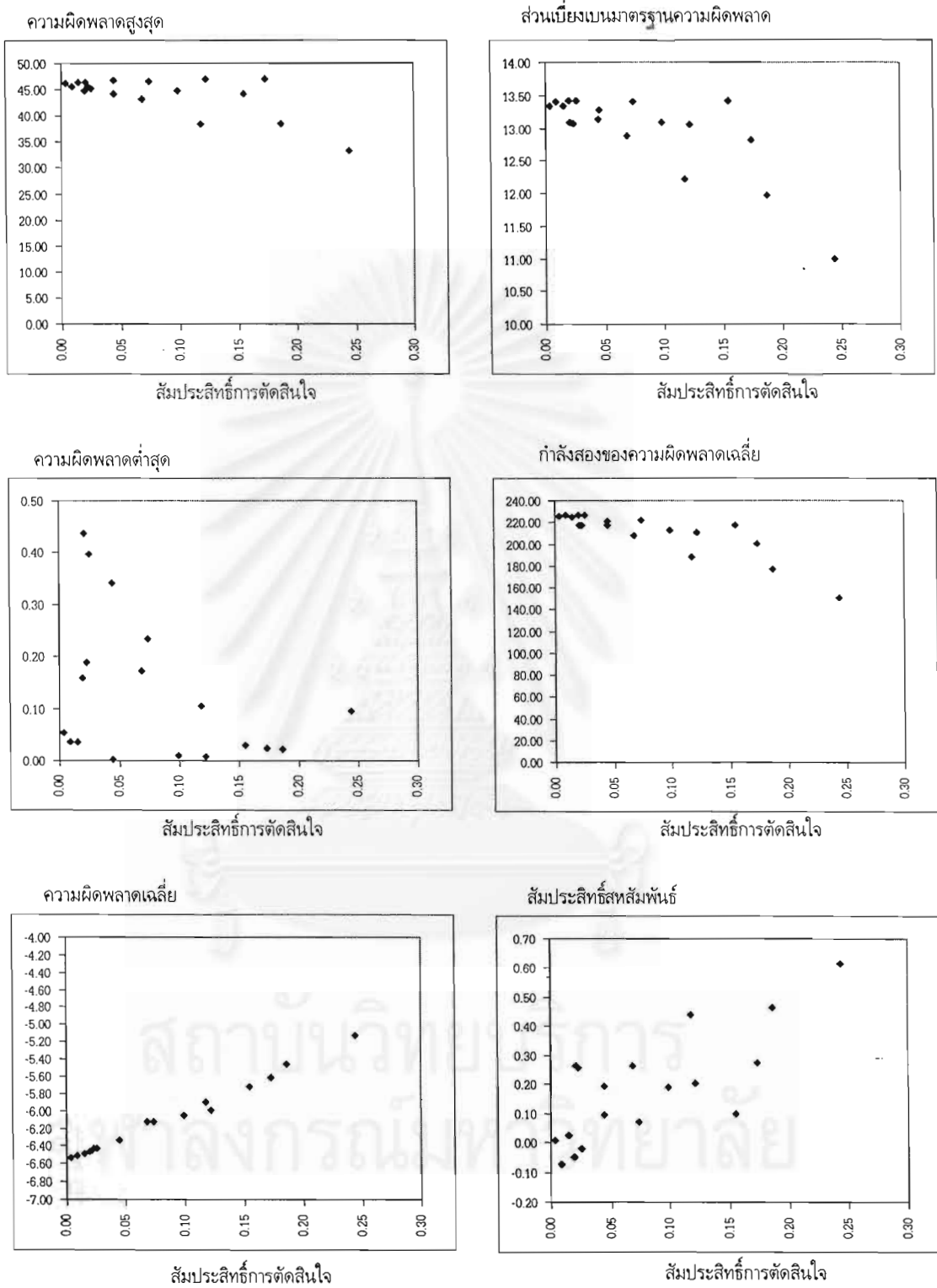


รูปที่ 2.14 กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง
สำหรับขั้นตอนวิธี R-Qvv40M-DWRvv40M

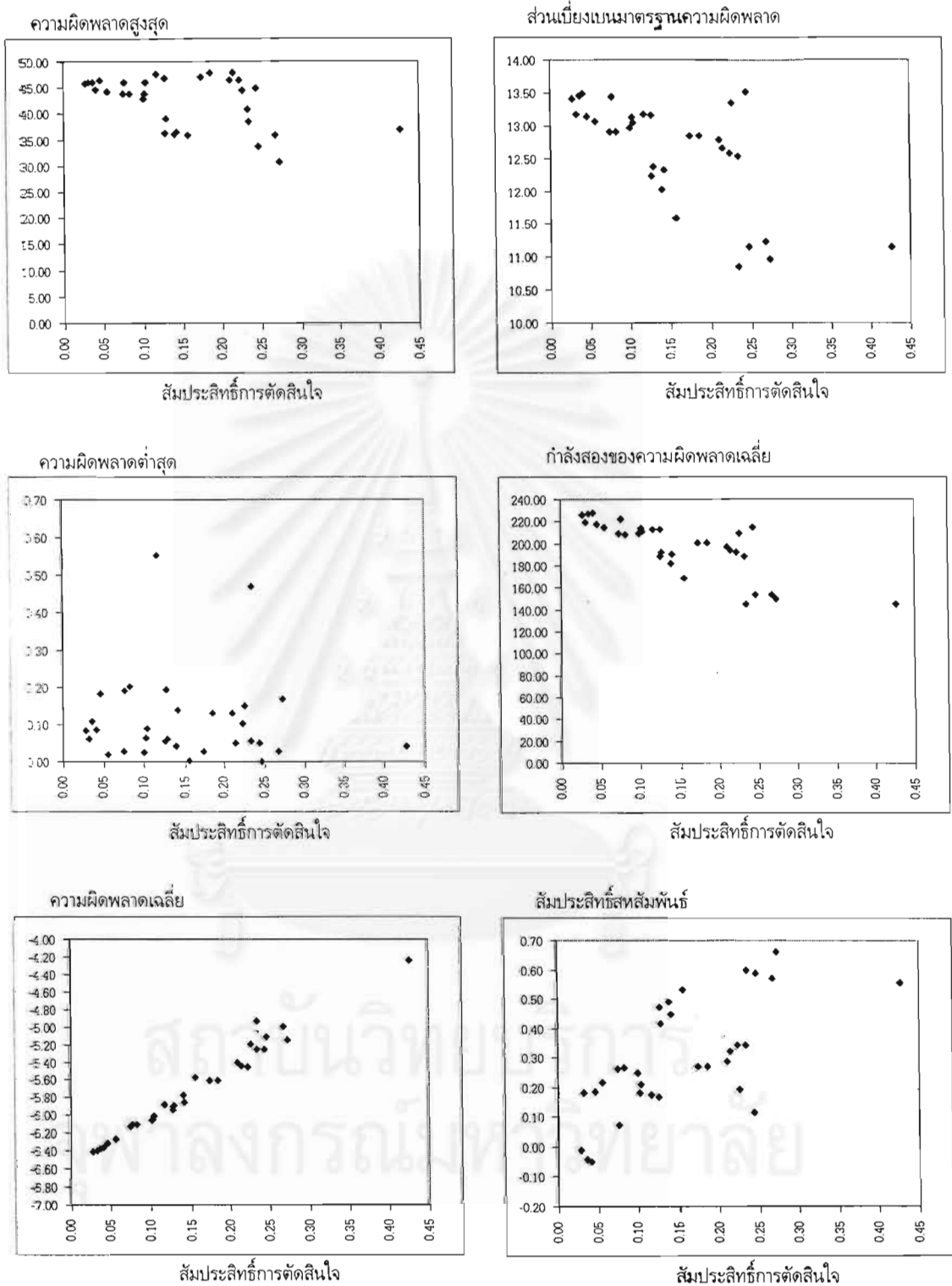
โดยเส้นประแสดงอัตราการตกของฝนจากการประมาณเท่ากับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติต่างๆ (แกนนตั้ง) กับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (แกนนอน) สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวและขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวแสดงอยู่ในรูปที่ 2.15 และ 2.16 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว

จากรูปที่ 2.15 และ 2.16 จะเห็นว่า ค่าทางสถิติที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าสูงขึ้น ได้แก่ ความผิดพลาดสูงสุด ความผิดพลาดต่ำสุด ความผิดพลาดเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดและกำลังสองของความผิดพลาดเฉลี่ย ส่วนค่าทางสถิติที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ได้แก่ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อย่างไรก็ตามขั้นตอนวิธีที่มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูง มิได้หมายความว่า ขั้นตอนวิธีนั้นจะให้ความผิดพลาดที่ต่ำกว่าขั้นตอนวิธีที่มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำเสมอไป เช่น ในกรณีของความผิดพลาดสูงสุดในรูปที่ 2.15 พบว่า เมื่อสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็น 0.1735 ซึ่งได้แก่ ขั้นตอนวิธี R-Zv60M มีความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ 46.9171 แต่ขั้นตอนวิธี R-LDR40M ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็น 0.1175 มีความผิดพลาดสูงสุดเพียง 38.4443 เป็นต้น ดังนั้นในการเลือกขั้นตอนวิธีที่ดีที่สุดสำหรับระบุอัตราการตกของฝนจึงจำเป็นต้องพิจารณาค่าปัจจัยทางสถิติเหล่านี้ทั้งหมดร่วมกัน เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.15 และ 2.16 พบว่า ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวที่ดีที่สุดได้แก่ขั้นตอนวิธี R-DWRhh40M ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.2439 ส่วนขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวที่ดีที่สุดได้แก่ขั้นตอนวิธี R-Qhh40M-DWRhh40M ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็น 0.2726 อย่างไรก็ตามขั้นตอนวิธีทั้งสองนี้ยังมีความผิดพลาดค่อนข้างสูงเมื่ออัตราการตกของฝนมากกว่า 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง การปรับปรุงสมรรถนะของขั้นตอนวิธีเหล่านี้ให้สามารถบอกอัตราการตกของฝนให้แม่นยำขึ้น กระทำโดยการหาตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ (multiplicative adjustment factor : F) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

การหาตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน

การที่อัตราการตกของฝนจากการประมาณมีความแตกต่างจากอัตราการตกของฝนที่แท้จริงค่อนข้างมากเมื่ออัตราการตกของฝนมากกว่า 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจาก การวัดอัตราการตกของฝนด้วยถังวัดน้ำฝนและเรดาร์พัลส์สังเคราะห์มีความแตกต่างของพื้นที่สุ่มตัวอย่าง กล่าวคือ สำหรับถังวัดน้ำฝนซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว คิดเป็นพื้นที่สุ่มตัวอย่างประมาณ 3.24 ตารางเมตร ส่วนการวัดอัตราการตกของฝนด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ การเฉลี่ยค่าปัจจัยต่างๆ กระทำที่ระยะ 4-6 เมตร ซึ่งคิดเป็นพื้นที่สุ่มตัวอย่างประมาณ 6.30 ตารางเมตร (คิดเฉพาะภายในความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศเท่านั้น) จากความแตกต่างของพื้นที่สุ่มตัวอย่างดังกล่าว ปริมาณน้ำฝนที่ผ่านพื้นที่สุ่มตัวอย่างทั้งสองจึงไม่เท่ากัน ส่งผลให้การวัดอัตราการตกของฝนด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์เกิดการประมาณต่ำกว่าจริงเมื่ออัตราการตกของฝนสูงขึ้น

การปรับปรุงขั้นตอนให้มีสมรรถนะยิ่งขึ้นในการบอกอัตราการตกของฝนกระทำโดยการหาตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ (F) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างผลรวมของอัตราการตกของฝนที่แท้จริงกับผลรวมของอัตราการตกของฝนจากการประมาณ ตามสมการ (2.33) (H. Sauvageot, 1992)

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{\sum_{i=1}^N R_i} \quad (2.33)$$

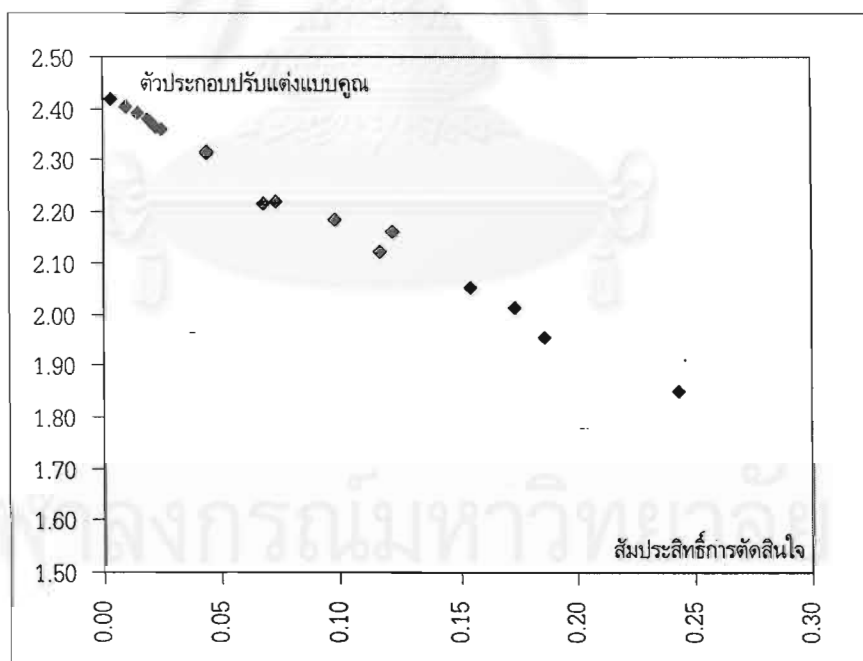
โดย G_i เป็นอัตราการตกของฝนที่แท้จริง และ R_i เป็นอัตราการตกของฝนจากการประมาณ

เมื่อใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณกับขั้นตอนวิธีแบบกำลัง สามารถเขียนขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวและขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวได้ตามสมการ (2.34) และ (2.35) ตามลำดับ

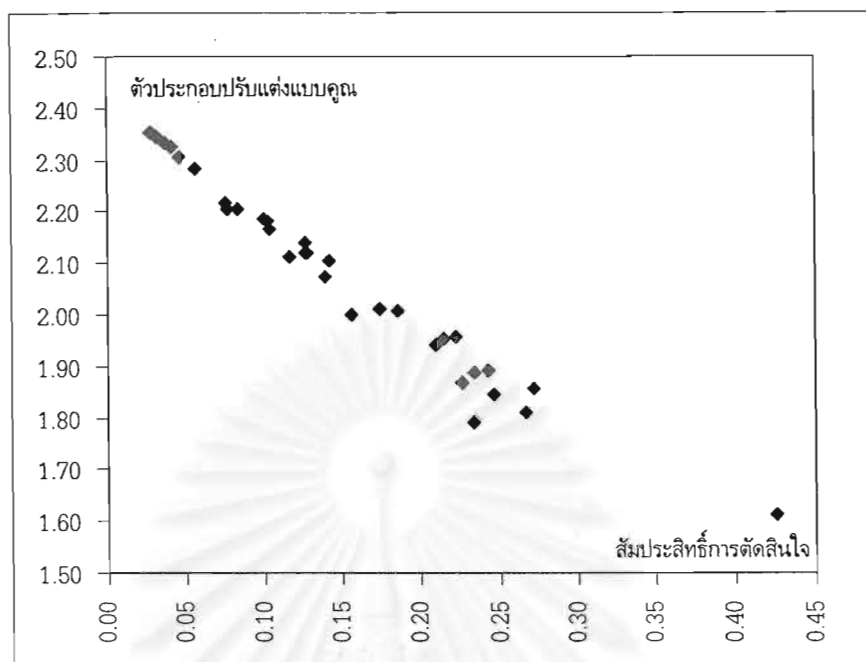
$$R = F \times \alpha X^\beta = \alpha_1 X^\beta \quad (2.34)$$

$$R = F \times a X_1^b X_2^c = a_1 X_1^b X_2^c \quad (2.35)$$

ผลการหาตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวและขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวแสดงอยู่ในรูปที่ 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ โดยแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าสูงขึ้น และมีค่าอยู่ระหว่าง 1.60 กับ 2.42



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว

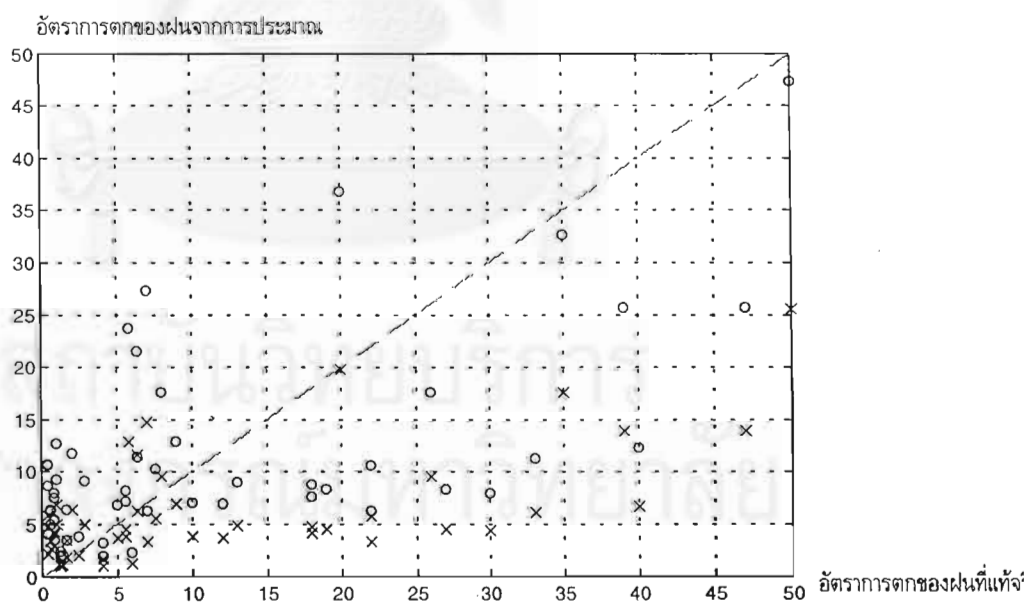
จากหัวข้อที่แล้ว ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวที่ดีที่สุด คือ R-DWRhh40M และ ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวที่ดีที่สุด คือ R-Qhh40M-DWRhh40M ซึ่งขั้นตอนวิธีทั้งสองนี้มีตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเป็น 1.8495 และ 1.8571 ตามลำดับ เมื่อใช้ขั้นตอนวิธีทั้งสองนี้ร่วมกับตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเพื่อคำนวณอัตราการตกของฝนจากการประมาณ จากนั้นหาค่าทางสถิติต่างๆ เพื่อพิจารณาสมรรถนะของขั้นตอนวิธีทั้งสอง สำหรับการเปรียบเทียบค่าทางสถิติต่างๆ ของขั้นตอนวิธีทั้งสองในกรณีที่ไม่ใช้และใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณแสดงอยู่ในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ไม่ใช้และใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ

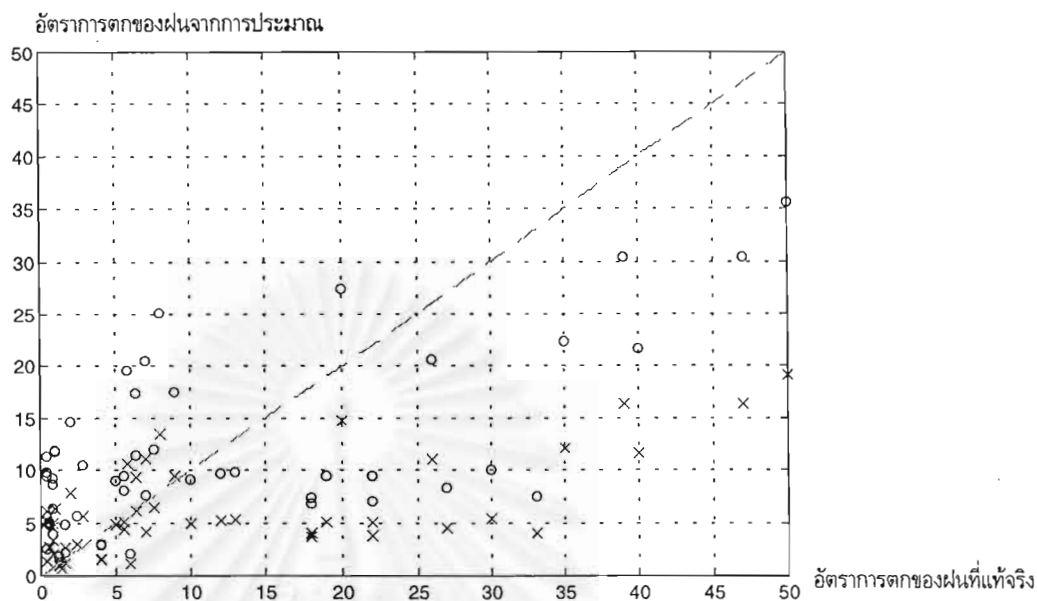
ขั้นตอนวิธี	Err_{max}	Err_{min}	ME	σ_{Err}	MSE	$CORR$
R-DWRhh40M	33.3371	0.0957	-5.12	10.99	150.44	0.6144
R-DWRhh40M ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ	27.6769	0.6362	-0.0001	10.58	114.14	0.6144
R-Qhh40M-DWRhh40M	30.8454	0.1700	-5.15	10.95	149.78	0.6622
R-Qhh40M-DWRhh40M ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ	25.5050	0.1444	-0.0002	10.02	102.39	0.6622

พิจารณาจากตารางที่ 2.10 จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่ไม่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ พบว่าขั้นตอนวิธี R-Qhh40M-DWRhh40M มีสมรรถนะที่เหนือกว่าขั้นตอนวิธี R-DWRhh40M แต่เมื่อมีการใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณร่วมกับขั้นตอนวิธีทั้งสองแล้ว ขั้นตอนวิธีทั้งสองมีความผิดพลาดสูงสุดต่ำลง แต่ความผิดพลาดต่ำสุดสูงขึ้นเล็กน้อย ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดมีค่าประมาณศูนย์ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดก็มีค่าลดลง นอกจากนี้ค่ากำลังสองของความผิดพลาดเฉลี่ยก็มีค่าลดลงด้วย และยังสังเกตได้อีกด้วยว่า ขั้นตอนวิธี R-Qhh40M-DWRhh40M มีความผิดพลาดลดลงมากกว่าขั้นตอนวิธี R-DWRhh40M โดยมีได้ทำให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เปลี่ยนแปลงไปเลย

กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง เพื่อเปรียบเทียบขั้นตอนวิธี R-DWRhh40M และ R-Qhh40M-DWRhh40M เมื่อไม่ใช้และใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ แสดงอยู่ในรูปที่ 2.19 และ 2.20 ซึ่งจะเห็นได้ว่า การใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณทำให้เกิดการประมาณอัตราการตกของฝนที่ระดับต่ำ (อัตราการตกของฝนน้อยกว่า 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) เกินจริงมากขึ้น แต่ก็ช่วยให้การประมาณอัตราการตกของฝนที่ระดับสูง (อัตราการตกของฝนมากกว่า 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) มีค่าใกล้เคียงกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริงมากขึ้นด้วย จากผลดังกล่าวจึงมีแนวคิดที่จะใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเฉพาะช่วง โดยจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.19 กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง สำหรับขั้นตอนวิธี R-DWRhh40M ในกรณีที่ไม่ใช้ (x) และใช้ (o) ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ โดยเส้นประแสดงอัตราการตกของฝนจากการประมาณเท่ากับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง



รูปที่ 2.20 กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง สำหรับขั้นตอนวิธี R-Qhh40M-DWRhh40M ในกรณีที่ไม่ใช้ (x) และใช้ (o) ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ โดยเส้นประแสดงอัตราการตกของฝนจากการประมาณเท่ากับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง

การใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเฉพาะช่วง

ด้วยเหตุที่ว่า ความแตกต่างของพื้นที่สัมผัสตัวอย่างระหว่างการวัดอัตราการตกของฝนด้วยถังวัดน้ำฝนกับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ที่เกิผลกระทบต่อการระบุอัตราการตกของฝนอย่างเด่นชัดเมื่ออัตราการตกของฝนสูงกว่า 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยทำให้การระบุอัตราการตกของฝนต่ำกว่าจริง สำหรับที่อัตราการตกของฝนต่ำกว่า 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงการระบุอัตราการตกของฝนค่อนข้างถูกต้อง ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเฉพาะช่วงที่อัตราการตกของฝนเกินกว่า 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงเท่านั้น

พิจารณาขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวที่ดีที่สุดซึ่งได้แก่ R-DWRhh40M เมื่ออัตราการตกของฝนที่แท้จริงเป็น 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ทำให้ค่าปัจจัย DWRhh40M มีค่าเป็น 0.36 และในทำนองเดียวกันสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวที่ดีที่สุดซึ่งได้แก่ R-Qhh40M-DWRvv40M เมื่ออัตราการตกของฝนที่แท้จริงเป็น 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัย Qhh40M กับ DWRvv40M เป็นไปตามเงื่อนไข $(Qhh40M)^{-55.9054} (DWRhh40M)^{-0.9824}$ มีค่าเท่ากับ 2.43 จากขอบเขตเมื่ออัตราการตกของฝนเป็น 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงของขั้นตอนวิธีทั้งสอง ทำให้สามารถเขียนขั้นตอนวิธีทั้งสองนี้โดยมีเงื่อนไขการใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณดังนี้

สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว

$$\begin{aligned} R &= 3.7887DWRhh40M^{-0.9510} \text{ เมื่อ } DWRhh40M \leq 0.36 \\ R &= 7.0072DWRhh40M^{-0.9510} \text{ เมื่อ } DWRhh40M > 0.36 \end{aligned} \quad (2.36)$$

สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว

$$\begin{aligned} R &= 4.1117Qhh40M^{-55.9054} DWRhh40M^{-0.9824} \\ &\text{เมื่อ } Qhh40M^{-55.9054} DWRhh40M^{-0.9824} \leq 2.43 \\ R &= 7.6359Qhh40M^{-55.9054} DWRhh40M^{-0.9824} \\ &\text{เมื่อ } Qhh40M^{-55.9054} DWRhh40M^{-0.9824} > 2.43 \end{aligned} \quad (2.37)$$

เมื่อใช้ขั้นตอนวิธีในสมการ (2.36) และ (2.37) หาอัตราการตกของฝนจากการประมาณแล้วหาค่าทางสถิติต่างๆ ซึ่งค่าทางสถิติเหล่านี้แสดงอยู่ในตารางที่ 2.11 จากผลดังกล่าว เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.10 พบว่าการใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณเฉพาะช่วง ทำให้ขั้นตอนวิธีทั้งสองนี้มีสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนในภาพรวมดีขึ้น โดยจะเห็นได้จากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของขั้นตอนวิธีทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้น และกำลังสองของความผิดพลาดเฉลี่ยรวมทั้งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดมีค่าลดลง ส่วนค่าทางสถิติอื่นๆ มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

ตารางที่ 2.11 สมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณเฉพาะช่วง

ขั้นตอนวิธี	Err_{\max}	Err_{\min}	ME	σ_{Err}	MSE	$CORR$
R-DWRhh40M ตามสมการ (2.36)	27.6769	0.1465	-0.92	10.28	108.61	0.6374
R-Qhh40M-DWRhh40M ตามสมการ (2.37)	28.9642	0.1700	-2.94	9.74	105.74	0.6833

สรุป

การวัดการสะท้อนเป็นการวัดแบบหนึ่งที่ใช้ในการวัดอัตราการตกของฝนซึ่งระบบวัดที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปได้แก่ระบบเรดาร์สำหรับวัดอัตราการตกของฝน แต่เดิมระบบเรดาร์แบบนี้ใช้หลักการของเรดาร์แบบพัลส์ ต่อมามีการพัฒนาโดยอาศัยสมบัติการเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นและการขึ้นกับความถี่ของการลดทอนกำลังคลื่นเนื่องจากฝน ทำให้เกิดระบบวัดอัตราการตกของฝนด้วยเรดาร์โพลาไรเซชันและเรดาร์สองความถี่ขึ้น ส่งผลให้การระบุอัตราการตกของฝนด้วยเรดาร์มีความถูกต้องแม่นยำขึ้น อย่างไรก็ตามเรดาร์ทั้งสองชนิดนี้ทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนของระบบเพิ่มมากขึ้นและอาจทำให้เกิดความผิดพลาดบางประการรวมเข้าไปด้วย ในส่วนของกรวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่นั้น ผู้วิจัยได้เสนอ เรดาร์พัลส์สังเคราะห์ ซึ่งเป็นการอาศัยหลักการแปลงกลับฟูริเยร์ของสัญญาณเชิงความถี่ให้เป็นสัญญาณเชิงเวลา ทำให้สามารถหาค่าปัจจัยของเรดาร์โพลาไรเซชันและเรดาร์สองความถี่ได้พร้อมกัน โดยในบทนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับหลักการและทฤษฎีของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ การใช้เรดาร์พัลส์สังเคราะห์ในการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ การหาค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ ผลการวัดทั้งกรณีอากาศปลอดโปร่งและกรณีฝนตก ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนและการหาขั้นตอนวิธี รวมทั้งการตรวจสอบขั้นตอนวิธีที่ทำได้ นอกจากนี้ยังหาตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณ เพื่อช่วยให้การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นขั้นตอนวิธีแบบกฎกำลัง โดยแบ่งเป็นสองชนิด คือ ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวและขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว โดยขั้นตอนวิธีที่ดีที่สุดสำหรับบอกอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ ได้แก่ R-DWRhh40M ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว และ R-Qhh40M-DWRhh40M ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว การใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณร่วมกับขั้นตอนวิธีทั้งสองเมื่ออัตราการตกของฝนสูงกว่า 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เป็นการปรับปรุงสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ กล่าวคือช่วยลดความผิดพลาดในการระบุอัตราการตกของฝนที่อัตราการตกของฝนสูงกว่า 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนวิธีทั้งสองที่รวมตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณเฉพาะช่วงแล้วสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์แบบมีเงื่อนไขได้ดังนี้

$$R = 3.7887DWRhh40M^{-0.9510} \quad \text{เมื่อ } DWRhh40M \leq 0.36$$

$$R = 7.0072DWRhh40M^{-0.9510} \quad \text{เมื่อ } DWRhh40M > 0.36$$

และ

$$R = 4.1117Qhh40M^{-55.9054}DWRhh40M^{-0.9824} \quad \text{เมื่อ } Qhh40M^{-55.9054}DWRhh40M^{-0.9824} \leq 2.43$$

$$R = 7.6359Qhh40M^{-55.9054}DWRhh40M^{-0.9824} \quad \text{เมื่อ } Qhh40M^{-55.9054}DWRhh40M^{-0.9824} > 2.43$$

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงการวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดแบบสะท้อน นอกจากวิธีวัดดังกล่าวนี้แล้วยังมีการวัดอัตราการตกของฝนอีกวิธีหนึ่งได้แก่การวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการส่งผ่าน โดยจะกล่าวถึงในบทถัดไป

บทที่ 3

การวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการส่งผ่าน

ความนำทั่วไป

เมื่อเกิดฝนตก หยดน้ำฝนที่กระจายอยู่ในบรรยากาศมีสมบัติสะท้อนคลื่นวิทยุที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงหรือเล็กกว่าหยดน้ำฝนได้ และเนื่องจากหยดน้ำฝนมีได้มีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ดังนั้นจึงมีคลื่นบางส่วนสามารถแพร่กระจายผ่านฝนไปได้ด้วยเช่นกัน คลื่นที่แพร่กระจายผ่านฝนไปนั้นจะถูกลดทอนกำลังบางส่วนเนื่องจากการดูดกลืนของหยดน้ำฝน โดยการลดทอนดังกล่าวนี้จะเกิดมากหรือน้อยขึ้นกับขนาดของหยดน้ำฝนและความยาวคลื่นของคลื่นวิทยุ นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงเฟสของคลื่นเกิดขึ้นอีกด้วย ปริมาณการลดทอนกำลังและการเปลี่ยนแปลงเฟสของคลื่นวิทยุเมื่อแพร่กระจายผ่านฝนนี้ จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปขึ้นกับอัตราการตกของฝน ดังนั้นจึงสามารถวัดอัตราการตกของฝนด้วยวิธีการวัดการส่งผ่านได้ ทั้งนี้จะต้องเลือกความถี่ของคลื่นวิทยุให้เหมาะสมด้วย

ระบบมาตรวิทยุ (radiometric system) เป็นระบบวัดแบบส่งผ่านซึ่งใช้คลื่นวิทยุในการสังเกตการณ์บรรยากาศของโลก อาทิ การวัดปริมาณไอน้ำหรือก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดพลังงานที่อยู่ภายนอกบรรยากาศของโลก โดยอาจเป็นแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ เช่น ดวงอาทิตย์หรืออาจเป็นแหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งได้แก่ ดาวเทียม สำหรับวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์จากดาวเทียมคือการติดต่อสื่อสาร แต่คุณภาพของสัญญาณที่รับได้จะขึ้นกับการลดทอนกำลังเนื่องจากบรรยากาศที่อยู่ภายในเส้นทางระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับ สำหรับฝนเป็นปรากฏการณ์ตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นอยู่เสมอและทำให้บรรยากาศมีหยดน้ำกระจายอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งหยดน้ำฝนเหล่านี้ทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความถี่ปฏิบัติการอยู่ในย่านสูงกว่า 10 GHz ส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณที่รับได้ด้อยลงไป อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาในทางกลับกัน สัญญาณจากดาวเทียมที่แพร่กระจายผ่านฝนสามารถให้ข้อมูลบางประการเกี่ยวกับฝนได้ ดังนั้น จึงมีแนวคิดที่จะใช้ระบบมาตรวิทยุซึ่งใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณจากดาวเทียมเพื่อระบุอัตราการตกของฝน

ระบบมาตรวิทยุ เป็นการวัดการดูดกลืนกำลังคลื่นหรือการลดทอนสัญญาณเนื่องจากตัวกลางที่พิจารณาในรูปของอุณหภูมิความสว่าง (brightness temperature) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิกายภาพ (physical temperature) ของตัวกลางนั้นด้วย นอกจากนี้ยังมีการวัดปริมาณการเลื่อนเฟสของคลื่นที่เกิดขึ้นอีกด้วย การใช้ระบบมาตรวิทยุในการวัดอัตราการตกของฝน หมายถึง การหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกของฝนกับอุณหภูมิความสว่างหรือปริมาณการเลื่อนเฟสนี้ ซึ่งสามารถกระทำได้สองแนวทาง คือการ

จำลองเหตุการณ์การตกของฝนและการวัดขณะฝนตกจริง หรือกระทำทั้งสองแนวทางเพื่อตรวจสอบซึ่งกันและกัน และได้มีการพัฒนาระบบมาตรวิทยุสำหรับวัดอัตราการตกของฝน โดยใช้คลื่นหลายความถี่ประกอบกัน และใช้ประโยชน์จากการเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นเนื่องจากฝนด้วย สำหรับการวัดอัตราการตกของฝนด้วยระบบมาตรวิทยุนี้มีผู้ศึกษาวิจัยมากมาย อาทิ Smirnov, Evtushenko, Kutuza, et al. (1993) ใช้ระบบมาตรวิทยุที่ความยาวคลื่น 0.3 0.8 1.35 และ 2.25 เซนติเมตร ในโครงการ CLEOPATRA เพื่อประมาณอัตราการตกของฝน คณะผู้วิจัยได้จำลองเหตุการณ์การตกของฝนเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความสว่างกับอัตราการตกของฝนสำหรับทุกความยาวคลื่นที่ใช้ ผลการจำลองเหตุการณ์แสดงให้เห็นว่า สำหรับคลื่นที่ความยาวคลื่นสั้น จะทำให้อุณหภูมิความสว่างมีการอ้อมตัวที่อัตราการตกของฝนต่ำจึงไม่เหมาะที่จะใช้ในการวัดอัตราการตกของฝน ส่วนคลื่นที่มีความยาวคลื่น 2.25 เซนติเมตร จะสามารถใช้วัดอัตราการตกของฝนได้ตั้งแต่ 0 - 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยไม่เกิดการอ้อมตัวของอุณหภูมิความสว่าง นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการวัดจริงด้วย จากผลการวัด พบว่า อัตราการตกของฝนที่วัดได้จากมาตรวิทยุที่ความยาวคลื่น 2.25 เซนติเมตร มีการประมาณค่าเกินจริงเมื่อเทียบกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง นอกจากนี้ ยังคำนวณอุณหภูมิสว่างผลต่าง (differential brightness temperature) ที่ความยาวคลื่น 2.25 เซนติเมตรเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดจริงซึ่งผลทั้งสองมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การใช้อุณหภูมิความสว่างผลต่างช่วยให้การระบุอัตราการตกของฝนมีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น และมีการสนับสนุนข้อสรุปดังกล่าวโดย Hornbostel, Schroth, Kutuza et al. (1997) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สามารถใช้อุณหภูมิความสว่างผลต่างเพื่อหาค่าปัจจัยที่เกี่ยวกับการกระจายขนาดอนุภาคฝน จึงเป็นการช่วยให้การระบุอัตราการตกของฝนมีความถูกต้องยิ่งขึ้น นอกจากนี้ Rincon, Bidwell, Jameson et al (1996) นำเสนอการวัดอัตราการตกของฝนด้วยข่าย-เชื่อมโยงไมโครเวฟซึ่งมีระยะระหว่างสายอากาศส่งและรับเป็น 2 กิโลเมตรโดยวัดทั้งการลดทอนกำลังคลื่นและการเลื่อนเฟสที่ความถี่ 8.35 GHz (V) 8.45 GHz (H) 25.35 GHz และ 38.025 GHz คณะผู้วิจัยได้นำเสนอ ค่าปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ผลต่างของการลดทอนที่ความถี่ 38.025 GHz และ 8.45 GHz ผลต่างของการลดทอนที่ความถี่ 25.35 GHz และ 8.45 GHz และการเลื่อน-เฟสผลต่างที่ความถี่ 8 GHz เพื่อระบุอัตราการตกของฝน แต่ยังไม่มีการวัดจริงเพื่อตรวจสอบ

อย่างไรก็ตาม ยังมีคณะผู้วิจัยอีกกลุ่มหนึ่งนำเสนอการวัดอัตราการตกของฝนด้วยค่าปัจจัยที่ไม่ขึ้นกับการกระจายขนาดของอนุภาคฝน ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนมีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างอัตราการตกของฝนกับค่าปัจจัยนั้น เช่น Atlas และ Ulbrich (อ้างจาก Ruf, Aydin and Mathur et al. 1994) เสนอการลดทอนสัญญาณที่ความถี่ 35 GHz ส่วน Hardaker, Holt และ Goddard (1997) เสนอผลต่างของการลดทอนที่ความถี่ 19.77 GHz และ 12.502 GHz โดยที่คณะผู้วิจัยได้จำลองการกระจายขนาดของอนุภาคฝนเป็นแบบต่างๆ เพื่อแสดงให้เห็นว่าค่าปัจจัยที่เสนอนั้นไม่ขึ้นกับการกระจาย

อนุภาคฝนจริง และมีการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยนี้กับอัตราการตกของฝนเพื่อประมาณอัตราการตกของฝนจากการวัดจริงอีกด้วย ซึ่งผลการวัดที่ได้ก็มีความสอดคล้องกับอัตราการตกที่แท้จริงดีพอสมควร

หลักการและทฤษฎีของการวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการส่งผ่าน

เมื่อคลื่นแพร่กระจายผ่านบริเวณที่เกิดฝนตกจะเกิดปรากฏการณ์สองประการ ได้แก่ การดูดกลืนกำลังคลื่นและการกระเจิงคลื่น โดยจะเกิดปรากฏการณ์ใดจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นกับความถี่ของคลื่น กล่าวคือ คลื่นที่มีความถี่ในช่วง 1-30 GHz หรือมีความยาวคลื่นเป็นเซนติเมตร มีสมบัติการดูดกลืนกำลังคลื่นมากกว่าสมบัติการกระเจิงคลื่น (Hogg, 1989) ดังนั้นการใช้คลื่นความถี่ช่วงนี้ในการวัดอัตราการตกของฝนจึงต้องวัดการดูดกลืนกำลังคลื่น ในทางกลับกันคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า 30 GHz จะมีสมบัติการกระเจิงคลื่นมากกว่าสมบัติการดูดกลืนคลื่น จึงต้องใช้การวัดการกระเจิงเพื่อวัดอัตราการตกของฝน (Hornbostel, Schroth, Kutuza et al, 1997) สำหรับในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะระบบวัดแบบส่งผ่านที่ใช้คลื่นที่มีความยาวคลื่นเป็นเซนติเมตรเท่านั้น

ระบบวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการส่งผ่านที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ระบบมาตรวิทยุ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ระบบมาตรวิทยุแบบดั้งเดิม (conventional radiometric system) และระบบมาตรวิทยุชนิดพิเศษ (advanced radiometric system) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ระบบมาตรวิทยุแบบดั้งเดิม

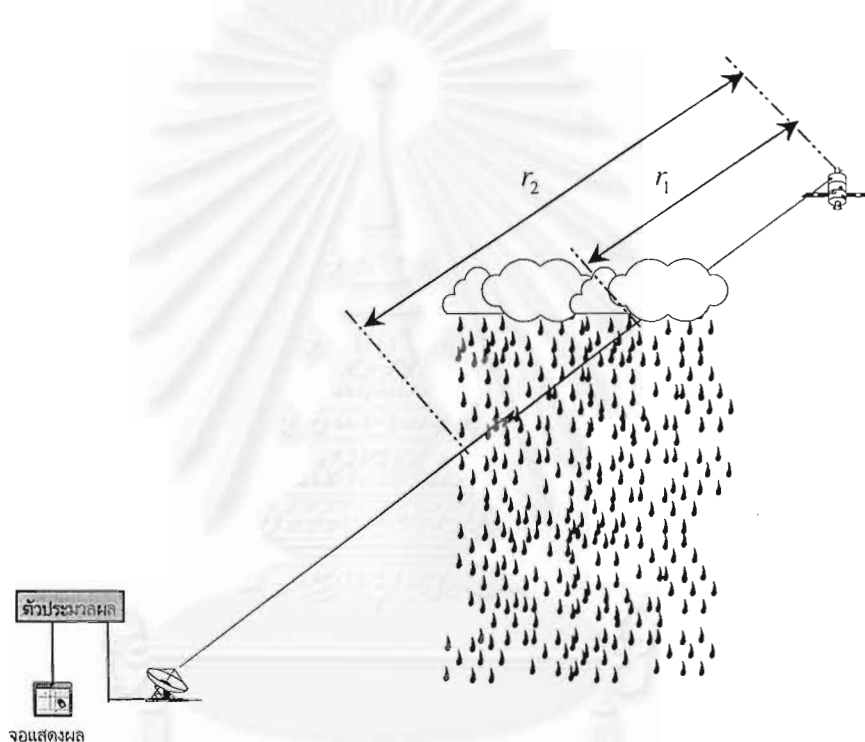
ระบบมาตรวิทยุ เป็นการวัดการดูดกลืนกำลังคลื่นเนื่องจากอนุภาคต่างๆ ที่อยู่ในบรรยากาศในรูปของอนุกรมุมีความสว่าง สำหรับการวัดอัตราการตกของฝนด้วยระบบมาตรวิทยุ อนุภาคในบรรยากาศในที่นี้หมายถึง หยอดน้ำฝนนั่นเอง สำหรับหลักการของระบบมาตรวิทยุที่ใช้ในการวัดอัตราการตกของฝนแสดงอยู่ในรูปที่ 3.1 ซึ่งมีดาวเทียมทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน ส่วนสายอากาศรับรวมทั้งส่วนประมวลผลและแสดงผลอยู่ที่สถานีภาคพื้นดิน

อนุกรมุมีความสว่าง (TB) มีความสัมพันธ์กับการดูดกลืนกำลังคลื่นเนื่องจากฝนตามสมการ (3.1) (Hogg, 1989)

$$TB = \bar{T}(1 - e^{-\alpha_n(r_2 - r_1)}) \quad (3.1)$$

โดย T เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดบริเวณที่ฝนตกในหน่วยเคลวิน α_a เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกำลังคลื่น เนื่องจากฝนในหน่วยจำนวนเท่าต่อระยะทาง และระยะ $r_2 - r_1$ หมายถึงความหนาของบริเวณที่เกิดฝนในเส้นทางระหว่างสายอากาศส่งและรับ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

จากสมบัติของคลื่นที่มีความยาวคลื่นเป็นเซนติเมตรที่ว่าการดูดกลืนคลื่นเด่นชัดกว่าการกระเจิงคลื่นอย่างมาก การลดทอนกำลังของคลื่นจึงเกิดจากการดูดกลืนคลื่นเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การลดทอนจึงมีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมาก และสามารถใช้แทนกันได้สำหรับคลื่นในย่านความถี่นี้



รูปที่ 3.1 หลักการของระบบมาตรวิทยุสำหรับวัดอัตราการตกของฝน

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความสว่างกับอัตราการตกของฝนมักจะแสดงอยู่ในรูปขั้นตอนวิธีแบบกฎกำลัง อย่างไรก็ตามการวัดอัตราการตกของฝนด้วยระบบมาตรวิทยุจำเป็นต้องเลือกความถี่ที่เหมาะสม กล่าวคือ เมื่อความถี่สูงขึ้นอุณหภูมิความสว่างสูงสุดจะมีค่าสูงขึ้นด้วย ทำให้อาจเกิดการอ้อมตัวของอุณหภูมิความสว่าง ส่งผลให้อุณหภูมิความสว่างจะไม่ขึ้นกับอัตราการตกของฝนอีกต่อไป ในทางตรงกันข้ามหากใช้คลื่นความถี่ต่ำเกินไป อาจทำให้อุณหภูมิความสว่างต่ำเกินไปจนไม่สามารถวัดได้ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความหนาของบริเวณที่เกิดฝนอีกด้วย เช่น คลื่นความถี่ 6 GHz สามารถวัดอัตราการตกของฝนได้ถึง 100 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงโดยไม่เกิดการอ้อมตัว เมื่อความหนาของบริเวณที่เกิดฝนเป็น 10 กิโลเมตร (Hogg, 1989)

และอาจใช้ความถี่ได้ถึง 13 GHz ทิศทางความหนาของบริเวณที่เกิดฝนลดลงเหลือ 2.5 กิโลเมตร (Hornbostel, Schroth, Kutuza et al, 1997) เป็นต้น

ปัญหาสำคัญของระบบมาตรวิทยุ คือ การหาความหนาของบริเวณที่เกิดฝนตกตามเส้นทางระหว่างสายอากาศส่งและรับ ซึ่งหากมีความคลาดเคลื่อนของความหนาของบริเวณที่เกิดฝนตกดังกล่าวเกิดขึ้นแล้ว จะส่งผลต่ออุณหภูมิความสว่างที่คำนวณได้อีกด้วย โดยทั่วไปแล้ว การหาความหนาของบริเวณที่เกิดฝนตกอาจทำได้โดยการใช้เรดาร์เพื่อหาขอบเขตบริเวณของฝนซึ่งจะทำให้ระบบมาตรวิทยุมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น การลดความซับซ้อนดังกล่าวอาจทำได้โดยการประมาณความหนาของบริเวณที่เกิดฝนตกจากมุมเงยของสายอากาศกับความสูงของกลุ่มเมฆฝน นอกจากนี้สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกประการหนึ่งคือความแม่นยำของอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดบริเวณที่เกิดฝนตก ซึ่งมีผลต่อความแม่นยำของการคำนวณอุณหภูมิความสว่างเช่นกัน นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนของการประมาณขอบเขตบริเวณของฝนและอุณหภูมิเฉลี่ยของฝนแล้ว ยังมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการแปรเปลี่ยนของสิ่งต่างๆ ที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งได้แก่ กลุ่มเมฆ ไอน้ำ และก๊าซต่างๆ กล่าวคือ เส้นทางที่คลื่นเดินทางจากสายอากาศส่งมายังสายอากาศรับจะต้องผ่านชั้นบรรยากาศของโลก ซึ่งประกอบด้วย กลุ่มเมฆ ไอน้ำ และก๊าซต่างๆ และสิ่งเหล่านี้มีการแปรเปลี่ยนตลอดเวลา ทำให้สัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศรับได้รับผลกระทบจากการแปรเปลี่ยนของสิ่งต่างๆ เหล่านี้

2. ระบบมาตรวิทยุชนิดพิเศษ

ด้วยเหตุผลที่ว่า ระบบมาตรวิทยุแบบดั้งเดิมยังมีความคลาดเคลื่อนในการระบุอัตราการตกของฝน ทำให้มีการพัฒนาระบบมาตรวิทยุ โดยเพิ่มความสามารถเกี่ยวกับโพลาไรเซชันและการใช้คลื่นหลายความถี่ นอกจากนี้ ก็มีแนวคิดที่ใช้ค่าปัจจัยเกี่ยวกับเฟสของสัญญาณ เช่น การเลื่อนเฟสผลต่าง ผลต่างของการเลื่อนเฟสของคลื่นสองความถี่เพื่อบอกอัตราการตกของฝน รายละเอียดของระบบมาตรวิทยุชนิดพิเศษเป็นดังต่อไปนี้

2.1 ระบบมาตรวิทยุโพลาไรเซชัน

คลื่นที่แพร่กระจายผ่านฝนจะเกิดการเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นไปอยู่เสมอ ดังนั้นจึงพัฒนาระบบมาตรวิทยุให้มีความสามารถทางโพลาไรเซชัน กล่าวคือ สามารถวัดสัญญาณในแต่ละคู่โพลาไรเซชันได้ ทำให้มีค่าปัจจัยเพื่อใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนเพิ่มขึ้น ค่าปัจจัยเหล่านี้ได้แก่

- อุณหภูมิความสว่างในแต่ละคู่โพลาไรเซชัน (T_{BH} , T_{BV} , T_{HV} และ T_{VH}) การหาค่าปัจจัยเหล่านี้กระทำโดยการแทนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นต่อระยะทาง (α_u) ในคู่โพลาไร-

เซชันแต่ละคู่ในสมการ (3.1) เช่น อุณหภูมิความสว่างในคูโพลาริเซชัน HH สามารถเขียนได้ตามสมการ (3.2)

$$TB_{HH} = \bar{T}(1 - e^{-\alpha_{a,HH}(r_2 - r_1)}) \quad (3.2)$$

- อุณหภูมิความสว่างผลต่าง (differential brightness temperature : TB_{DR}) เป็นผลต่างของอุณหภูมิความสว่างในคูโพลาริเซชันที่ตั้งฉากกันซึ่งก็คือคูโพลาริเซชัน HH และ VV โดยสามารถเขียนได้ดังนี้

$$TB_{DR} = TB_{HH} - TB_{VV} \quad (3.3)$$

- การเลื่อนเฟสในแต่ละคูโพลาริเซชัน (ϕ_{HH} ϕ_{VV} ϕ_{HV} และ ϕ_{VH}) การเลื่อนเฟส (ϕ) หมายถึง ผลต่างเฟสของสัญญาณที่รับได้เมื่อฝนตก (ϕ_R) และเมื่ออากาศปลอดโปร่ง (ϕ_{CLR}) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\phi = \phi_R - \phi_{CLR} \quad (3.4)$$

สำหรับการเลื่อนเฟสคูโพลาริเซชันใด หมายถึง การใช้เฟสของสัญญาณที่รับได้ในคูโพลาริเซชันนั้นๆ

- การเลื่อนเฟสผลต่าง (differential phase shift : ϕ_{DR}) เป็นผลต่างของการเลื่อนเฟสในคูโพลาริเซชัน HH และ VV ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ (3.5)

$$\phi_{DR} = \phi_{HH} - \phi_{VV} \quad (3.5)$$

ค่าปัจจัยที่เกี่ยวกับโพลาริเซชันเหล่านี้สามารถใช้ประกอบกันเป็นขั้นตอนวิธีสำหรับระบุอัตราการตกของฝนได้ เช่น การใช้ TB_{HH} ร่วมกับ TB_{DR} เพื่อหาการกระจายขนาดของอนุภาคฝน ซึ่งนำไปสู่การหาอัตราการตกของฝน เป็นต้น อย่างไรก็ตามความยุ่งยากของระบบมาตรวิทยแบบนี้คือการปรับโพลาริเซชันของสายอากาศส่งและรับให้เข้าจังหวะกัน เนื่องจากระยะระหว่างสายอากาศทั้งสองห่างกันมาก

2.2 ระบบมาตรวิทยที่ใช้คลื่นหลายความถี่

เนื่องจากการลดทอนหรือการดูดกลืนคลื่นเนื่องจากฝนขึ้นกับความถี่ของคลื่นที่แพร่กระจายผ่านฝน กล่าวคือ เมื่อความถี่สูงขึ้นทำให้ความยาวคลื่นสั้นลงจนใกล้เคียงกับขนาดของหยดน้ำฝนมากขึ้น ส่งผลให้คลื่นที่แพร่กระจายผ่านฝนถูกดูดกลืนมากขึ้น ในทางกลับกัน หากความถี่ต่ำลง นั่นคือความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น การแพร่กระจายของคลื่นผ่านฝนจึงถูกดูดกลืนน้อยลง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ส่งผลให้อุณหภูมิความสว่างที่อัตราการตกของฝนเดียวกันขึ้นกับความถี่ของคลื่นด้วย นอกจากนี้การเปลี่ยนเฟสที่อัตราการตกของฝนเดียวกันก็ขึ้นกับความถี่ของคลื่นด้วยเช่นกัน ดังนั้นการใช้คลื่นหลายความถี่เป็นการเพิ่มสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนให้กับระบบมาตรวิทย กล่าวคือ ทำให้สามารถหาค่าปัจจัยของระบบมาตรวิทยทั้งอุณหภูมิความ

สว่างและปริมาณการเลื่อนเฟสสำหรับแต่ละความถี่ได้ และสามารถใช้ค่าปัจจัยเหล่านี้ร่วมกันในการระบุอัตราการตกของฝนได้

ในปัจจุบัน ระบบมาตรวิทยุที่ได้รับการพัฒนาทั้งสองแบบนี้ไม่นิยมใช้เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งในการวัดอัตราการตกของฝน แต่จะใช้ทั้งระบบมาตรวิทยุสองแบบนี้ร่วมกันเป็นระบบมาตรวิทยุที่มีความสามารถทางโพลาริเซชันและใช้คลื่นหลายความถี่ได้พร้อมกัน (multi-frequency dual-polarisation radiometric system) อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าจะเป็ระบบมาตรวิทยุแบบใดก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบจากสิ่งรบกวนต่างๆ ที่อยู่ใบบรรยากาศ เช่น ก๊าซต่างๆ กลุ่มเมฆ ไอน้ำ เป็นต้น ซึ่งสิ่งรบกวนเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีผลต่อความแม่นยำในการระบุอัตราการตกของฝน นอกจากนี้อัตราการตกของฝนที่ได้จากระบบมาตรวิทยุจะเป็นอัตราการตกของฝนเฉลี่ยตลอดระยะทาง ซึ่งขาดความละเอียดเชิงตำแหน่ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเสนอการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก เพื่อขจัดผลกระทบจากสิ่งรบกวนในระบบ อีกทั้งยังทำให้มีความละเอียดเชิงตำแหน่งในการระบุอัตราการตกของฝนอีกด้วย

การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก

ระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก (very short range radiometric system) เป็นระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ซึ่งให้ข้อมูลอัตราการตกของฝนในขณะใดขณะหนึ่งได้ นอกจากนี้ยังสามารถขจัดปัญหาการแปรเปลี่ยนสิ่งรบกวนในบรรยากาศ รวมทั้งให้ความละเอียดเชิงตำแหน่งในการระบุอัตราการตกของฝน รายละเอียดของระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากเป็นดังต่อไปนี้

1. หลักการของระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก

ระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากใช้หลักการเดียวกับระบบมาตรวิทยุทั่วไป เพียงแต่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับน้อยมาก นั่นคือสายอากาศทั้งสองต้องอยู่ภายในบริเวณที่เกิดฝนตกและอยู่ในแนวเส้นสายตา (line of sight) ทำให้สามารถแทนความหนาของบริเวณที่เกิดฝนตก ($r_2 - r_1$) ด้วยระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ (d) และแทนอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดบริเวณที่ฝนตก (\bar{T}) ด้วยอุณหภูมิของฝนที่อยู่ภายในลำคลื่นของสายอากาศ (\bar{T}_a) ดังนั้นสมการ (3.1) สามารถเขียนได้ดังนี้

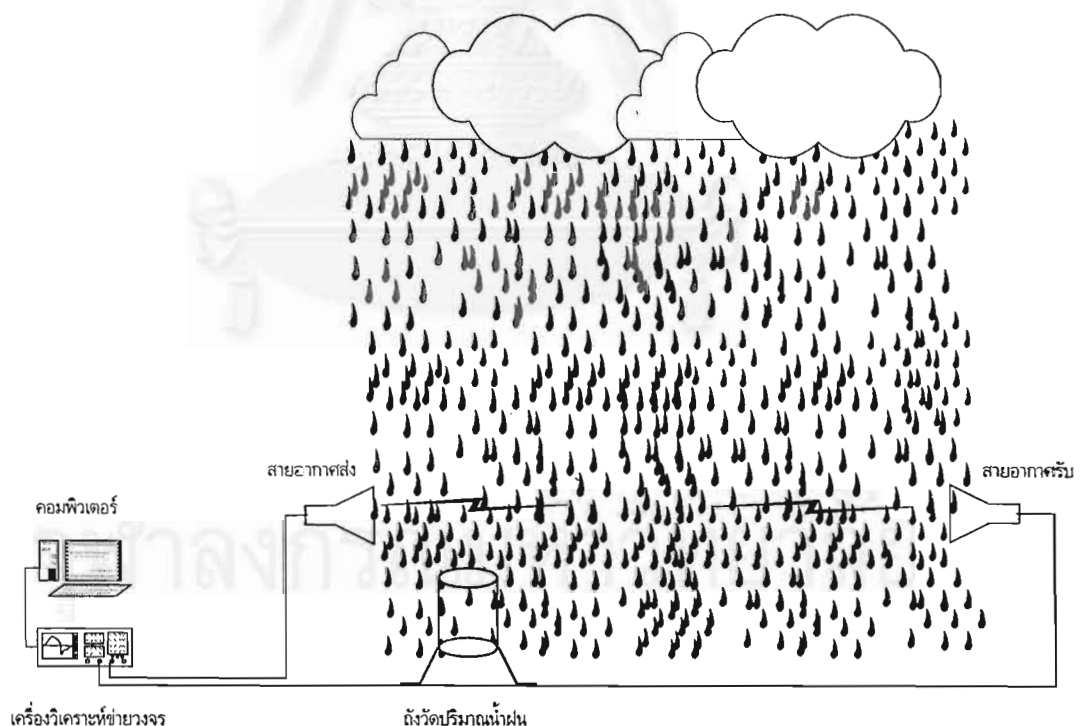
$$TB = \bar{T}_a (1 - e^{-\alpha_a d}) \quad (3.6)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า $\alpha_a d$ เป็นปริมาณการดูดกลืนหรือการลดทอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากฝนภายในระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและรับนั่นเอง

การที่สายอากาศส่งและรับวางอยู่ใกล้กันและอยู่ในแนวเส้นสายตา ทำให้คลื่นที่แพร่กระจายจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ **ไม่ได้รับผลกระทบ**เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมในบรรยากาศ และยังทำให้อุณหภูมิความสว่างที่คำนวณได้มีความถูกต้องแม่นยำสูงด้วย

2. ระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากที่ใช้ในงานวิจัยแสดงอยู่ในรูปที่ 3.2 ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้เป็นชุดเดียวกับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ ซึ่งได้แก่ เครื่องวิเคราะห์ขั้ววงจรถ่ายวงจรถ่ายซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณในตัวเดียวกัน คอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูล และสายอากาศส่งและรับซึ่งเป็นสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด โดยสายอากาศทั้งสองติดตั้งอยู่บนเสาที่สามารถปรับโพลาไรเซชันของสายอากาศได้ ทำให้ระบบวัดนี้มีความสามารถทางโพลาไรเซชัน โดยคู่โพลาไรเซชันที่พิจารณาได้แก่ VV VH และ HH สำหรับความถี่ของคลื่นที่ใช้ในการวัดคือ 4100 MHz ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดของระบบวัดนี้แสดงอยู่ในตารางที่ 3.1 นอกจากนี้ยังทำการวัดอัตราการตกของฝนที่แท้จริงด้วยถังวัดปริมาณน้ำฝนเพื่อเปรียบเทียบกับการวัดการส่งผ่าน โดยตำแหน่งที่วางถังวัดปริมาณน้ำฝนต้องไม่รบกวนระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยมาตรวิทยุระยะใกล้มากนี้



รูปที่ 3.2 ระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากสำหรับวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มาก

อุปกรณ์ส่งและรับคลื่น	เครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจร รุ่น HP-8753
สายอากาศ	
ชนิด	ปากแตรรูปทรงพีระมิด
ช่วงความถี่ใช้งาน	3.3-4.9 GHz
อัตราขยาย	13.7 dB
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	35° ทั้งระนาบยกและระนาบระดับ
คูโพลาริเซชันของสายอากาศ	สายอากาศส่ง สายอากาศรับ
	V V
	V H
	H H
	V หมายถึงโพลาริเซชันแนวตั้ง H หมายถึงโพลาริเซชันแนวระดับ
ความถี่ของระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มาก	4100 MHz
ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล 1 ชุด	3 นาที
อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของบรรยากาศ	เทอร์มอมิเตอร์

3. วิธีการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มาก

จากหลักการของระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มากพบว่าอุณหภูมิความสว่างสามารถหาได้จากปริมาณการลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝนภายในระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและรับ และอุณหภูมิทางกายภาพของฝน การวัดปริมาณการลดทอนสัญญาณดังกล่าวกระทำโดยการปรับเทียบสัญญาณด้วยการต่อตรง (through calibration) สายแแกนร่วมทั้งสองเข้าด้วยกันเพื่อเป็นการขจัดผลของการลดทอนเนื่องจากสายแแกนร่วม จากนั้นจึงนำสายแแกนร่วมทั้งสองไปต่อกับสายอากาศส่งและรับตามลำดับ สำหรับการเก็บข้อมูลจะเก็บทั้งขนาดและเฟสของสัญญาณที่รับได้ในเชิงเวลา โดยเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งหมดเป็น 3 นาที ขั้นตอนการเก็บข้อมูลแต่ละครั้งเป็นดังนี้ เริ่มต้นที่คูโพลาริเซชันเป็น VV เมื่อวัดสัญญาณไปได้เป็นเวลา 30 วินาทีแล้วทำการเปลี่ยนโพลาริเซชันของสายอากาศรับเป็นโพลาริเซชันแนวระดับ ทำให้เป็นการวัดในคูโพลาริเซชัน VH จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 90 แล้วจึงเปลี่ยนโพลาริเซชันของสายอากาศส่งเป็นโพลาริเซชันแนวระดับ นั่นคือการวัดในคูโพลาริเซชัน HH จนกระทั่งครบเวลา 3 นาทีที่ได้ตั้งไว้ ดังนั้นการแยกสัญญาณที่รับได้ในแต่ละคูโพลาริเซชันเป็นดังนี้ วินาทีที่ 1-30 เป็นข้อมูลของคูโพลาริเซชัน VV ส่วนวินาทีที่ 61-90 เป็นข้อมูลของคูโพลาริเซชัน VH และวินาทีที่ 121-150 เป็นข้อมูลของคูโพลาริเซชัน HH

การเก็บข้อมูลแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือการวัดสัญญาณขณะอากาศปลอดโปร่งและการวัดสัญญาณขณะฝนตก โดยการวัดสัญญาณขณะอากาศปลอดโปร่งเป็นการวัดผลของสิ่งรบกวนที่อยู่ภายในระบบซึ่งสามารถกำจัดผลเหล่านี้ไปได้ในการประมวลผล ทำให้ได้ปริมาณการลดทอนสัญญาณเนื่องจากฝนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ในการวัดแต่ละครั้งจะต้องวัดอุณหภูมิทางกายภาพของบรรยากาศขณะนั้นควบคู่กันไปด้วย เพื่อนำไปคำนวณอุณหภูมิความสว่างเนื่องจากฝนในภายหลัง

การประมวลผลเพื่อหาค่าปัจจัยของระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก สามารถทำได้ตามขั้นตอนดังนี้

1. การปรับเทียบด้วยสภาพอากาศปลอดโปร่ง (clear-air calibration) เป็นการกำจัดผลของสิ่งรบกวนที่อยู่ภายในระบบ โดยการใช้สัญญาณในกรณีอากาศปลอดโปร่งเป็นตัวอ้างอิง เมื่อนำสัญญาณที่วัดได้ในขณะฝนตกเปรียบเทียบกับตัวอ้างอิงดังกล่าว ก็จะได้สัญญาณจากฝนเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$X = X_R - X_{CLR} \quad (3.7)$$

โดยที่ X_R และ X_{CLR} เป็นสัญญาณที่วัดได้ในกรณีฝนตกและกรณีอากาศปลอดโปร่งตามลำดับ โดยที่สัญญาณที่วัดได้ หมายถึง ขนาด (ในหน่วย dB) หรือเฟส (ในหน่วยองศา) ของสัญญาณ ส่วน X คือสัญญาณที่ได้รับการปรับเทียบแล้ว เมื่อใช้ขนาดของสัญญาณที่วัดได้แทนลงในสมการ (3.7) X จะหมายถึงปริมาณการลดทอน และหากใช้เฟสของสัญญาณที่วัดได้แทนลงในสมการ (3.7) X ก็จะหมายถึงการเลื่อนเฟส

2. การหาอุณหภูมิความสว่างและการเลื่อนเฟสในแต่ละคูโพลาร์ไรเซชัน เนื่องจากการวัดสัญญาณในแต่ละคูโพลาร์ไรเซชันกระทำในช่วงเวลา 30 วินาที ดังนั้นปริมาณการลดทอนและปริมาณการเลื่อนเฟสจึงเป็นค่าเฉลี่ยเชิงเวลาภายในช่วงเวลาดังกล่าว ตามลำดับ ดังนี้

$$\bar{A} = \frac{\sum_{t=1}^{30} Amp_R(t) - \sum_{t=1}^{30} Amp_{CLR}(t)}{30} \quad (3.8)$$

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{t=1}^{30} \phi_R(t) - \sum_{t=1}^{30} \phi_{CLR}(t)}{30} \quad (3.9)$$

โดย Amp และ ϕ หมายถึง ขนาดและเฟสของสัญญาณตามลำดับ ส่วนดัชนีล่าง R และ CLR หมายถึง สัญญาณที่รับได้ในกรณีฝนตกและกรณีอากาศปลอดโปร่งตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่าง α_d ในสมการ (3.6) และ \bar{A} ในสมการ (3.8) เป็นดังนี้

$$10 \log(\alpha_d) = -\bar{A} \quad (3.10 \text{ ก})$$

หรือ

$$\alpha_a d = 10^{\left(\frac{-\bar{A}}{10}\right)} \quad (3.10 \text{ ข})$$

ทำให้สมการ (3.6) สามารถเขียนได้เป็น

$$TB = \bar{T}_a (1 - e^{-10^{\left(\frac{-\bar{A}}{10}\right)}}) \quad (3.11)$$

สำหรับการใช้ปริมาณการเลื่อนเฟสเพื่อระบุดัชนีการตกของฝนจะใช้ค่าสัมบูรณ์ของการเลื่อนเฟสเฉลี่ยเชิงเวลาตามสมการ (3.9) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\phi = abs(\bar{\phi}) \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.11) และ (3.12) จะเห็นว่า อุณหภูมิความสว่างและการเลื่อนเฟสในคูโพลาริเซชันใด หมายถึง การแทนปริมาณการลดทอนเฉลี่ยและปริมาณการเลื่อนเฟสเฉลี่ยในคูโพลาริเซชันนั้นนั่นเอง

3. การหาอุณหภูมิความสว่างผลต่างและการเลื่อนเฟสผลต่าง จากอุณหภูมิความสว่างและการเลื่อนเฟสในคูโพลาริเซชัน HH และ VV อุณหภูมิความสว่างผลต่างและการเลื่อนเฟสผลต่าง สามารถเขียนได้ตามสมการ (3.13) และ (3.14) ตามลำดับ ดังนี้

$$TB_{DR} = abs(TB_{HH} - TB_{VV}) \quad (3.13)$$

$$\phi_{DR} = abs(\phi_{HH} - \phi_{VV}) \quad (3.14)$$

จากวิธีวัดดัชนีการตกของฝนด้วยระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มากและกระบวนการในการประมวลผลดังที่กล่าวมาแล้ว สามารถสรุปค่าปัจจัยของระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มากได้ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าปัจจัยของระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มาก

ค่าปัจจัย	คูโพลาริเซชัน	สัญลักษณ์
อุณหภูมิความสว่าง	VV	TB _{vv}
	VH	TB _{vh}
	HH	TB _{hh}
อุณหภูมิความสว่างผลต่าง		TB _{dr}
การเลื่อนเฟส	VV	ϕ_{vv}
	VH	ϕ_{vh}
	HH	ϕ_{hh}
การเลื่อนเฟสผลต่าง		ϕ_{dr}

สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนเป็นเช่นเดียวกับขั้นตอนวิธีที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 กล่าวคือ แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวและขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว โดยค่าปัจจัยของขั้นตอนวิธีทั้งสองเป็นค่าปัจจัยของระบบมาตรวิทยุระยะไกลมากที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.2 ส่วนการหาค่าคงที่สำหรับขั้นตอนวิธีแต่ละขั้นตอนวิธีก็ใช้หลักการที่ว่า ทำให้ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมีค่าต่ำที่สุดเช่นเดียวกัน และมีการหาลัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับแต่ละขั้นตอนวิธีอีกด้วย

ผลการวัด

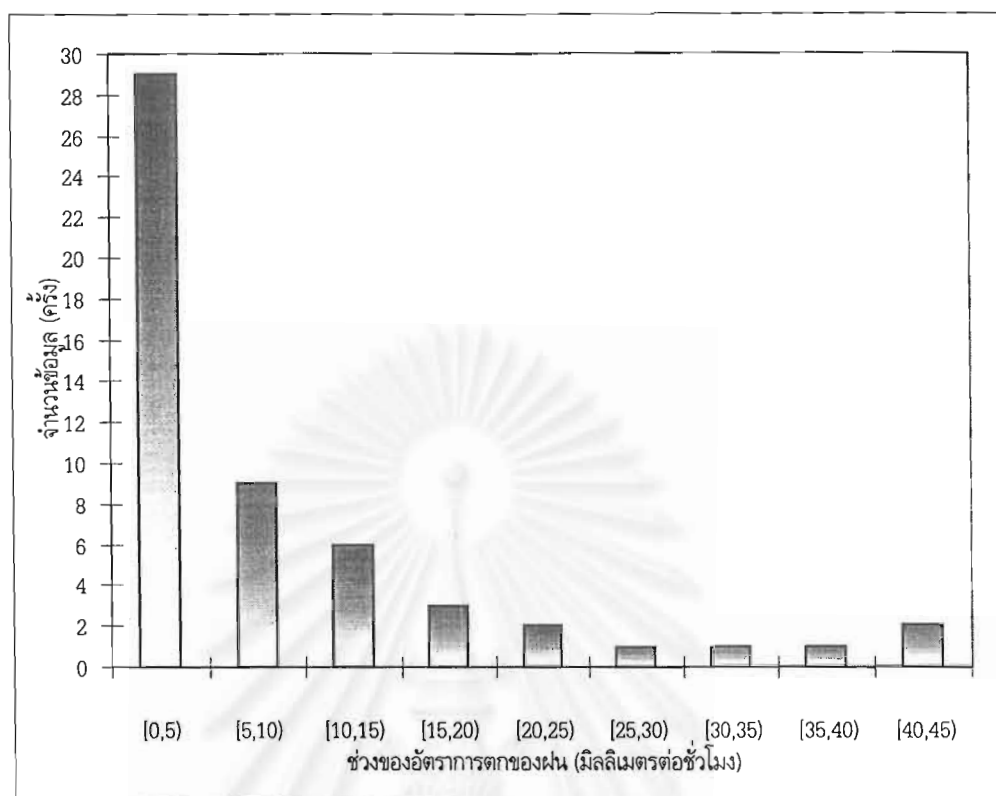
การวัดอัตราการตกของฝนด้วยระบบมาตรวิทยุระยะไกลมาก ดำเนินการวัดที่บริเวณหาดฟ้า บ้านบ้านเกาส์ อำเภอหลังสวน จังหวัดชุมพร ในระหว่างวันที่ 29 พฤศจิกายน พ.ศ. 2541 ถึง วันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2541 และดำเนินการวัดอีกครั้งที่บริเวณหาดฟ้าอาคารวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในระหว่างวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2542 ถึง 3 สิงหาคม พ.ศ. 2542 โดยผลการวัดแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนดังต่อไปนี้

1. ผลการวัดอัตราการตกของฝนด้วยถังวัดปริมาณน้ำฝน

การวัดอัตราการตกของฝนด้วยถังวัดปริมาณน้ำฝนกระทำควบคู่กับการวัดด้วยระบบมาตรวิทยุระยะไกลมากเพื่อให้ทราบอัตราการตกของฝนที่แท้จริง โดยรายละเอียดของผลการวัดสรุปอยู่ในตารางที่ 3.3 ส่วนรูปที่ 3.3 เป็นการกระจายอัตราการตกของฝนที่แท้จริงที่วัดได้ พิจารณาจากผลดังกล่าวจะเห็นว่าอัตราการตกของฝนมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสูง และมีความหนาแน่นของข้อมูลอยู่ที่อัตราการตกของฝนต่ำกว่า 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 3.3 สรุปข้อมูลอัตราการตกของฝนที่วัดจากถังวัดปริมาณน้ำฝน (อัตราการตกของฝนที่แท้จริง)

จำนวนข้อมูล	อัตราการตกของฝน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)				
	น้อยที่สุด	มากที่สุด	ค่ากลาง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
54	0.4	42.0	3.3	8.8	10.8

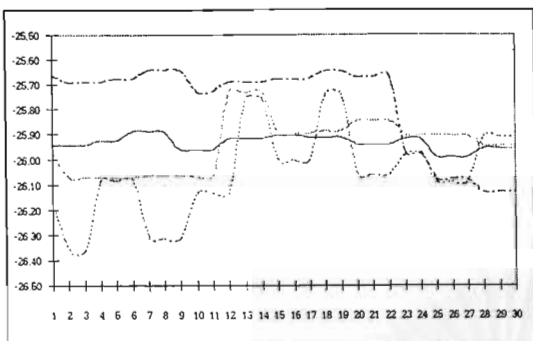


รูปที่ 3.3 การกระจายอัตราการตกของฝนที่วัดจากถึงวัดปริมาณน้ำฝน

2. ผลการวัดอัตราการตกของฝนด้วยระบบมาตรวิทยุระยะไกลมาก

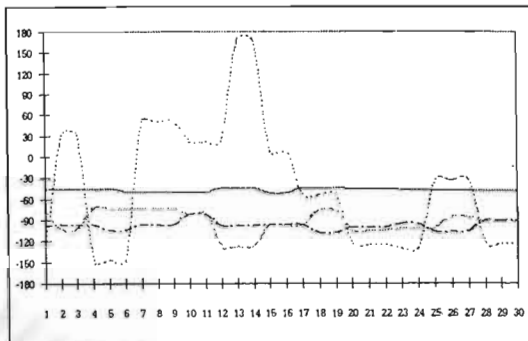
ค่าปัจจัยของระบบมาตรวิทยุระยะไกลมาก ได้แก่ อุณหภูมิความสว่างและการเลื่อนเฟสในคูโพลาริเซชันต่างๆ โดยอุณหภูมิความสว่างสามารถทำได้จากปริมาณการลดทอนเฉลี่ยเนื่องจากฝน ดังนั้นการวัดอัตราการตกของฝนด้วยระบบมาตรวิทยุระยะไกลมากจึงเป็นการวัดปริมาณการลดทอนและการเลื่อนเฟสที่เกิดขึ้นเนื่องจากฝน โดยผลการวัดในวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2541 แสดงอยู่ในรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข) ซึ่งเป็นขนาดและเฟสของสัญญาณที่รับได้ในแต่ละคูโพลาริเซชันตามลำดับ ส่วนการลดทอนและการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่รับได้ในรูปที่ 3.4 ในแต่ละคูโพลาริเซชันแสดงอยู่ในรูปที่ 3.5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยแกนนอนเป็นเวลาในหน่วยวินาที

ขนาดของสัญญาณในคูโพลารเซชันHH (dB)



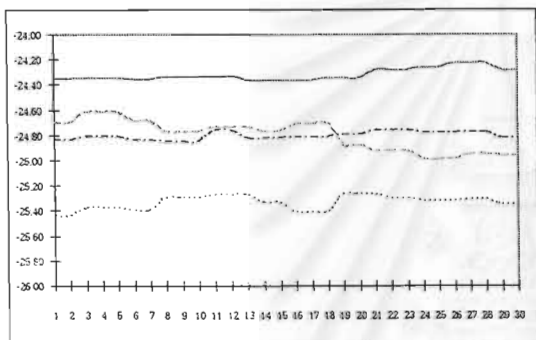
เวลา (วินาที)

เฟสของสัญญาณในคูโพลารเซชันHH (องศา)



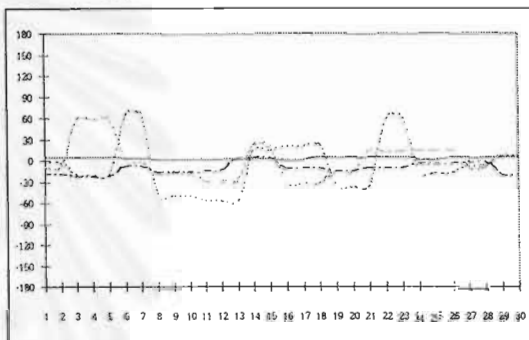
เวลา (วินาที)

ขนาดของสัญญาณในคูโพลารเซชันVV (dB)



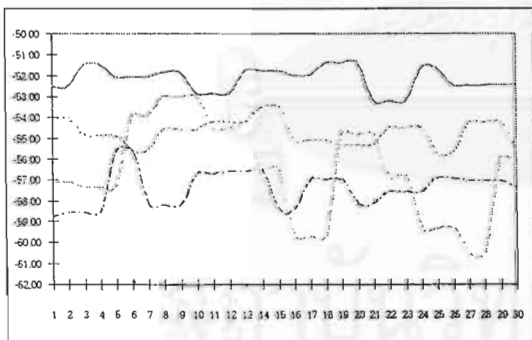
เวลา (วินาที)

เฟสของสัญญาณในคูโพลารเซชันVV (องศา)



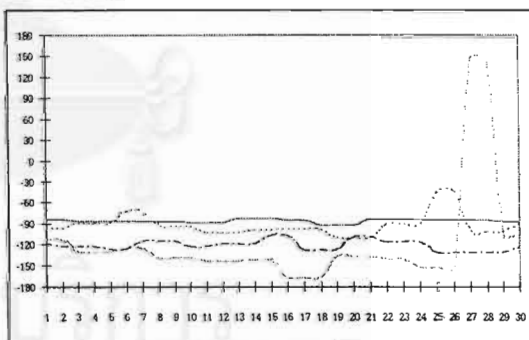
เวลา (วินาที)

ขนาดของสัญญาณในคูโพลารเซชันVH (dB)



เวลา (วินาที)

เฟสของสัญญาณในคูโพลารเซชันVH (องศา)



เวลา (วินาที)

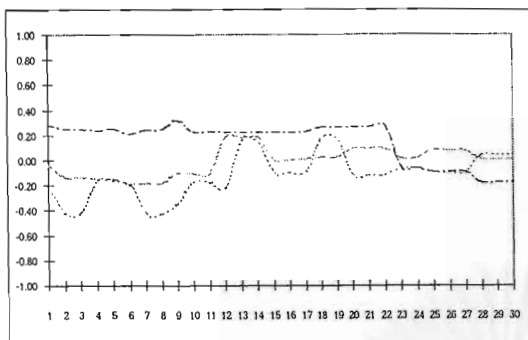
(ก) ขนาดของสัญญาณที่รับได้

(ข) เฟสของสัญญาณที่รับได้

รูปที่ 3.4 ผลการวัดด้วยระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มากในวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2541

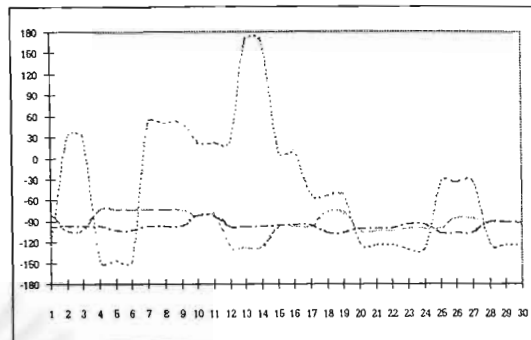
- โดยที่ ————— หมายถึงกรณีอากาศปลอดโปร่ง
- หมายถึงกรณีอัตราการตกของฝนเป็น 26.4 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
- หมายถึงกรณีอัตราการตกของฝนเป็น 40.8 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
- หมายถึงกรณีอัตราการตกของฝนเป็น 1.2 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

การลดทอนในคูโพลาริเซชัน HH (dB)



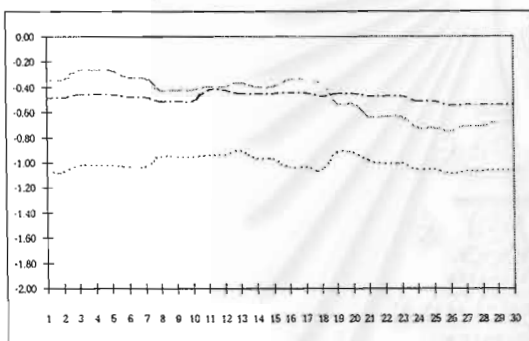
เวลา (วินาที)

การเลื่อนเฟสในคูโพลาริเซชัน HH (องศา)



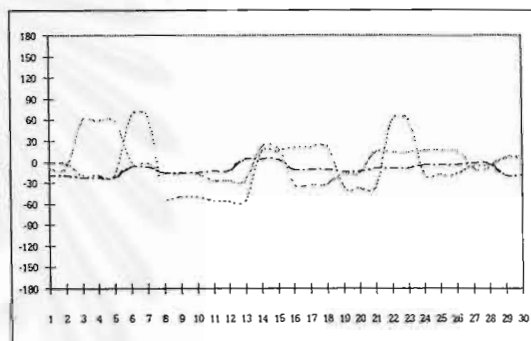
เวลา (วินาที)

การลดทอนในคูโพลาริเซชัน VV (dB)



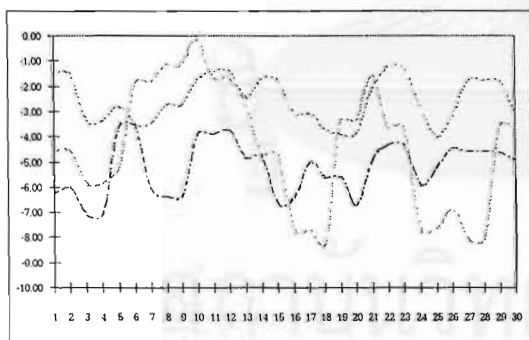
เวลา (วินาที)

การเลื่อนเฟสในคูโพลาริเซชัน VV (องศา)



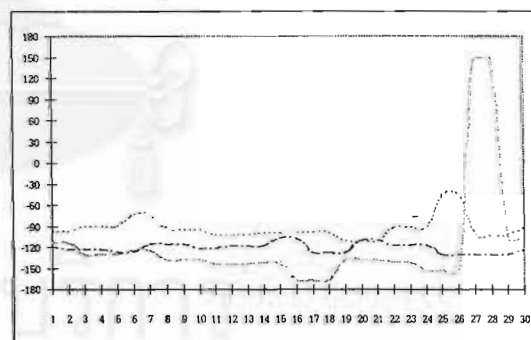
เวลา (วินาที)

การลดทอนในคูโพลาริเซชัน VH (dB)



เวลา (วินาที)

การเลื่อนเฟสในคูโพลาริเซชัน VH (องศา)



เวลา (วินาที)

(ก) การลดทอน

(ข) การเลื่อนเฟส

รูปที่ 3.5 การลดทอนและการเลื่อนเฟสของผลการวัดในวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2541

- โดยที่
- หมายถึงกรณีอัตราการตกของฝนเป็น 26.4 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
 - หมายถึงกรณีอัตราการตกของฝนเป็น 40.8 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
 - หมายถึงกรณีอัตราการตกของฝนเป็น 1.2 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

จากการลดทอนและการเลื่อนเฟสเชิงเวลาที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3.5 สามารถหาปริมาณการลดทอนและปริมาณการเลื่อนเฟสเฉลี่ยเชิงเวลา (\bar{A} และ $\bar{\phi}$) รวมทั้งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณทั้งสอง ($\sigma_{\bar{A}}$ และ $\sigma_{\bar{\phi}}$) ได้ โดยค่าทางสถิติเหล่านี้แสดงอยู่ในตารางที่ 3.4

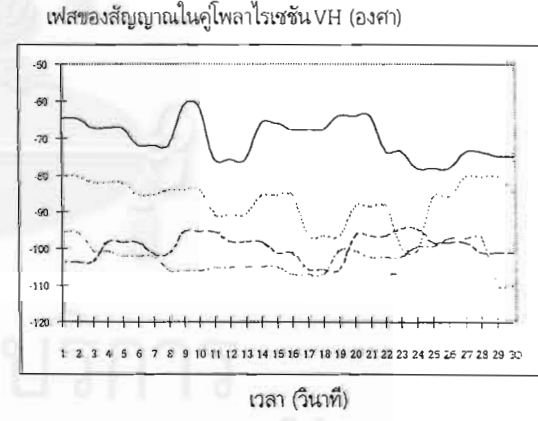
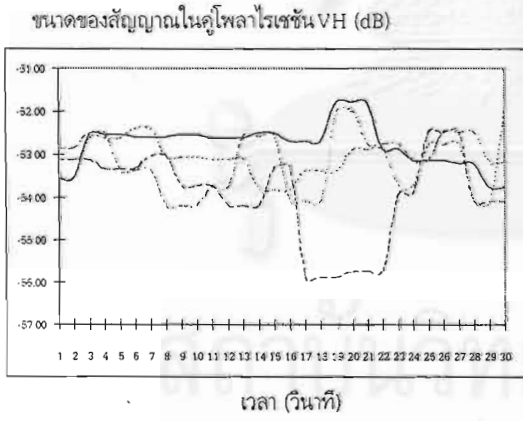
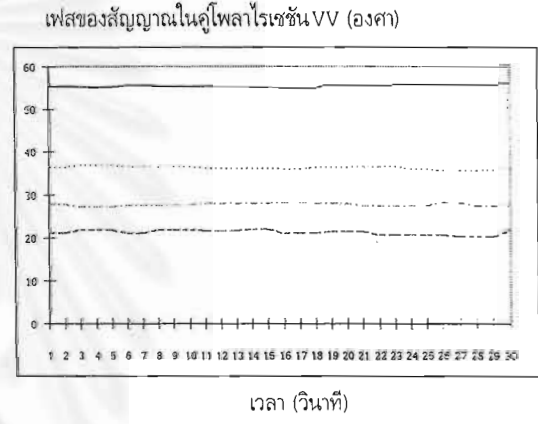
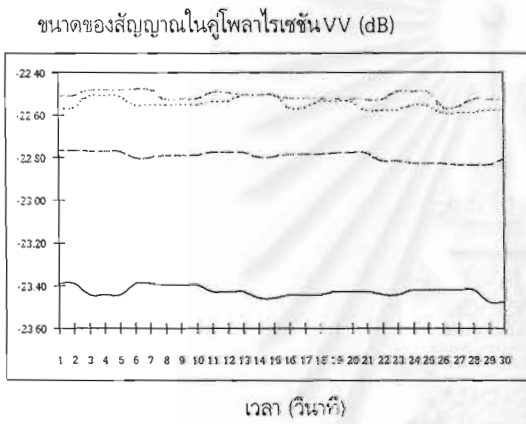
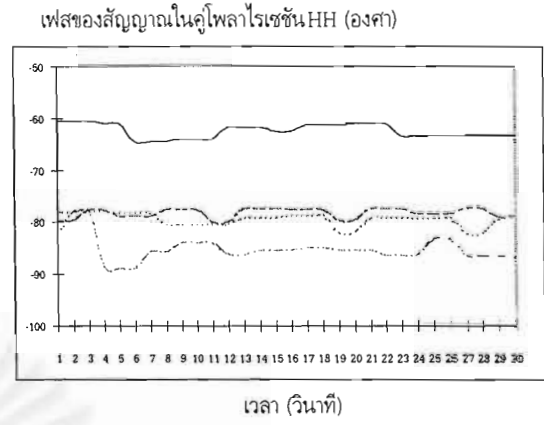
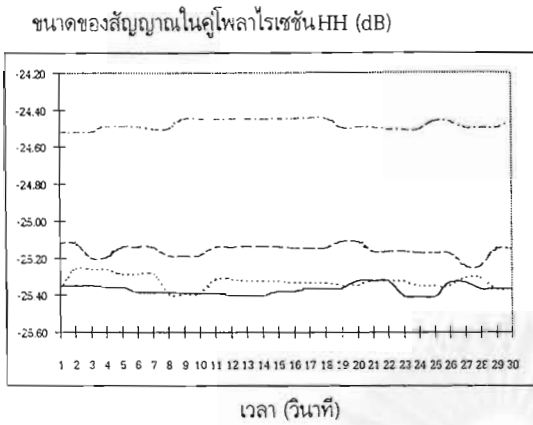
ตารางที่ 3.4 ค่าทางสถิติของการลดทอนและการเลื่อนเฟสจากผลการวัดในวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2541

อัตราการตกของฝน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)	อุณหภูมิของฝน (องศาเซลเซียส)	คูโพลาริเซชัน	\bar{A} (dB)	$\sigma_{\bar{A}}$ (dB)	$\bar{\phi}$ (องศา)	$\sigma_{\bar{\phi}}$ (องศา)
26.4	28	HH	-0.12	0.17	7.31	90.58
		VV	-1.01	0.06	-10.31	36.53
		VH	-2.54	0.91	-5.94	15.32
40.8	28	HH	-0.01	0.11	-45.28	17.59
		VV	-0.48	0.16	-2.56	25.56
		VH	-4.42	2.49	-32.11	72.90
1.2	27	HH	0.15	0.17	-49.98	7.57
		VV	-0.48	0.04	-14.24	8.69
		VH	-5.25	1.08	-33.89	7.26

ฝนที่ตกในวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2541 มีลักษณะเป็นฝนฟ้าคะนองและมีลมพัดแรง โดยกินเวลาเพียง 15 นาที โดยสังเกตได้จากอัตราการตกของฝนที่วัดได้ในเวลาที่ต่อเนื่องกันเป็น 26.4 40.8 และ 1.2 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าการแปรเปลี่ยนของอัตราการตกของฝนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาขนาดของสัญญาณที่รับได้ในรูปที่ 3.4 (ก) จะเห็นว่า สำหรับคูโพลาริเซชัน HH และ VV มีการแปรเปลี่ยนของขนาดของสัญญาณน้อย ส่วนคูโพลาริเซชัน VH มีการแปรเปลี่ยนเกิดขึ้นมากกว่า และหากพิจารณาปริมาณการลดทอนเชิงเวลาในรูปที่ 3.5 (ก) ก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน นอกจากนี้การแปรเปลี่ยนตามเวลาของปริมาณการลดทอนสามารถพิจารณาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการลดทอนในตารางที่ 3.4 ได้อีกด้วย โดยจะเห็นว่าค่าไม่มากนัก คือ ไม่เกิน 0.2 dB สำหรับคูโพลาริเซชัน HH และ VV และมีค่าค่อนข้างสูงในคูโพลาริเซชัน VH สำหรับผลการวัดในรูปที่ 3.4 (ข) ซึ่งแสดงเฟสของสัญญาณที่รับได้ พบว่าเฟสของสัญญาณในขณะฝนตกมีการแปรเปลี่ยนอย่างมากในทุกคูโพลาริเซชัน ส่วนเฟสของสัญญาณในกรณีอากาศปลอดโปร่งค่อนข้างคงที่ ส่งผลให้การเลื่อนเฟสที่เกิดขึ้นเนื่องจากฝนมีการแปรเปลี่ยนมากด้วยเช่นกัน ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 3.5 (ข) และเมื่อพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณการเลื่อนเฟสในตารางที่ 3.4 พบว่าเมื่ออัตราการตกของฝนเป็น 26.4 และ 40.8 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ค่าทางสถิติดังกล่าวมีค่าค่อนข้างสูงในคูโพลาริเซชันทุกคู่ ส่วนในกรณีอัตราการตกของฝนเป็น 1.2 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงมีค่าไม่มากนัก

พิจารณานิยามของปริมาณการลดทอนเฉลี่ยเชิงระยะทางตามสมการ (3.8) จะเห็นว่าถ้าปริมาณการลดทอนนี้มีค่าน้อยกว่าศูนย์ หมายถึง ขนาดของสัญญาณที่รับได้เมื่อฝนตกน้อยกว่าขนาดสัญญาณเมื่ออากาศปลอดโปร่งนั่นคือเกิดการลดทอนกำลังคลื่น ดังนั้นหากปริมาณดังกล่าวมีค่าน้อยแสดงว่าเกิดการลดทอนไปมาก เมื่อพิจารณาตารางที่ 3.4 พบว่าในคูโพลาริเซชัน HH และ VV การลดทอนเฉลี่ยเมื่ออัตราการตกของฝนเป็น 26.4 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง มีค่าสูงกว่า เมื่ออัตราการตกของฝนเป็น 40.8 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง แต่ให้ผลในทางตรงข้ามสำหรับคูโพลาริเซชัน VH สำหรับปริมาณการลดทอนเฉลี่ยในกรณีอัตราการตกของฝนเป็น 1.2 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงในคูโพลาริเซชัน HH มีค่ามากกว่าศูนย์ นั่นคือเกิดการขยายสัญญาณ ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ขนาดของสัญญาณที่รับได้เมื่อฝนตกสูงกว่าขนาดของสัญญาณอ้างอิงเมื่ออากาศปลอดโปร่ง อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบรรยากาศมีผลต่อขนาดและเฟสของสัญญาณที่รับได้โดยยืนยันได้จากผลการวัดในขณะอากาศปลอดโปร่งที่อุณหภูมิของบรรยากาศต่างๆ กัน ในวันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2541 ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 3.6 จากผลดังกล่าวจะเห็นว่า ขนาดของสัญญาณที่รับได้เมื่ออากาศปลอดโปร่งมีการแปรเปลี่ยนเนื่องจากอุณหภูมิ โดยมีความแตกต่างเกิดขึ้นมากถึง 1 dB สำหรับเฟสของสัญญาณก็ให้ผลในลักษณะเดียวกันสำหรับทุกคูโพลาริเซชัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ขนาดของสัญญาณ

(ข) เฟสของสัญญาณ

รูปที่ 3.6 ผลการวัดขนาดและเฟสของสัญญาณที่รับได้ขณะอากาศปลอดโปร่งในวันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2541

- โดยที่
- หมายถึงกรณีอุณหภูมิบรรยากาศเป็น 32 องศาเซลเซียส
 - หมายถึงกรณีอุณหภูมิบรรยากาศเป็น 30 องศาเซลเซียส
 - - - - - หมายถึงกรณีอุณหภูมิบรรยากาศเป็น 29 องศาเซลเซียส
 - - - - - หมายถึงกรณีอุณหภูมิบรรยากาศเป็น 28 องศาเซลเซียส

ผลการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน

การหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนกระทำเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 กล่าวคือ หาค่าคงที่ของขั้นตอนวิธีแต่ละขั้นตอนวิธีที่ทำให้ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมีค่าต่ำที่สุด โดยขั้นตอนวิธีแต่ละขั้นตอนวิธีใช้ค่าปัจจัยของระบบมาตริวิหุระยะใกล้มาก นอกจากนี้ยังทำการหาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับขั้นตอนวิธีแต่ละขั้นตอนวิธีด้วย ดังที่กล่าวแล้วว่า ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็นสองชนิดคือขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวและขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว สำหรับผลการหาขั้นตอนวิธีทั้งสองเป็นดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว

ค่าปัจจัยของระบบมาตริวิหุระยะใกล้มากแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ อุณหภูมิความสว่าง และการเลื่อนเฟสในแต่ละคูโพลาริเซชัน ซึ่งค่าปัจจัยทั้งหมดสรุปอยู่ในตารางที่ 3.2 สำหรับค่าคงที่ของขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวตามนิยามในสมการ (2.23) ได้แก่ α และ β โดยตารางที่ 3.5 เป็นผลการหาค่าคงที่ทั้งสองรวมทั้งสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับแต่ละขั้นตอนวิธี

ตารางที่ 3.5 ผลการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว

ขั้นตอนวิธี	α	β	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
R-TBhh	0.1015	0.7031	0.0034
R-TBvv	1×10^{-13}	5.9033	0.1149
R-TBvh	0.0143	1.0845	0.0865
R-TBdr	2.3948	0.2321	0.0233
R- ϕ hh	2.8534	0.1193	0.0058
R- ϕ vv	3.2772	0.0842	0.0032
R- ϕ vh	4.3081	-0.0186	0.0002
R- ϕ dr	1.7496	0.3648	0.1174

จากผลการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวในตารางที่ 3.5 จะเห็นว่าขั้นตอนวิธีเกือบทั้งหมดนี้มีความสัมพันธ์ในลักษณะเพิ่มขึ้น ($\beta > 0$) ยกเว้นขั้นตอนวิธี R- ϕ vh โดยขั้นตอนวิธีที่ใช้อุณหภูมิความสว่างที่ให้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (0.1149) คือ R-TBvv และขั้นตอนวิธีที่ใช้การเลื่อนเฟสที่ให้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (0.1174) คือ R- ϕ dr ส่วนขั้นตอนวิธีที่เหลือให้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจไม่เกิน 0.1000

2. ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว

ข้อกำหนดของขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวสำหรับค่าปัจจัยของระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มาก คือ ไม่ใช้คุณสมบัติความสว่างร่วมกับการเลื่อนเฟส โดยผลการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวทั้งหมดแสดงอยู่ในตารางที่ 3.6 ซึ่งจะเห็นว่า การใช้ค่าปัจจัยสองตัวทำให้ขั้นตอนวิธีมีสัมประสิทธิ์การตัดล้นใจสูงขึ้น โดยขั้นตอนวิธี R-TBvv-TBvh ให้สัมประสิทธิ์การตัดล้นใจสูงสุด (0.1602) ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้คุณสมบัติความสว่าง ส่วนขั้นตอนวิธีที่ใช้การเลื่อนเฟสที่ให้สัมประสิทธิ์การตัดล้นใจสูงสุด (0.1313) คือ R- ϕ vv- ϕ dr โดยจะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีที่ให้สัมประสิทธิ์การตัดล้นใจสูงประกอบด้วยค่าปัจจัย TBvv TBvh และ ϕ dr เนื่องจากขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวที่ใช้ค่าปัจจัยเหล่านี้ให้สัมประสิทธิ์การตัดล้นใจสูงอยู่แล้วนั่นเอง

ตารางที่ 3.6 ผลการหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว

ขั้นตอนวิธี	a	b	c	สัมประสิทธิ์การตัดล้นใจ
R-TBhh-TBvv	8.71×10^{-13}	-2.9811	8.5485	0.1521
R-TBhh-TBvh	0.0027	0.3301	1.0739	0.0873
R-TBhh-TBdr	0.0754	0.6603	0.2302	0.0262
R-TBvv-TBvh	4.18×10^{-13}	4.8977	0.8131	0.1602
R-TBvv-TBdr	6.56×10^{-14}	5.9542	0.2417	0.1401
R-TBvh-TBdr	0.0130	1.0272	0.1746	0.0995
R- ϕ hh- ϕ vv	2.0865	0.1363	0.1042	0.0106
R- ϕ hh- ϕ vh	3.1600	0.1346	-0.0449	0.0071
R- ϕ hh- ϕ dr	2.7324	-0.2071	0.4355	0.1303
R- ϕ vv- ϕ vh	3.3515	0.0828	-0.0058	0.0032
R- ϕ vv- ϕ dr	1.0614	0.1779	0.3866	0.1313
R- ϕ vh- ϕ dr	2.4537	-0.1212	0.3899	0.1272

การตรวจสอบขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน

จากขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนที่ได้ สามารถนำมาหาอัตราการตกของฝนจากการประมาณเพื่อเปรียบเทียบกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง จากนั้นหาค่าทางสถิติต่างๆ ดังที่ได้นิยามไว้ในบทที่ 2 ซึ่งได้แก่ ความผิดพลาดสูงสุดและต่ำสุด (Err_{max} และ Err_{min}) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (ME) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาด (σ_{Err}) ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE) และ

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง (*CORR*) โดยค่าทางสถิติทั้งหมดนี้เป็นตัวแสดงสมรรถนะของแต่ละขั้นตอนวิธีนั่นเอง ผลการหาค่าทางสถิติเหล่านี้สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวและขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวแสดงอยู่ในตารางที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.7 ค่าทางสถิติสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว

ขั้นตอนวิธี	Err_{max}	Err_{min}	ME	σ_{Err}	MSE	$CORR$
R-TBhh	37.72	0.13	-4.70	10.76	140.96	0.2070
R-TBvv	39.19	0.14	-5.71	10.12	138.29	0.4752
R-TBvh	37.31	0.05	-4.46	10.40	130.80	0.3643
R-TBdr	37.50	0.11	-4.64	10.74	139.84	0.1430
R- ϕ hh	37.79	0.27	-4.69	10.75	140.58	0.1980
R- ϕ vv	37.44	0.73	-4.70	10.83	142.53	-0.0265
R- ϕ vh	37.88	0.52	-4.71	10.82	142.47	-0.0515
R- ϕ dr	36.34	0.11	-4.29	10.19	124.96	0.3994

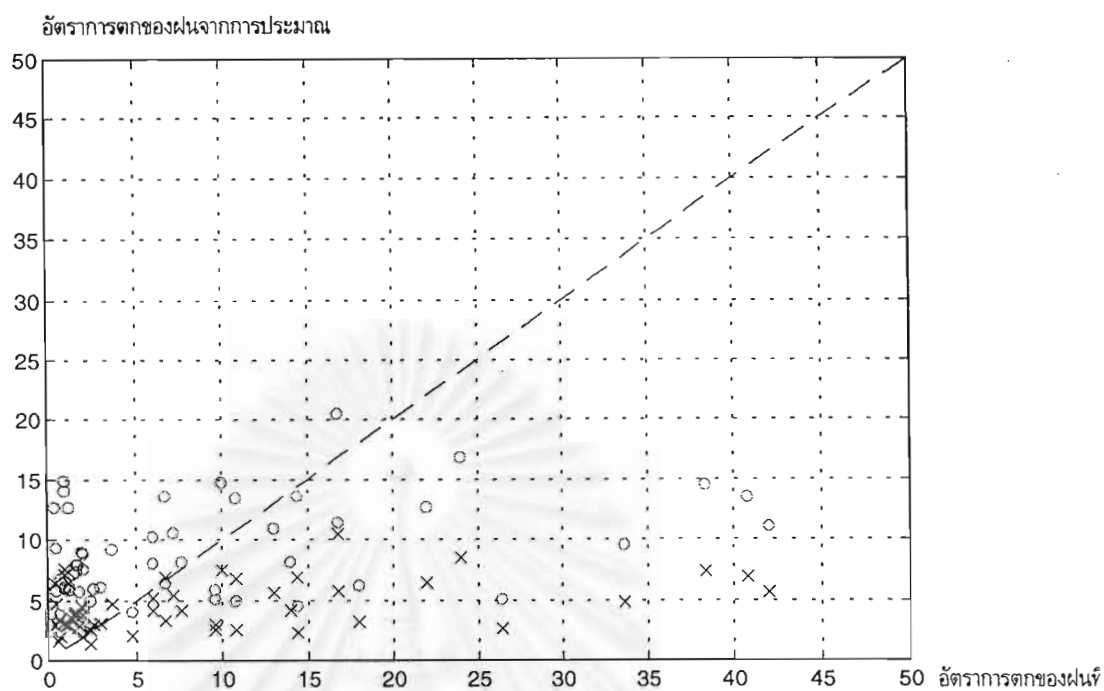
ตารางที่ 3.8 ค่าทางสถิติสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว

ขั้นตอนวิธี	Err_{max}	Err_{min}	ME	σ_{Err}	MSE	$CORR$
R-TBhh-TBvv	38.66	0.31	-4.09	9.78	114.84	0.4773
R-TBhh-TBvh	37.19	0.05	-4.45	10.36	129.90	0.3923
R-TBhh-TBdr	37.26	0.64	-4.63	10.70	138.87	0.1868
R-TBvv-TBvh	37.37	0.06	-4.08	9.61	111.45	0.5292
R-TBvv-TBdr	37.35	0.32	-4.16	9.79	115.66	0.4955
R-TBvh-TBdr	36.96	0.25	-4.39	10.37	129.58	0.3521
R- ϕ hh- ϕ vv	37.10	0.57	-4.68	10.75	140.57	0.1446
R- ϕ hh- ϕ vh	37.61	0.39	-4.69	10.75	140.65	0.1696
R- ϕ hh- ϕ dr	36.35	0.12	-4.27	10.24	125.77	0.3730
R- ϕ vv- ϕ vh	37.42	0.75	-4.70	10.83	142.55	-0.0301
R- ϕ vv- ϕ dr	35.44	0.03	-4.24	10.17	124.10	0.3881
R- ϕ vh- ϕ dr	35.61	0.16	-4.26	10.24	125.67	0.3659

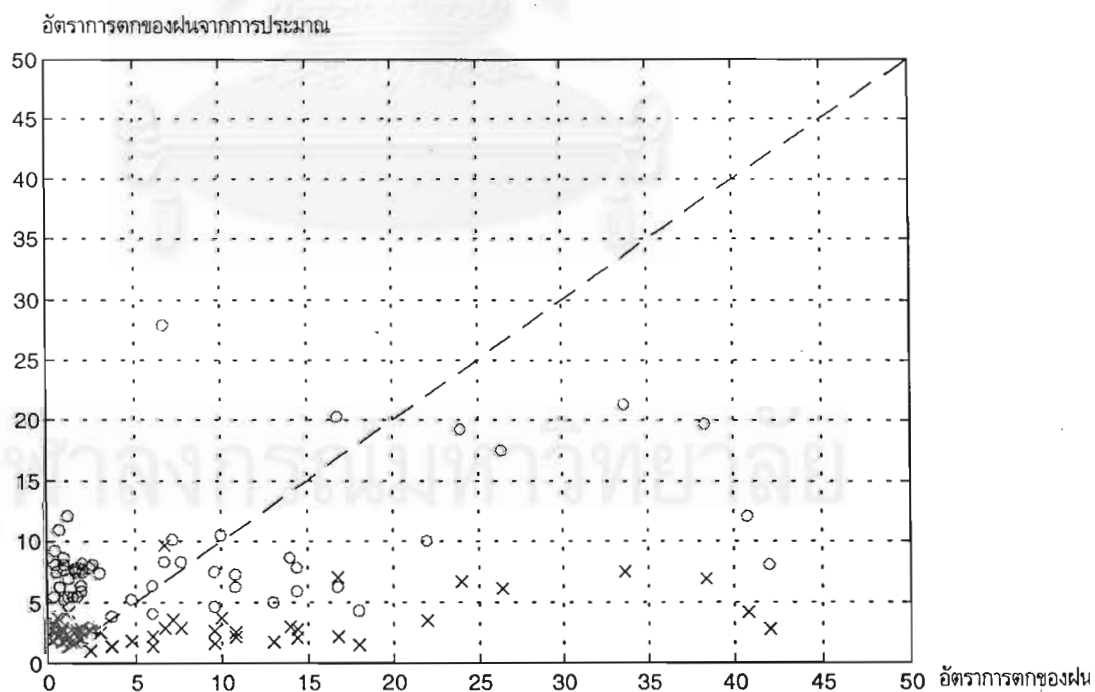
พิจารณาตารางที่ 3.7 และ 3.8 จะเห็นว่า ขั้นตอนวิธีทั้งหมดมีลักษณะเป็นการประมาณค่าต่ำกว่าจริง ซึ่งพิจารณาจากความผิดพลาดเฉลี่ยซึ่งมีค่าน้อยกว่าศูนย์ในทุกขั้นตอนวิธี เมื่อพิจารณาค่าทางสถิติเหล่านี้ ประกอบกันแล้ว ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวที่ดีที่สุดได้แก่ขั้นตอนวิธีที่ใช้การเลื่อนเฟสผลต่าง ($R-\phi dr$) ซึ่งให้ความผิดพลาดต่ำที่สุด รองลงมาได้แก่ขั้นตอนวิธีที่ใช้อุณหภูมิความสว่างในคูโพลาริเซชัน VH ($R-TBvh$) และ VV ($R-TBvv$) ตามลำดับ โดยขั้นตอนวิธี $R-TBvv$ เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวที่ให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุด (0.4752) ส่วนขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวที่ดีที่สุดได้แก่ขั้นตอนวิธีที่ใช้ อุณหภูมิความสว่างในคูโพลาริเซชัน VV และ VH ($R-TBvv-TBvh$) และขั้นตอนวิธีนี้ก็จะเป็นขั้นตอนวิธีที่ให้ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุด (0.5292) ด้วยเช่นกัน สำหรับขั้นตอนวิธีอื่นที่มีสมรรถนะในการระบุอัตราการตก ของฝนใกล้เคียงกัน คือ $R-TBhh-TBvv$ $R-TBvv-TBdr$ $R-\phi vv-\phi dr$ $R-\phi vh-\phi dr$ และ $R-\phi hh-\phi dr$

กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกที่แท้จริงกับอัตราการตกของฝนจากการประมาณที่ได้จากขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวคือ $R-\phi dr$ และ $R-TBvv$ และขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวคือ $R-TBvv-TBvh$ แสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 - 3.9 ตามลำดับ โดยใช้ x เป็นสัญลักษณ์ และเส้นประเป็นเส้นที่แสดงอัตราการตกของฝนที่แท้จริงเท่ากับอัตราการตกของฝนจากการประมาณ จากรูปทั้งสามจะเห็นว่าอัตราการตกของฝนจากการประมาณโดยส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าอัตราการตกของฝนที่แท้จริง แต่ที่อัตราการตกของฝนต่ำ อัตราการตกของฝนจากการประมาณจะมีค่าเกินจริง การที่เป็นเช่นนี้อาจมีสาเหตุมาจากความแตกต่างระหว่างพื้นที่ลุ่มตัวอย่างของถังวัดปริมาณน้ำฝนกับพื้นที่ลุ่มตัวอย่างของระบบมาตรวิทยาระยะไกลมาก การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ (F) ซึ่งมีนิยามตามสมการ (2.33) ร่วมกับขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน สำหรับขั้นตอนวิธี $R-\phi dr$ $R-TBvv$ และ $R-TBvv-TBvh$ มีตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเป็น 1.9601 2.8696 และ 1.8722 ตามลำดับ เมื่อใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณนี้ร่วมกับขั้นตอนวิธีทั้งสามแล้ว กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกที่แท้จริงกับอัตราการตกของฝนจากการประมาณ แสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 - 3.9 เช่นกัน โดยใช้ o เป็นสัญลักษณ์

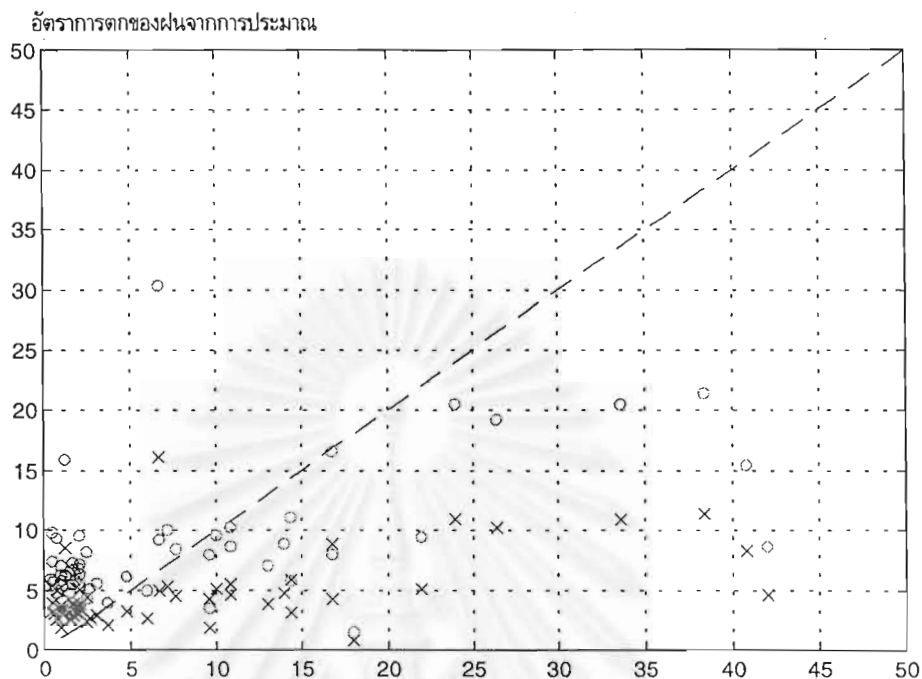
จากกราฟการกระจายในรูปที่ 3.7 - 3.9 จะเห็นว่า การใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณร่วมกับขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน ทำให้การระบุอัตราการตกของฝนที่อัตราการตกสูงดีขึ้น แต่ก็ทำให้เกิดการประมาณเกินจริงที่อัตราการตกของฝนต่ำมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนของแต่ละขั้นตอนวิธีก็ดีขึ้นด้วย โดยสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 3.9 ซึ่งแสดงสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้และไม่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ



รูปที่ 3.7 กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง
สำหรับขั้นตอนวิธี R- ϕ dr ที่ไม่ใช้ (x) และใช้ (o) ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ



รูปที่ 3.8 กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง
สำหรับขั้นตอนวิธี R-TBvv ที่ไม่ใช้ (x) และใช้ (o) ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ



รูปที่ 3.9 กราฟการกระจายระหว่างอัตราการตกของฝนจากการประมาณกับอัตราการตกของฝนที่แท้จริง สำหรับขั้นตอนวิธี R-TBvv-TBvh ที่ไม่ใช้ (x) และใช้ (o) ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ

ตารางที่ 3.9 เปรียบเทียบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ไม่ใช้และใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ

ขั้นตอนวิธี	Err_{max}	Err_{min}	ME	σ_{Err}	MSE	$CORR$
R- ϕ dr	36.34	0.11	-4.29	10.19	124.96	0.3994
R- ϕ dr ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ	30.90	0.22	-0.0001	9.93	100.46	0.3994
R-TBvv	39.19	0.14	-5.71	10.12	138.29	0.4752
R-TBvv ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ	33.94	0.25	0.0000	9.52	92.43	0.4752
R-TBvv-TBvh	37.37	0.06	-4.08	9.61	111.45	0.5292
R-TBvv-TBvh ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ	33.34	0.25	-0.0001	9.19	86.01	0.5292

จากตารางที่ 3.9 จะเห็นว่า เมื่อมีการใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณกับขั้นตอนวิธีทั้งสาม ทำให้ความผิดพลาดเฉลี่ยมีค่าประมาณเป็นศูนย์ และยังทำให้ความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมีค่าลดลง โดยที่

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าคงเดิม สิ่งที่เกิดขึ้นได้อีกประการหนึ่งคือขั้นตอนวิธี R-TBvv มีสมรรถนะดีกว่าขั้นตอนวิธี R- ϕ dr ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่อใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณกับขั้นตอนวิธี R-TBvv ทำให้ขั้นตอนวิธีนี้เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวที่ดีที่สุด ส่วนขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวที่ดีที่สุดยังคงเป็นขั้นตอนวิธี R-TBvv-TBvh เช่นเดิม

การเพิ่มสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนอีกวิธีหนึ่งคือการใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเฉพาะช่วง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากกราฟการกระเจิงสำหรับขั้นตอนวิธีที่ไม่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณในรูปที่ 3.7 - 3.9 (สัญลักษณ์ x) พบว่าการประมาณอัตราการตกของฝนจะเริ่มมีค่าต่ำกว่าจริงเมื่ออัตราการตกของฝนที่แท้จริงเกินกว่า 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ดังนั้นหากใช้ขอบเขตอัตราการตกของฝนที่แท้จริงดังกล่าว สามารถเขียนขั้นตอนวิธีทั้งสามแบบมีเงื่อนไขได้ดังสมการ (3.15) - (3.17)

$$R = 1.7496\phi_{dr}^{0.3648} \quad \text{เมื่อ } \phi_{dr} \leq 17.8$$

$$R = 3.4294\phi_{dr}^{0.3648} \quad \text{เมื่อ } \phi_{dr} > 17.8$$
(3.15)

$$R = (1 \times 10^{-13})TB_{vv}^{5.9033} \quad \text{เมื่อ } TB_{vv} \leq 209.2$$

$$R = (2.8696 \times 10^{-13})TB_{vv}^{5.9033} \quad \text{เมื่อ } TB_{vv} > 209.2$$
(3.16)

$$R = (4.18 \times 10^{-13})TB_{vv}^{4.8977}TB_{vh}^{0.8131} \quad \text{เมื่อ } TB_{vv}^{4.8977}TB_{vh}^{0.8131} \leq 1.2 \times 10^{13}$$

$$R = (7.83 \times 10^{-13})TB_{vv}^{4.8977}TB_{vh}^{0.8131} \quad \text{เมื่อ } TB_{vv}^{4.8977}TB_{vh}^{0.8131} > 1.2 \times 10^{13}$$
(3.17)

จากขั้นตอนวิธีในสมการที่ (3.15) - (3.17) สามารถห้ออัตราการตกของฝนจากการประมาณและค่าสถิติต่างๆ ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 3.10 โดยจะเห็นได้ว่าการใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเฉพาะช่วง ทำให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้ความผิดพลาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณตลอดช่วงอัตราการตกของฝน สำหรับกรณีที่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเฉพาะช่วงนี้ ขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวที่ดีที่สุดคือ R- ϕ dr และขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวที่ดีที่สุดคือ R-TBvv-TBvh อย่างไรก็ตามขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวที่ดีที่สุดดังกล่าวมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ค่อนข้างต่ำ

ตารางที่ 3.10 สมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเฉพาะช่วง

ขั้นตอนวิธี	Err_{max}	Err_{min}	ME	σ_{Err}	MSE	$CORR$
R- ϕ dr ตามสมการ (3.15)	30.90	0.11	-2.10	9.82	102.94	0.4218
R-TBvv ตามสมการ (3.16)	39.19	0.14	-4.19	9.53	110.74	0.4799
R-TBvv-TBvh ตามสมการ (3.17)	37.37	0.06	-2.10	9.15	89.85	0.5364



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุป

การวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการส่งผ่าน เป็นการวัดปริมาณการลดทอนและปริมาณการเลื่อนเฟสที่เกิดขึ้นเนื่องจากฝน สำหรับระบบมาตรวิทยุสำหรับวัดอัตราการตกของฝนจะวัดปริมาณการลดทอนดังกล่าวในรูปของอุณหภูมิจำกัด โดยทั่วไประบบมาตรวิทยุอาศัยดาวเทียมเป็นตัวส่งสัญญาณและมีตัวรับสัญญาณอยู่ที่สถานีภาคพื้นดิน แต่เดิมระบบมาตรวิทยุสามารถวัดอุณหภูมิจำกัดได้เพียงอย่างเดียวและวัดเพียงคู่โพลาไรเซชันเดียวด้วย ต่อมามีการพัฒนาระบบให้สามารถวัดเฟสของสัญญาณได้ด้วย นอกจากนี้ยังมีการวัดที่คู่โพลาไรเซชันอื่นๆ รวมทั้งใช้คลื่นหลายความถี่พร้อมกัน ทำให้มีค่าปัจจัยที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนมากยิ่งขึ้น ระบบมาตรวิทยุสามารถวัดอัตราการตกของฝนที่อยู่ภายในพื้นที่ครอบคลุมที่กว้างเนื่องจากสายอากาศส่งและรับอยู่ห่างกันมาก อย่างไรก็ตามอาจเกิดปัญหาจากสิ่งรบกวนอื่นๆ ที่อยู่ในระบบ ทำให้การระบุอัตราการตกของฝนมีความผิดพลาดไป ในส่วนของงานวิจัยนี้เป็นการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ โดยผู้วิจัยได้เสนอการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากเพื่อขจัดผลดังกล่าว

ระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นระบบมาตรวิทยุที่มีความสามารถทางโพลาไรเซชัน โดยสามารถวัดทั้งอุณหภูมิจำกัดและการเลื่อนเฟสได้ ในบทนี้ได้นำเสนอหลักการของระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก อุปกรณ์ที่ใช้และการจัดวางระบบ รวมทั้งวิธีการวัดและการหาค่าปัจจัยของระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากอีกด้วย ในส่วนของผลการวัดแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ผลการวัดอัตราการตกของฝนด้วยถึงวัดปริมาณน้ำฝนซึ่งเป็นอัตราการตกของฝนที่แท้จริง และผลการวัดอัตราการตกของฝนด้วยระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก ซึ่งแสดงเป็นการลดทอนและการเลื่อนเฟส จากผลการวัดดังกล่าวสามารถนำไปหาค่าปัจจัยของระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากเพื่อหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนต่อไป

ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนแบ่งเป็นสองลักษณะคือขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว และขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว เมื่อหาขั้นตอนวิธีสำหรับทุกค่าปัจจัยของระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากได้แล้ว ก็ทำการทดสอบสมรรถนะสำหรับแต่ละขั้นตอนวิธีด้วยการหาค่าทางสถิติต่างๆ ผลการตรวจสอบขั้นตอนวิธีแสดงให้เห็นว่ามีความผิดพลาดในการระบุอัตราการตกของฝนที่อัตราการตกสูงอยู่มาก ทำให้มีการใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะให้กับขั้นตอนวิธี นอกจากนี้ยังใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณดังกล่าวเฉพาะช่วงที่อัตราการตกของฝนที่แท้จริงเกินกว่า 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงอีกด้วย สำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวและขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวร่วมกับตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเฉพาะช่วงซึ่งมีสมรรถนะดีที่สุดเป็นดังนี้

$$R = 1.7496\phi_{dr}^{0.3648} \quad \text{เมื่อ } \phi_{dr} \leq 17.8$$

$$R = 3.4294\phi_{dr}^{0.3648} \quad \text{เมื่อ } \phi_{dr} > 17.8$$

และ

$$R = (4.18 \times 10^{-13}) TB_{vv}^{4.8977} TB_{vh}^{0.8131} \quad \text{เมื่อ } TB_{vv}^{4.8977} TB_{vh}^{0.8131} \leq 1.2 \times 10^{13}$$

$$R = (7.83 \times 10^{-13}) TB_{vv}^{4.8977} TB_{vh}^{0.8131} \quad \text{เมื่อ } TB_{vv}^{4.8977} TB_{vh}^{0.8131} > 1.2 \times 10^{13}$$

ในบทต่อไปจะแสดงการเปรียบเทียบระบบบำบัดอากาศตกของฝนเฉพาะที่ด้วยการวัดการสะท้อนซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และการวัดการส่งผ่านซึ่งได้กล่าวไว้ในบทนี้ ในด้านระบบและผลการวัดรวมทั้งสมรรถนะในการระบุดังกล่าวด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การเปรียบเทียบการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก

ระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และ 3 แล้วตามลำดับ ทั้งในด้านหลักการ อุปกรณ์ที่ใช้ วิธีการวัดและการประมวลผลสัญญาณ รวมทั้งผลการวัด สำหรับในบทนี้จะกล่าวเปรียบเทียบระหว่างระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ทั้งสองในเชิงระบบและสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การเปรียบเทียบเชิงระบบ

การเปรียบเทียบเชิงระบบ เป็นการพิจารณาเปรียบเทียบระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก ในแง่วิธีการวัด ทฤษฎีการที่ใช้ และการประมวลผลสัญญาณ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

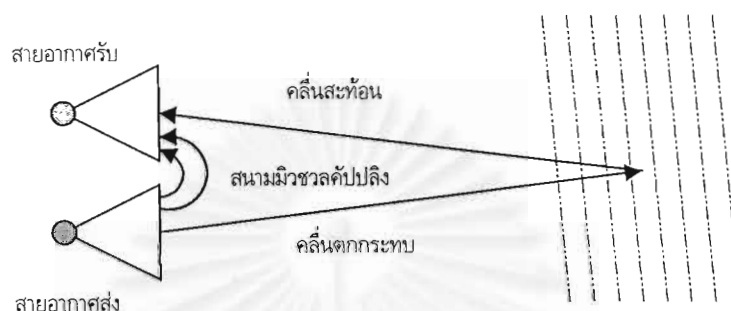
1. วิธีการวัด

ข้อเปรียบเทียบประการแรกของระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ทั้งสอง คือ เรดาร์พัลส์สังเคราะห์เป็นระบบวัดแบบสะท้อน ส่วนระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากเป็นระบบวัดแบบส่งผ่าน โดยธรรมชาติของระบบวัดทั้งสองนี้ ทำให้เกิดผลกระทบสองประการ ได้แก่ ผลกระทบของมิวซลคัปปลิงระหว่างสายอากาศส่งและรับซึ่งเกิดขึ้นในกรณีเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนจากพื้นดินซึ่งเกิดขึ้นในกรณีระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก โดยสามารถอธิบายผลกระทบทั้งสองได้ดังนี้

1.1 ผลกระทบของมิวซลคัปปลิงระหว่างสายอากาศส่งและรับ

เนื่องจากเรดาร์พัลส์สังเคราะห์เป็นระบบวัดแบบสะท้อน สายอากาศส่งและรับจึงวางอยู่ใกล้กัน ทำให้เกิดมิวซลคัปปลิงระหว่างสายอากาศทั้งสองขึ้น สนามที่เกิดจากมิวซลคัปปลิงจะเข้าไปในสายอากาศรับรวมกับสนามที่สะท้อนจากเป้าหมายดังแสดงในรูปที่ 4.1 สำหรับการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ สายอากาศทั้งสองต้องอยู่ภายในบริเวณที่เกิดฝนตก ทำให้สนามมิวซลคัปปลิงที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้

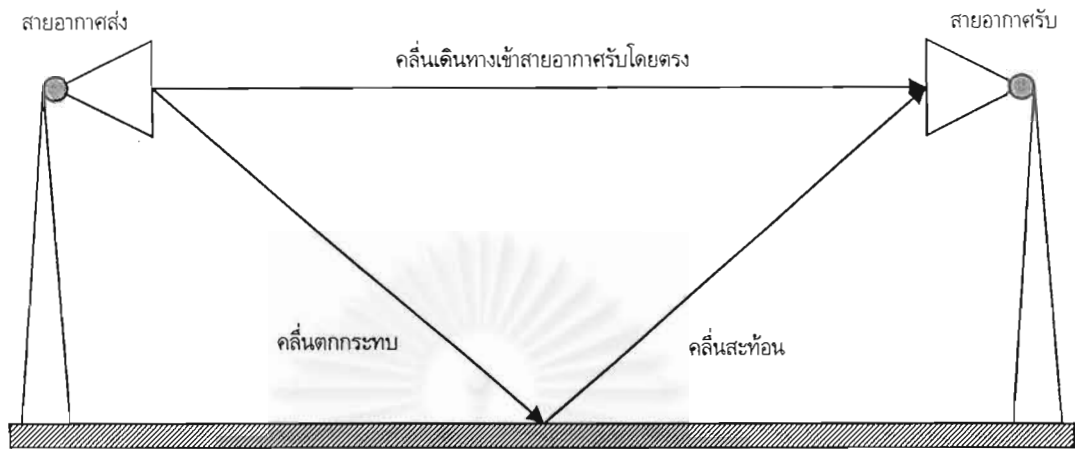
การเปรียบเทียบด้วยอากาศปลอดโปร่งไม่สามารถกำจัดผลของมิวซวลคัปปลิงไปได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามการปรับเทียบด้วยอากาศปลอดโปร่งก็ช่วยลดผลกระทบจากมิวซวลคัปปลิงได้ส่วนหนึ่ง



รูปที่ 4.1 มิวซวลคัปปลิงที่เกิดขึ้นระหว่างสายอากาศส่งและรับ

1.2 ผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนจากพื้นดิน

พิจารณาระบบวัดแบบส่งผ่านในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า คลื่นที่เดินทางถึงสายอากาศรับจะเป็นคลื่นที่มาจากสายอากาศส่งโดยตรงและคลื่นที่สะท้อนจากพื้นดิน ดังนั้นสัญญาณที่รับได้จึงเป็นผลรวมของคลื่นทั้งสองเส้นทางนี้ ทั้งนี้ผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนจากพื้นดินจะมากหรือน้อยขึ้นกับปัจจัย 3 ประการ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดินซึ่งแบ่งเป็นสองชนิด (Balanis, 1989) คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนในโพลาไรเซชันแนวระดับและแนวตั้ง ความแตกต่างของระยะทางระหว่างเส้นทางตรงของสายอากาศส่งและรับ (direct path) กับเส้นทางที่คลื่นเดินทางตกกระทบพื้นดินก่อนแล้วจึงสะท้อนไปยังสายอากาศรับ (reflected path) และการลดทอนเนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศส่งและรับในทิศทางตามเส้นทางคลื่นสะท้อน จากลักษณะการจัดวางอุปกรณ์สำหรับวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มากและสมบัติทางไฟฟ้าของพื้นดิน (Hayt, 1989) ทำให้สามารถคำนวณความแตกต่างระหว่างขนาดของสัญญาณที่รับได้ในเส้นทางตรงกับเส้นทางที่สะท้อนจากพื้นดินได้ตามตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 ผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนจากพื้นดิน

ตารางที่ 4.1 ความแตกต่างระหว่างขนาดของสัญญาณที่รับได้ในเส้นทางตรงกับเส้นทางที่สะท้อนจากพื้นดิน

ปัจจัยที่เป็นผลกระทบ	ความแตกต่างของสัญญาณ(dB)
สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดิน	
โพลาริเซชันแนวระดับ	-3.35
โพลาริเซชันแนวตั้ง	-7.82
ความแตกต่างของระยะทางที่คลื่นเดินทาง	-2.49
การลดทอนเนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศส่งและรับ	-18.0 (ทั้งโพลาริเซชันแนวระดับและแนวตั้ง)
ผลรวม	
โพลาริเซชันแนวระดับ	-23.84
โพลาริเซชันแนวตั้ง	-28.31

จากตารางที่ 4.1 ปัจจัยที่ทำให้ความแตกต่างระหว่างขนาดของสัญญาณที่รับได้ในเส้นทางตรงกับเส้นทางที่สะท้อนจากพื้นดินมีค่ามากที่สุดคือการลดทอนเนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงาน ส่วนผลจากความแตกต่างของระยะทางที่คลื่นเดินทางมีค่าน้อยเนื่องจากเส้นทางทั้งสองไม่ต่างกันมากนัก สำหรับผลของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดินขึ้นกับโพลาริเซชันของคลื่น กล่าวคือ คลื่นโพลาริเซชันแนวระดับมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนสูงกว่าคลื่นโพลาริเซชันแนวตั้ง ทำให้ผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนจากพื้นดินสำหรับคลื่นโพลาริเซชันแนวระดับมากกว่าคลื่นโพลาริเซชันแนวตั้ง

โพลาริเซชันแนวตั้ง แต่จากผลรวมของความแตกต่างระหว่างขนาดของสัญญาณที่รับได้ในเส้นทางทั้งสองจะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยจนไม่มีผลต่อสัญญาณในเส้นทางตรงมากนัก

เมื่อเกิดฝนตกทำให้พื้นดินเปียกส่งผลให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดินเปลี่ยนแปลงไป คลื่นสะท้อนที่เดินทางมาถึงสายอากาศรับจึงได้รับผลกระทบดังกล่าวด้วย โดยทั่วไปแล้วพื้นดินที่เปียกน้ำจะมีความสามารถในการสะท้อนคลื่นมากขึ้นหรือมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้นนั่นเอง จากผลดังกล่าวทำให้ขนาดของคลื่นสะท้อนที่ไปถึงสายอากาศรับเพิ่มขึ้นและทำให้ความแตกต่างระหว่างขนาดของสัญญาณที่รับได้ในเส้นทางตรงกับเส้นทางที่สะท้อนจากพื้นดินลดลง หากสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดินเพิ่มขึ้นมากแล้วอาจทำให้คลื่นที่สะท้อนจากพื้นดินมีนัยสำคัญต่อระบบวัดได้ อย่างไรก็ตามจากผลการหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดินที่เปียกน้ำซึ่งจำลองพื้นผิวสะท้อนเป็นสองชั้นคือชั้นที่เป็นน้ำและชั้นที่เป็นพื้นดินในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนขึ้นกับร้อยละของความหนาของชั้นที่เป็นน้ำ นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดินที่เปียกน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดินที่แห้งโดยคลื่นในโพลาริเซชันแนวตั้งมีการเพิ่มขึ้นมากกว่าคลื่นในโพลาริเซชันแนวระดับ ทำให้ความแตกต่างระหว่างขนาดของสัญญาณที่รับได้ในเส้นทางตรงกับเส้นทางที่สะท้อนจากพื้นดินเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อระบบวัด ดังนั้นจึงสามารถละเลยผลกระทบของพื้นดินที่เปียกน้ำได้

ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดินที่เปียกน้ำ

ร้อยละของความหนาของชั้นที่เป็นน้ำ	สัมประสิทธิ์การสะท้อน	
	โพลาริเซชันแนวระดับ	โพลาริเซชันแนวตั้ง
5	-3.24	-7.45
10	-3.14	-7.07
15	-3.03	-6.68
20	-2.93	-6.28
25	-2.82	-5.88
30	-2.72	-5.46

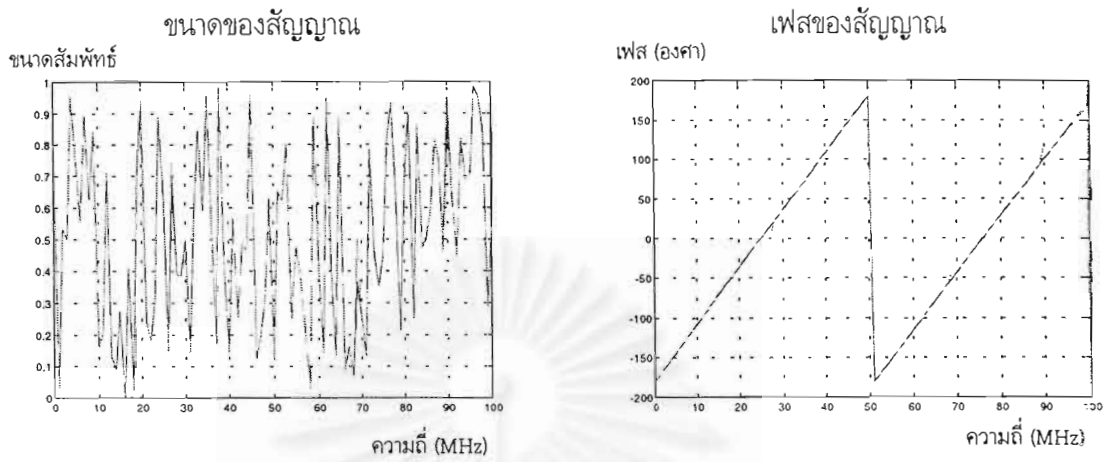
2. ทรัพยากรที่ใช้

การเปรียบเทียบทรัพยากรที่ใช้ในระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ทั้งสองคือการเปรียบเทียบการใช้ทรัพยากรความถี่ กล่าวคือ เรดาร์พัลส์สังเคราะห์เป็นการวัดเชิงความถี่ ดังนั้นจึงใช้ทรัพยากรความถี่มากกว่าระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากซึ่งเป็นการวัดเชิงเวลา นอกจากนี้อุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณสำหรับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์จะต้องมีความสามารถเชิงความถี่ตลอดแถบความถี่ของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ซึ่งทำให้อุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณมีราคาแพงด้วย สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกประการหนึ่งคือการใช้คลื่นหลายความถี่พร้อมกันทำให้อาจเกิดการรบกวนสัญญาณบางความถี่ได้ การรบกวนสัญญาณดังกล่าวอาจส่งผลให้การหาค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์มีความคลาดเคลื่อนและทำให้การวัดอัตราการตกของฝนด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ที่มีความผิดพลาดไปได้ สำหรับระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากใช้คลื่นเพียงความถี่เดียวจึงสามารถหลีกเลี่ยงการรบกวนของคลื่นที่อยู่ภายนอกกรอบได้

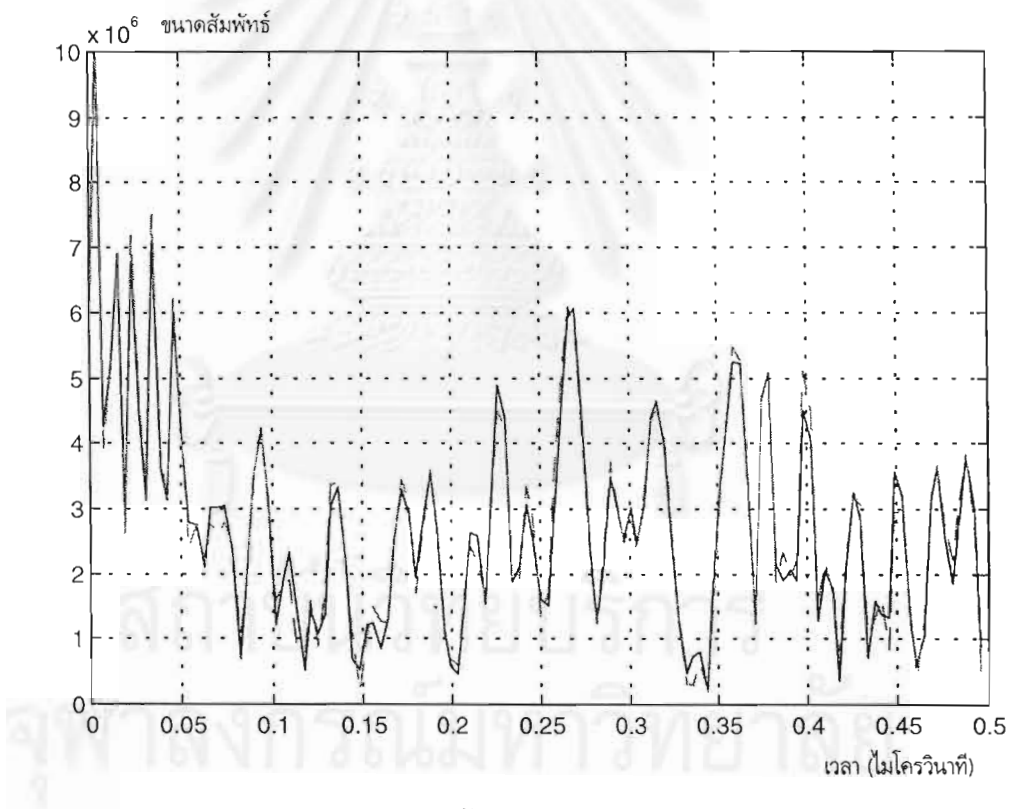
ตัวอย่างของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการรบกวนบางความถี่ของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์แสดงอยู่ในรูปที่ 4.3 โดยรูป (ก) เป็นการเปรียบเทียบสัญญาณเชิงความถี่ที่ไม่มีการรบกวนและมีการรบกวนในบางความถี่ ส่วนรูป (ข) เป็นสัญญาณเชิงเวลาที่ทำได้จากสัญญาณเชิงความถี่ในรูป (ก) จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า การรบกวนสัญญาณเชิงความถี่บางความถี่ทำให้ขนาดสัญญาณเชิงเวลาที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไป เช่น ขนาดสัมพัทธ์ของสัญญาณเชิงเวลาที่เวลา 0.07 ไมโครวินาที เมื่อไม่มีการรบกวนมีค่าประมาณ 3×10^6 แต่เมื่อมีการรบกวนจะมีค่าลดลงเป็น 2.7×10^6 เป็นต้น

3. การประมวลผลสัญญาณ

เมื่อเปรียบเทียบการประมวลผลสัญญาณระหว่างเรดาร์พัลส์สังเคราะห์กับระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากพบว่า เรดาร์พัลส์สังเคราะห์มีความยุ่งยากในการประมวลผลสัญญาณมากกว่าเนื่องจากสัญญาณที่วัดเป็นสัญญาณเชิงความถี่ซึ่งต้องแปลงเป็นสัญญาณเชิงเวลาก่อนจึงหาค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ได้ ส่วนระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก เนื่องจากสัญญาณที่วัดเป็นสัญญาณเชิงเวลาอยู่แล้วจึงหาค่าปัจจัยของระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากได้ทันที



(ก) สัญญาณเชิงความถี่



(ข) สัญญาณเชิงเวลา

รูปที่ 4.3 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการรบกวนบางความถี่ของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ โดยที่ — เมื่อไม่มีการรบกวน
----- เมื่อมีการรบกวนบางความถี่

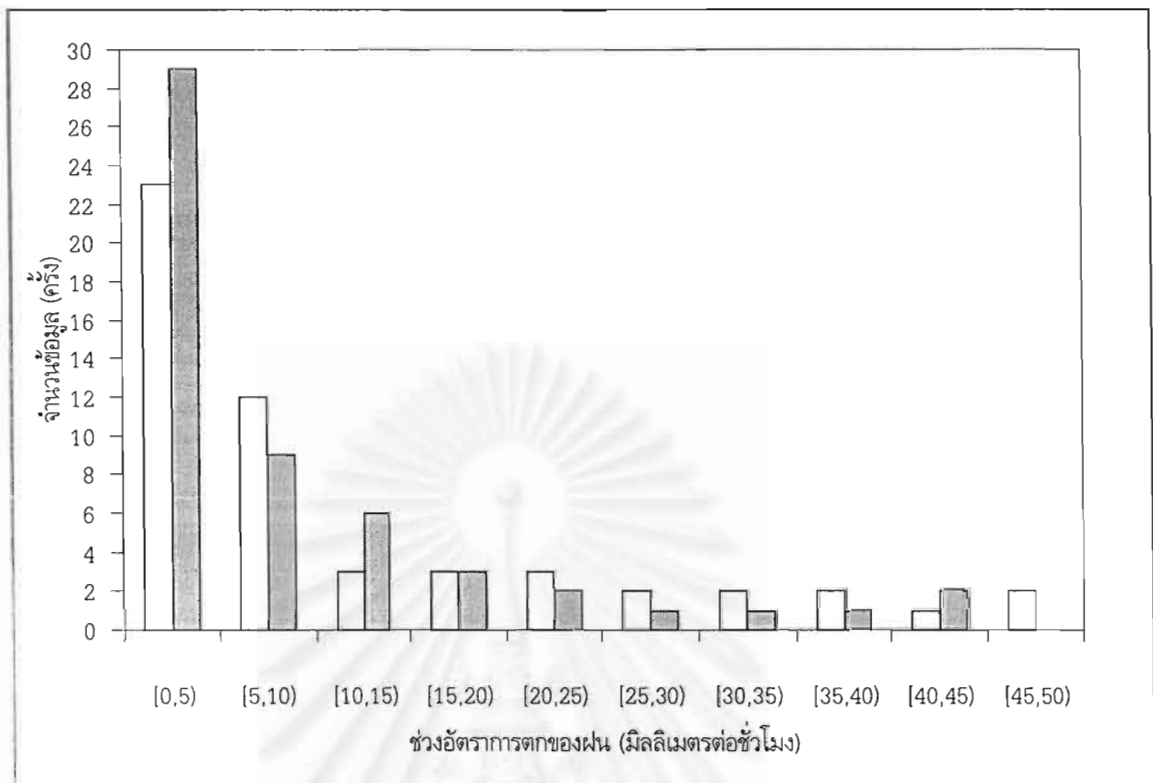
การเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝน

นอกจากการเปรียบเทียบเชิงระบบซึ่งแสดงให้เห็นข้อเด่นและข้อด้อยของแต่ละระบบแล้ว สิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือการเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนเพื่อแสดงให้เห็นความสามารถในการวัดอัตราการตกของฝนของระบบวัดทั้งสอง เนื่องจากการวัดอัตราการตกของฝนด้วยระบบวัดทั้งสองกระทำต่างเวลากัน ดังนั้นการเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนจะต้องเปรียบเทียบอัตราการตกของฝนที่แท้จริงก่อน โดยข้อมูลอัตราการตกของฝนที่แท้จริงที่วัดได้ในระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากแสดงอยู่ในบทที่ 2 และ 3 ตามลำดับ (ตารางที่ 2.3 และ 3.3) นอกจากนี้การกระจายของอัตราการตกของฝนที่แท้จริงของระบบวัดทั้งสองก็แสดงอยู่ในบทที่ 2 และ 3 ตามลำดับเช่นกัน (รูปที่ 2.7 และ 3.3) อนึ่งการเปรียบเทียบอัตราการตกของฝนที่แท้จริงจากทั้งสองบทดังกล่าวนั้นสรุปอยู่ในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 โดยตารางที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบค่าทางสถิติของอัตราการตกของฝนที่แท้จริงสำหรับระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ทั้งสอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าทางสถิติทั้งหมดใกล้เคียงกันมาก ส่วนรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของอัตราการตกของฝนที่แท้จริงของระบบวัดทั้งสอง ซึ่งก็มีลักษณะการกระจายของข้อมูลใกล้เคียงกันด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงสามารถเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนของขั้นตอนวิธีของระบบวัดทั้งสองได้

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนที่แท้จริงสำหรับระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก

ระบบวัดอัตราการตกของฝน เฉพาะที่	จำนวน ข้อมูล	อัตราการตกของฝน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)				
		น้อยที่สุด	มากที่สุด	ค่ากลาง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
เรดาร์พัลส์สังเคราะห์	53	0.4	50.0	5.8	11.2	13.3
ระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก	54	0.4	42.0	3.3	8.8	10.8

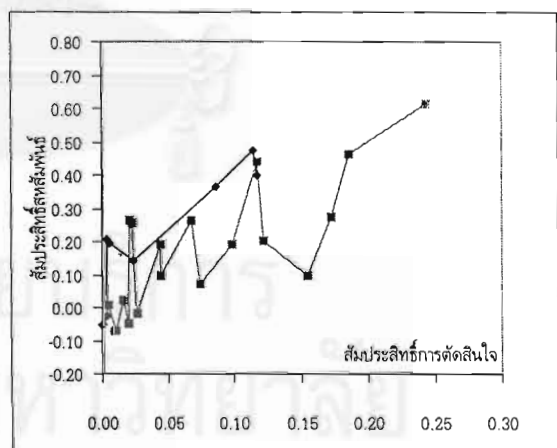
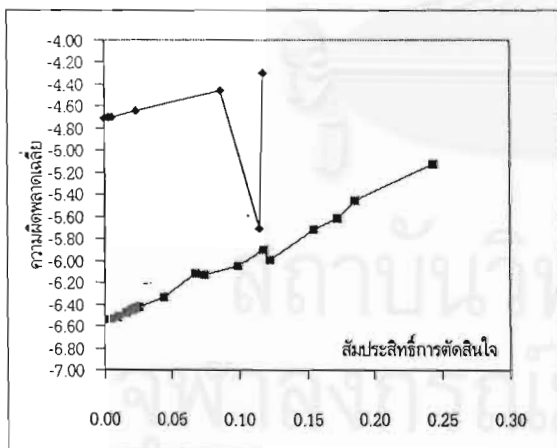
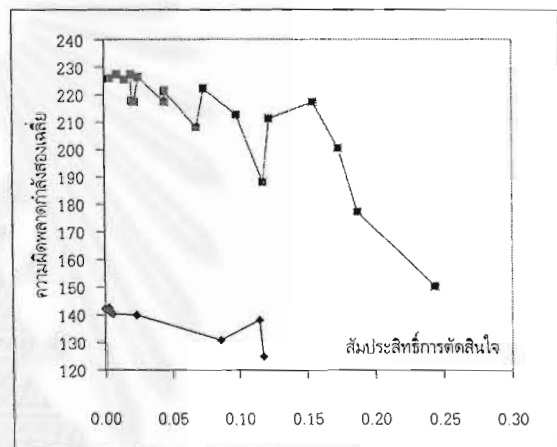
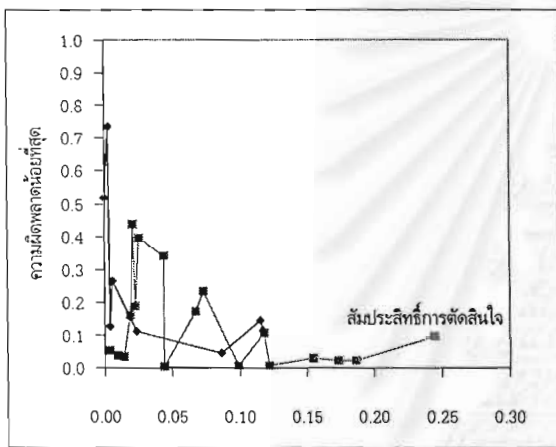
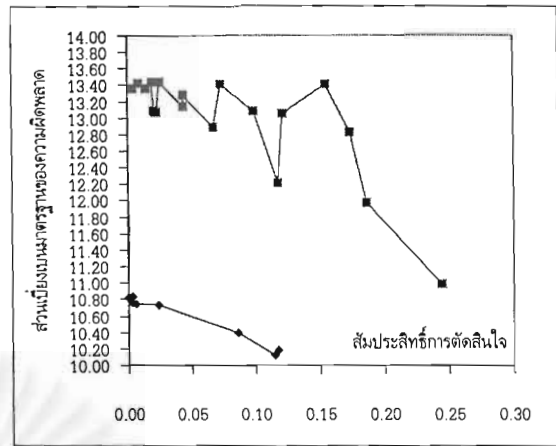
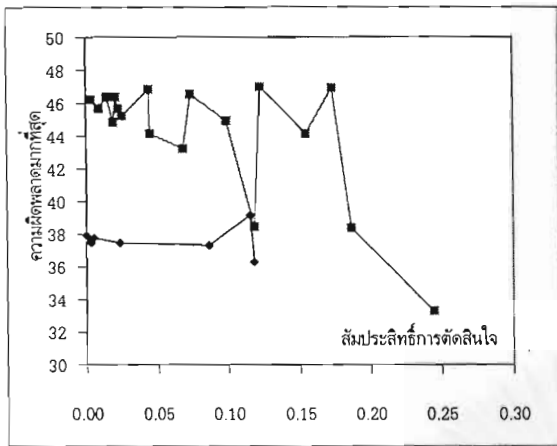
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการกระจายอัตราการตกของฝนที่แท้จริง

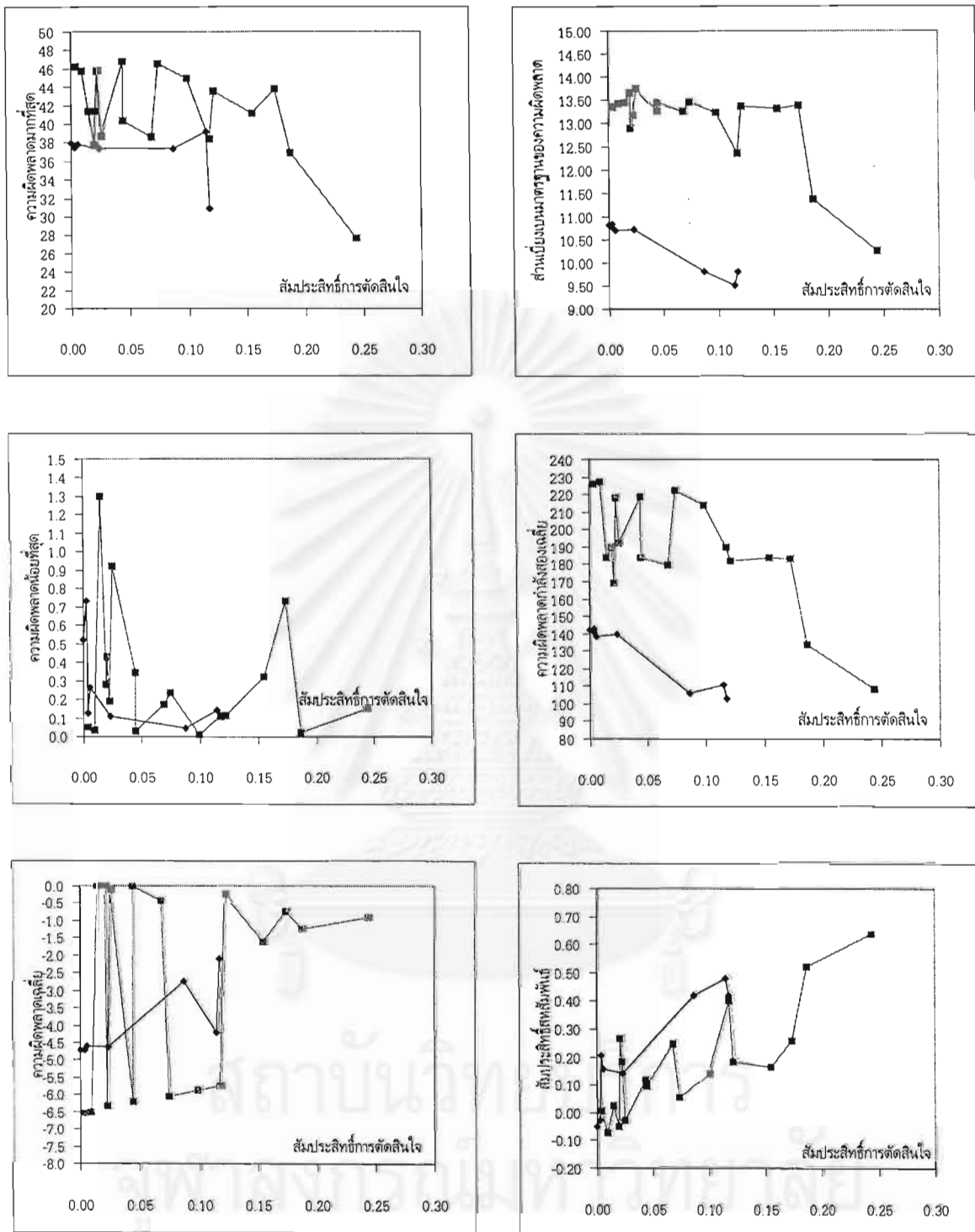
- โดยที่ เป็นข้อมูลสำหรับระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์
- เป็นข้อมูลสำหรับระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก

การเปรียบเทียบเชิงสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนสำหรับระบบวัดทั้งสองทำได้โดยใช้ขั้นตอนวิธีเหล่านั้นหาอัตราการตกของฝนจากการประมาณ แล้วจึงหาค่าทางสถิติของความผิดพลาดต่างๆ ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยรูปที่ 4.5 และ 4.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติของความผิดพลาด (แกนตั้ง) กับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแต่ละขั้นตอนวิธี (แกนนอน) ที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวซึ่งไม่ใช่และใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณเฉพาะช่วงตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.7 และ 4.8 เป็นเช่นเดียวกับรูปที่ 4.5 และ 4.6 แต่เป็นกรณีขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว



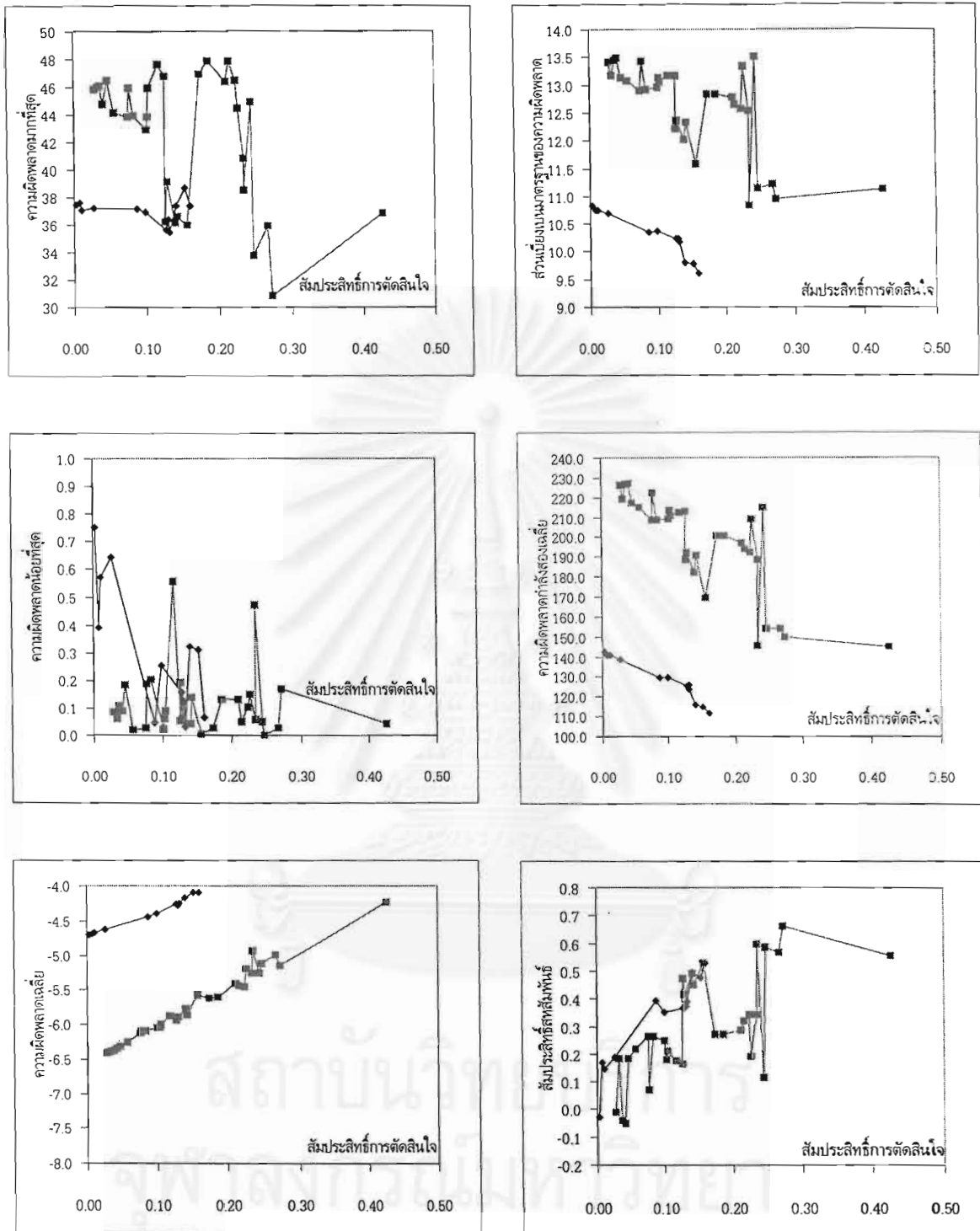
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติกับสัมประสิทธิ์การตัดลื่นใจของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะไกลมากสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวซึ่งไม่ใช่ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ

โดยที่ เป็นกรณีเรดาร์พัลส์สังเคราะห์
 เป็นกรณีระบบมาตรวิทยุระยะไกลมาก

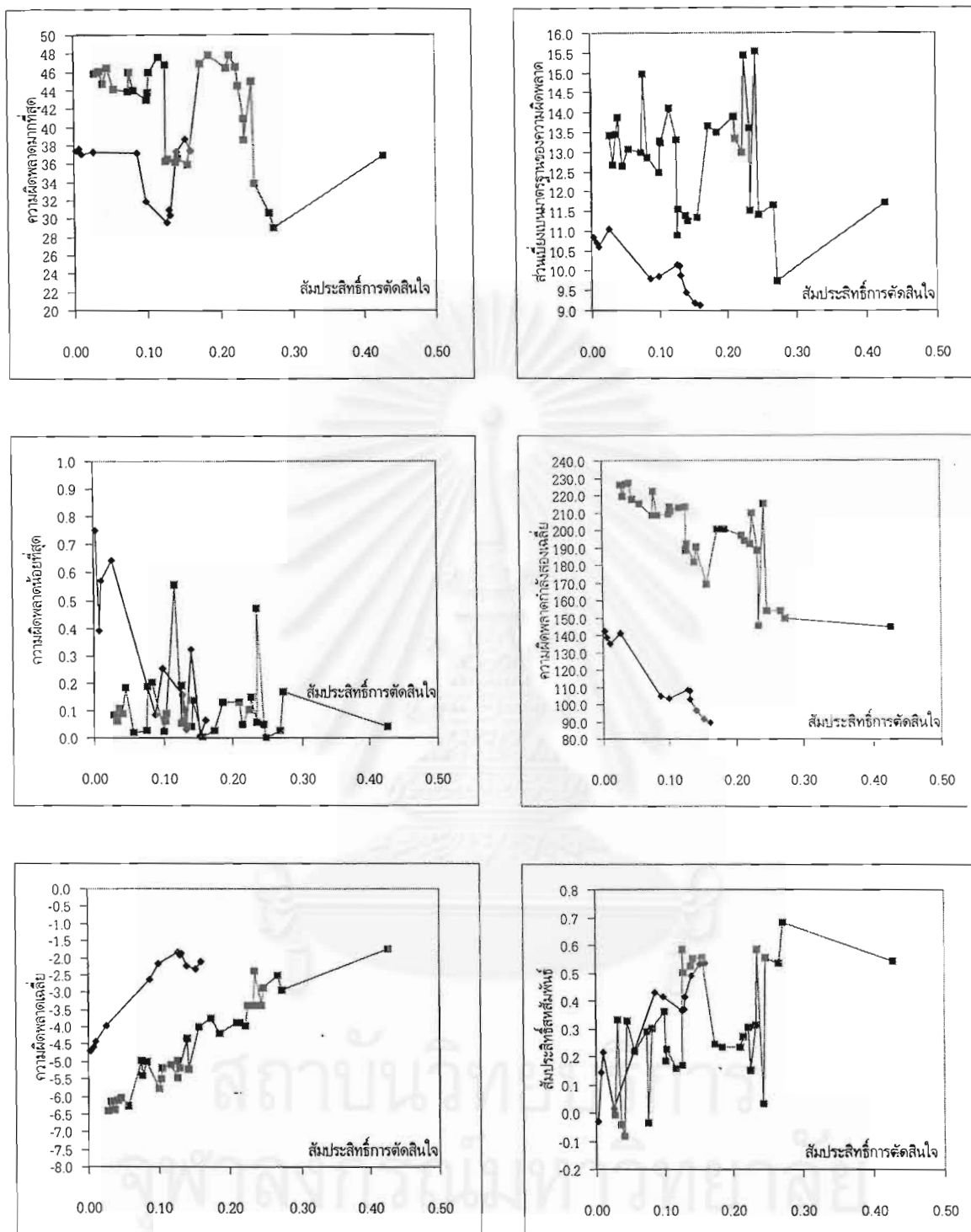


รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยาระยะไกลมากสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวซึ่งใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณเฉพาะช่วง

โดยที่ —■— เป็นกรณีเรดาร์พัลส์สังเคราะห์
 —◆— เป็นกรณีระบบมาตรวิทยาระยะไกลมาก



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติกับสัมประสิทธิ์การตัดล้นใจของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตริวิทยูระยะไกลมากสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวซึ่งไม่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณ โดยที่ \blacksquare เป็นกรณีเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ \blacklozenge เป็นกรณีระบบมาตริวิทยูระยะไกลมาก



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยาระยะไกลมากสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวซึ่งใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณเฉพาะช่วง โดยที่ \blacksquare เป็นกรณีเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ \blacklozenge เป็นกรณีระบบมาตรวิทยาระยะไกลมาก

พิจารณารูปที่ 4.5 - 4.8 ซึ่งใช้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจของขั้นตอนวิธีแต่ละขั้นตอนวิธีเป็นตัวแทนของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน เริ่มต้นด้วยการพิจารณาเปรียบเทียบกรณีขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวซึ่งไม่ใช่ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณในรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าความผิดพลาดสูงสุดและต่ำสุดของขั้นตอนวิธีของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์มีการแปรเปลี่ยนมากกว่ากรณีระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก ส่วนความผิดพลาดเฉลี่ยของทั้งสองระบบมีค่าน้อยกว่าศูนย์ทั้งหมด (อยู่ในช่วง -6.6 ถึง -4.2) ซึ่งหมายถึงทุกขั้นตอนวิธีให้การประมาณอัตราการตกของฝนที่ต่ำกว่าจริง โดยความผิดพลาดเฉลี่ยจะเกิดน้อยลงเมื่อสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเพิ่มขึ้น และแนวโน้มของกำลังสองของความผิดพลาดเฉลี่ยก็เป็นเช่นเดียวกับความผิดพลาดเฉลี่ย สำหรับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเพิ่มขึ้น และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกของฝนที่แท้จริงกับอัตราการตกของฝนจากการประมาณของกรณีระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก มีค่าไม่สูงนักโดยมีค่าสูงสุดประมาณ 0.50 เท่านั้น ส่วนเรดาร์พัลส์สังเคราะห์มีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดประมาณ 0.66 ดังที่กล่าวไว้แล้วว่าขั้นตอนวิธีที่มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงกว่าไม่จำเป็นต้องมีสมรรถนะที่ดีกว่าเสมอไป ดังนั้นการตัดสินสมรรถนะของขั้นตอนวิธีจำเป็นต้องพิจารณาค่าปัจจัยทางสถิติทุกตัวในลักษณะภาพรวม จากการพิจารณากรณีขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวซึ่งไม่ใช่ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณพบว่าขั้นตอนวิธีของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ที่มีสมรรถนะที่ดีที่สุดคือ $R = 3.7887(DWR_{hh}40M)^{-0.9510}$ มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็น 0.2439 ส่วนระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก ขั้นตอนวิธีที่ดีที่สุดคือ $R = 1.7496(\phi_{dr})^{0.3648}$ มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็น 0.1174 เมื่อเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีทั้งสองนี้จะเห็นว่าขั้นตอนวิธีของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ให้ความผิดพลาดสูงสุดและต่ำสุดที่น้อยกว่า รวมทั้งให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงกว่าด้วย อย่างไรก็ตามหากพิจารณาความผิดพลาดเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดเฉลี่ยและความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยซึ่งค่าทางสถิติเหล่านี้เป็นการพิจารณาภาพรวมของขั้นตอนวิธี พบว่าขั้นตอนวิธีของระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากให้ค่าทางสถิติเหล่านี้ต่ำกว่าเรดาร์พัลส์สังเคราะห์

เมื่อใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเฉพาะช่วงร่วมกับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว (รูปที่ 4.6) จะเห็นได้ว่า ความผิดพลาดเฉลี่ยของทุกขั้นตอนวิธีมีค่าลดลงโดยมีบางขั้นตอนวิธีที่ความผิดพลาดเฉลี่ยมีค่าประมาณศูนย์โดยมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ขึ้นเล็กน้อย และทำให้ความผิดพลาดสูงสุดลดลง ส่วนความผิดพลาดต่ำสุดสูงขึ้นเล็กน้อย (เทียบกับรูปที่ 4.5) นอกจากนี้ยังทำให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดและความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยลดลงด้วย ขั้นตอนวิธีที่มีสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนที่ดีที่สุดยังคงเป็นขั้นตอนวิธี R-DWRhh40M และ R- ϕ_{dr} เช่นเดิมโดยมีความสัมพันธ์ตามลำดับดังนี้

$$R = 3.7887DWRhh40M^{-0.9510} \quad \text{เมื่อ } DWRhh40M \leq 0.36$$

$$R = 7.0072DWRhh40M^{-0.9510} \quad \text{เมื่อ } DWRhh40M > 0.36$$

และ

$$R = 1.7496\phi_{dr}^{0.3648} \quad \text{เมื่อ } \phi_{dr} \leq 17.8$$

$$R = 3.4294\phi_{dr}^{0.3648} \quad \text{เมื่อ } \phi_{dr} > 17.8$$

สิ่งที่สังเกตได้อีกประการหนึ่งสำหรับขั้นตอนวิธีทั้งสองนี้คือความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดเฉลี่ย แต่สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของขั้นตอนวิธี R-DWRhh40M มีค่าสูงกว่าขั้นตอนวิธี R- ϕ_{dr} ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณเฉพาะช่วงที่ดีที่สุดของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ที่มีสมรรถนะเหนือกว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณเฉพาะช่วงที่ดีที่สุดของระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก

สำหรับรูปที่ 4.7 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติกับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวและไม่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณ เมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวในรูปที่ 4.5 พบว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวได้มีสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวมากนัก โดยขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวและมีสมรรถนะดีที่สุดสำหรับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์คือ $R = 4.1117(Q_{hh}40M)^{-55.9054} (DWR_{hh}40M)^{-0.9824}$ ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็น 0.2726 และสำหรับระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากคือ $R = 4.18 \times 10^{-13} (TB_{vv})^{4.8977} (TB_{vh})^{0.8131}$ ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็น 0.1602 การใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคุณเฉพาะช่วงร่วมกับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวทำให้ความผิดพลาดเฉลี่ยลดลงโดยมีความผิดพลาดสูงสุดลดลงและความผิดพลาดต่ำสุดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สำหรับแต่ละขั้นตอนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 4.8 ในกรณีนี้ขั้นตอนวิธีที่มีสมรรถนะดีที่สุดสำหรับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มากสามารถเขียนได้ตามลำดับดังนี้

$$R = 4.1117Q_{hh}40M^{-55.9054} DWR_{hh}40M^{-0.9824}$$

$$\text{เมื่อ } Q_{hh}40M^{-55.9054} DWR_{hh}40M^{-0.9824} \leq 2.43$$

$$R = 7.6359Q_{hh}40M^{-55.9054} DWR_{hh}40M^{-0.9824}$$

$$\text{เมื่อ } Q_{hh}40M^{-55.9054} DWR_{hh}40M^{-0.9824} > 2.43$$

และ

$$R = (4.18 \times 10^{-13}) TB_{vv}^{4.8977} TB_{vh}^{0.8131} \quad \text{เมื่อ } TB_{vv}^{4.8977} TB_{vh}^{0.8131} \leq 1.2 \times 10^{13}$$

$$R = (7.83 \times 10^{-13}) TB_{vv}^{4.8977} TB_{vh}^{0.8131} \quad \text{เมื่อ } TB_{vv}^{4.8977} TB_{vh}^{0.8131} > 1.2 \times 10^{13}$$

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีทั้งสองนี้แล้ว พบว่าขั้นตอนวิธีของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ที่มีสมรรถนะเหนือกว่าขั้นตอนวิธีของระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก

สรุป

ในบทนี้ได้เปรียบเทียบระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์กับระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มากทั้งในเชิงระบบและสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝน สำหรับเรดาร์พัลส์สังเคราะห์ซึ่งเป็นการวัดการสะท้อนจึงต้องจัดวางสายอากาศส่งและรับอยู่ใกล้กัน ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบจากสนามมิวชวลคัปปลิงระหว่างสายอากาศทั้งสองได้ แต่การปรับเทียบด้วยอากาศว่างสามารถช่วยลดผลดังกล่าวได้บางส่วน และเนื่องจากเรดาร์พัลส์สังเคราะห์เป็นการวัดสัญญาณเชิงความถี่จึงจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรทางความถี่มากและอาจถูกรบกวนโดยคลื่นนำภายนอกที่มีความถี่ตรงกันได้ง่าย อย่างไรก็ตามเนื่องจากความยืดหยุ่นในการประมวลผลสัญญาณทำให้ค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์มีจำนวนมาก ส่วนระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มากซึ่งเป็นการวัดแบบส่งผ่านจึงได้รับผลกระทบจากคลื่นที่สะท้อนจากพื้นดินเสมอ แต่เนื่องจากกำลังของคลื่นที่สะท้อนจากพื้นดินถูกลดทอนไปมากจึงไม่มีผลต่อระบบวัดมากนัก

การเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนสำหรับขั้นตอนวิธีแต่ละขั้นตอนวิธีกระทำโดยการพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางสถิติของความผิดพลาดต่างๆ กับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของขั้นตอนวิธีแต่ละขั้นตอนวิธี สำหรับขั้นตอนวิธีที่เปรียบเทียบได้แก่ขั้นตอนวิธีของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มากโดยแบ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวและขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว รวมทั้งเปรียบเทียบกรณีที่ใช้และไม่ใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณด้วย ผลการเปรียบเทียบพบว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวที่ดีที่สุดและขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวที่ดีที่สุดของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์มีสมรรถนะเหนือกว่าขั้นตอนวิธีของระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มาก แต่เมื่อใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเฉพาะช่วงทำให้ขั้นตอนวิธีมีสมรรถนะดีขึ้นเล็กน้อย สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างกรณีขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัวกับขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว พบว่าการใช้ค่าปัจจัยสองตัวมิได้ช่วยให้สมรรถนะในการระบุอัตราการตกของฝนดีขึ้นมากนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ 2 ระบบ ได้แก่ เรดาร์พัลส์สังเคราะห์ซึ่งเป็นการวัดการสะท้อนและระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มากซึ่งเป็นการวัดการส่งผ่าน ทั้งด้านหลักการ วิธีการวัดและประมวลผลสัญญาณ การหาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝน รวมทั้งการตรวจสอบขั้นตอนวิธี และได้ดำเนินการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยระบบวัดทั้งสอง ณ บริเวณลาดฟ้าของอาคารวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริเวณลาดฟ้าของบ้านเกาส์ อำเภอหลังสวน จังหวัดชุมพร จากผลการวัดเบื้องต้นซึ่งข้อมูลส่วนใหญ่เป็นอัตราการตกของฝนที่แท้จริงในระดับต่ำคือน้อยกว่า 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบว่าขั้นตอนวิธีที่ได้สามารถบอกอัตราการตกของฝนในระดับต่ำได้ดีพอควร แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนในการบอกอัตราการตกของฝนที่อัตราการตกสูงอยู่ค่อนข้างมากถึงแม้ว่าจะใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณร่วมด้วยแล้วก็ตาม ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากผลการวัดที่อัตราการตกของฝนสูงยังมีไม่มากนักจึงทำให้ขั้นตอนวิธีที่ได้ยังไม่เหมาะสมสำหรับอัตราการตกของฝนสูง

สำหรับงานวิจัยนี้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนเป็นขั้นตอนวิธีแบบกฎกำลังและแบ่งเป็นสองลักษณะคือขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียวและขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยสองตัว นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งออกเป็นสองแบบตามวิธีการวัดคือขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยของเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และขั้นตอนวิธีที่ใช้ค่าปัจจัยของระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มาก และมีการใช้ตัวประกอบปรับแต่งแบบคูณเฉพาะช่วงร่วมกับขั้นตอนวิธีดังกล่าวเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการระบุอัตราการตกของฝนระดับสูง สำหรับขั้นตอนวิธีที่ดีที่สุดสำหรับทั้งสองระบบวัดสรุปอยู่ในตารางที่ 5.1 โดยขั้นตอนวิธีที่ดีที่สุดหมายถึงขั้นตอนวิธีที่มีความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด

ตาราง 5.1 สรุปขั้นตอนวิธีที่ดีที่สุดที่ใช้ในการบอกอัตราการตกของฝน

ชนิดของขั้นตอนวิธี	เรดาร์พัลส์สังเคราะห์	ระบบมาตรวิทยุระยะใกล้มาก
ใช้ค่าปัจจัยตัวเดียว	$R = 3.7887DWRhh40M^{-0.9510}$ เมื่อ $DWRhh40M \leq 0.36$	$R = 1.7496\phi_{dr}^{0.3648}$ เมื่อ $\phi_{dr} \leq 17.8$
	$R = 7.0072DWRhh40M^{-0.9510}$ เมื่อ $DWRhh40M > 0.36$	$R = 3.4294\phi_{dr}^{0.3648}$ เมื่อ $\phi_{dr} > 17.8$
ใช้ค่าปัจจัยสองตัว	$R = 4.1117Qhh40M^{-55.9054}DWRhh40M^{-0.9824}$ เมื่อ $Qhh40M^{-55.9054}DWRhh40M^{-0.9824} \leq 2.43$	$R = (4.18 \times 10^{-13})TB_{vv}^{4.8977}TB_{vh}^{0.8131}$ เมื่อ $TB_{vv}^{4.8977}TB_{vh}^{0.8131} \leq 1.2 \times 10^{13}$
	$R = 7.6359Qhh40M^{-55.9054}DWRhh40M^{-0.9824}$ เมื่อ $Qhh40M^{-55.9054}DWRhh40M^{-0.9824} > 2.43$	$R = (7.83 \times 10^{-13})TB_{vv}^{4.8977}TB_{vh}^{0.8131}$ เมื่อ $TB_{vv}^{4.8977}TB_{vh}^{0.8131} > 1.2 \times 10^{13}$

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะจากการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์พัลส์สังเคราะห์และระบบมาตรวิทยาระยะใกล้มากสามารถแบ่งได้ดังนี้

- ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับระบบวัด ได้แก่ การปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ทั้งสองเพื่อให้มีความสะดวกในการวัดมากยิ่งขึ้น โดยอุปกรณ์ที่ควรได้รับการปรับปรุงได้แก่
 - อุปกรณ์สำหรับปรับโพลาไรเซชันสายอากาศ ขณะนี้การปรับโพลาไรเซชันของสายอากาศกระทำโดยการควบคุมด้วยมือ ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงให้สามารถปรับโพลาไรเซชันของสายอากาศโดยใช้การควบคุมด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งจะทำให้การวัดอัตราการตกของฝนกระทำได้อย่างสะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น หรืออาจเพิ่มสายอากาศส่งและรับอีกหนึ่งชุดเพื่อให้สามารถวัดสัญญาณในคูโพลาไรเซชันทุกคู่ได้พร้อมกัน
 - อุปกรณ์สำหรับวัดอัตราการตกของฝนที่แท้จริง การวัดอัตราการตกของฝนที่แท้จริงกระทำโดยใช้ถึงวัดปริมาณน้ำฝนรองรับน้ำฝนแล้วจึงใช้กระบอกตวงแก้วเพื่อวัดปริมาณน้ำฝนและต้องจับเวลาที่ใช้ในการรองรับน้ำฝนจึงจะหาอัตราการตกของฝนที่แท้จริงได้ จากกระบวนการวัดอัตราการตกของฝนที่แท้จริงดังกล่าวพบว่ามีคามยุ่งยากและอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงควรปรับปรุงอุปกรณ์สำหรับวัดอัตราการตกของฝนที่แท้จริงให้สามารถระบุอัตราการตกของฝนได้อย่างอัตโนมัติ
- ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับจำนวนข้อมูล ขั้นตอนวิธีที่ได้จากงานวิจัยนี้อาจยังไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนเฉพาะที่เนื่องจากจำนวนข้อมูลที่วัดได้ยังมีจำนวนไม่มากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราการตกของฝนสูง ดังนั้นจึงควรดำเนินการวัดให้มีจำนวนข้อมูลมากขึ้นเพื่อให้ขั้นตอนวิธีที่ได้มีความเชื่อถือมากยิ่งขึ้น
- ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับสถานที่ที่ดำเนินการวัด เนื่องจากการวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ในงานวิจัยนี้ดำเนินการวัดที่บริเวณตาดฟ้าของอาคารวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริเวณตาดฟ้าของร้านบ้านเมสซ์ อำเภอหลังสวน จังหวัดชุมพร ทำให้ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการระบุอัตราการตกของฝนที่ได้ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับสถานที่ กล่าวคือ ณ สถานที่อื่นอาจมีขั้นตอนวิธีที่แตกต่างกันเนื่องจากลักษณะของฝนแตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องดำเนินการวัดที่สถานที่อื่นเพื่อหาขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมสำหรับแต่ละพื้นที่หรือเพื่อยืนยันขั้นตอนวิธีที่ได้



รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะอาจารย์ประจำคณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี. หลักสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- ชาญชัย วิทย์สุภาเลิศ. การสร้างอนุกรมฟูเรียร์และฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม เอกสารประกอบการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20. กรุงเทพมหานคร : บริษัทเทคโนโลยีมีเดีย จำกัด, 2540 หน้า 644-648.
- ธีรศักดิ์ อนันตกุล. การพัฒนาชุดทดลองเพื่อการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากฝน. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539

ภาษาอังกฤษ

- Aydin, K., Zhao, Y. and Seliga, T. A. Rain-Induced Attenuation Effects on C-Band Dual Polarization Meteorological Radars IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Vol.27 No. 1 January 1989: 57-66
- Balanis, C. A. Advanced Engineering Electromagnetics John Wiley&Son, 1989
- Bringi, V. N., Chandrasekar, V., Meischner, P., Hubbert, J. and Golestani, Y. Polarimetric Radar Signature of Precipitation at S and C-bands. IEE Proceeding-F Vol. 138 No. 2 April 1991: 109-119.
- Brown, V. J. and Holt, A. R. Rain Rate Estimation by Dual-Wavelength Radar. From web site <http://unesco.org.uy/phi/lepros/radar/art11.html>
- Galati, G., Gorgucci, E., Naldi, M., Pavan, G. and Scarchilli, G. Multiparameter Radar Techniques for Rainfall Rate Measurement. IEE Colloquium on Radar Meteorology. 1995.
- Hardaker, P. J., Holt, A. R., and Goddard, J. W. F. Comparing Model and Measured Rainfall Rates Obtained From a Combination of Remotely Sensed and in Situ Observations. Radio Science Vol. 32 No. 5 September-October 1997: 1785-1796.

- Hayt, W. H. Engineering Electromagnetics. 5th edition. McGraw-Hill, 1989.
- Hines, W. William and Montgomery, D. C. Probability and Statistics in Engineering and Management Science John Wiley & Sons, 1990
- Hogg, D. C. Rain, Radiometry, and Radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Vol. 27 No. 5 September 1989: 576-583.
- Hornbostel, A., Schroth, A., Kutuza, B. G. and Evtuchenko, A. Dual Polarisation and Multifrequency Measurements of Rain Rate and Drop Size Distribution by Ground-Based Radar Radiometer. Proceeding of International Geoscience and Remote Sensing Symposium 1997 (IGARSS'97) Vol. 4: 1639-1641.
- Illingworth, A.J. Recent Advances in The Measurement of Precipitation by Radar. Proceeding of IEE 8th International Conference on Antenna and Propagation. 1993
- Marzoug, M. and Anayenc, P. Improved Range-Profiling Algorithm of Rainfall Rate from a Spaceborne Radar with Path-Integrated Attenuation Constraint. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Vol.29 No.4 July 1991: 584-592
- May, P. T., Keenan, T. D., Zrníc, D. S., Carey, L. D. and Rutledge, S. A. Polarimetric Radar Measurements of Tropical Rain at a 5 cm wavelength. Journal of Apply Meteorology Vol. 38 June 1999: 750-765
- Oguchi, T., Ishida, N. and Ihara, T. Effect of Multiple Scattering on the Estimation of Rainfall Rates Using Dual-Wavelength Radar Technique. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Vol.32 No.5 September 1994: 943-946
- Rincon, R. F., Bidwell, S. W., Jameson, A. R., and Thiele, O. W. A Multi-Frequency, Dual-Polarization, Microwave Link For Rainfall Estimation. Proceeding of International Geoscience and Remote Sensing Symposium 1996 (IGARSS'96) Vol. 1: 402-404
- Ruf, C. S., Aydin, K. and Mathur, S. Rain Rate Estimation from Attenuation Measurements Using a 35 GHz Dual Polarization Microwave Link. Proceeding of International Geoscience and Remote Sensing Symposium 1994 (IGARSS'94) Vol. 3: 1777-1779
- Sauvageot, H. Radar Meteorology. Artech House LONDON 1992
- Serafin, R. J. Meteorological Radar. From chapter 23 of Radar Handbook Editor M. Skonik McGrawHill USA. 1991

Smirnov, M. T., Evtushenko, A. V., Kutuza, B. G., Petrenko, B. Z., Meischner, P. and Hagen, M. Estimation of Rain Rate by Microwave Radiometry and Active Radar during CLEOPATRA 92. Proceeding of International Geoscience and Remote Sensing Symposium 1993 (IGARSS'93) Vol. 3: 1244-1246



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประวัติผู้เขียน

นายผดุงศักดิ์ เกษตรเจริญ เกิดวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2520 ที่อำเภอเมือง จังหวัดยะลา สำเร็จ การศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรม- ศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2540

ในระหว่างที่ศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตและปริญญาโทได้มีผลงานทางวิชาการต่างๆ ดังนี้

1. บทความเรื่อง การทดลองตรวจจับฝนจากชุดฝนจำลองอย่างง่ายด้วยคลื่นวิทยุ ลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมสาร ปีที่ 49 เล่มที่ 12 เดือนธันวาคม 2539
2. บทความเรื่อง การศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดอัตราการตกของฝนด้วยการวัดการส่งผ่านระยะใกล้มาก นำเสนอในงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 20 ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 13-14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2540
3. บทความเรื่อง การวัดอัตราการตกของฝนเฉพาะที่ด้วยเรดาร์คลื่นสี่เหลี่ยมสังเคราะห์ นำเสนอในงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 21 ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 12-13 พฤศจิกายน พ.ศ. 2541 โดยบทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
4. บทความเรื่อง The Point Rain Rate Estimation by Target Reflection Measurement นำเสนอในงานประชุมวิชาการ Progress in Electromagnetic Research Symposium ณ สาธารณรัฐจีน (ไต้หวัน) ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 22-26 มีนาคม พ.ศ. 2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย