การวิเคราะห์ข้อมูลของระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศเพื่อประมาณอัตราการตกของฝน

RAIN RATE ESTIMATION USING DATA ANALYSIS OF LOWER ATMOSPHERE OBSERVATION RADAR

ชัยวัฒน์ สมบูรณ์ลาภ

CHAIWAT SOMBOONLARP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-752-1

สำนักหอสมุดกลาง_พระจอมเกล้าลาดกระบัง

6 ป

การวิเคราะห์ข้อมูลของระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ เพื่อประมาณอัตราการตกของฝน

RAIN RATE ESTIMATION USING DATA ANALYSIS OF LOWER ATMOSPHERE OBSERVATION RADAR

T048392

ชัยวัฒน์ สมบูรณ์ลาภ

CHAIWAT SOMBOONLARP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974 – 324 – 752 -1

หมู่..........
ทะเบียน 48392
วัน, เดือน, ปี 24 ต.ค. 2546

RAIN RATE ESTIMATION USING DATA ANALYSIS OF LOWER ATMOSPHERE OBSERVATION RADAR

CHAIWAT SOMBOONLARP

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2003

ISBN 974 – 324 – 752 -1

COPYRIGHT 2003
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ข้อมูลของระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศเพื่อประมาณอัตราการตกของฝน

RAIN RATE ESTIMATION USING DATA ANALYSIS OF LOWER ATMOSPHERE OBSERVATION RADAR

ชื่อนักศึกษา นายชัยวัฒน์ สมบูรณ์ลาภ

รหัสประจำตัว 41061091

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.นิภา ลีลารุจิ

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ณรงค์ เหมกรณ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	**ลายมือชื่อ**
ผศ.ดร.สมผล โกศัลวิตร์	
รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ	
รศ.ดร.สุวิพล สิทธิชีวภาค	
รศ.ณรงค์ เหมกรณ์	
รศ.นิภา ลีลารุจิ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 26 พฤษภาคม 2546 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัตชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....26.....**เดือน**.....สิงหาคม.....**พ.ศ.**.....2546

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ข้อมูลของระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศเพื่อการประมาณอัตราการตกของฝน
นักศึกษา	นายชัยวัฒน์ สมบูรณ์ลาภ
รหัสประจำตัว	41061091
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. นิภา ลีลารุจิ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ. ณรงค์ เหมกรณ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการประมาณอัตราการตกของฝน โดยการวิเคราะห์ข้อมูลที่สำรวจและบันทึกได้จากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศที่ติดตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ระบบเรดาร์นี้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้วัดความเร็วและทิศทางของลมในระดับล่างเรียกว่า วินด์โปรไฟเลอร์ ประกอบด้วยบีมของดอปเปลอร์เรดาร์จำนวน 3 บีม สามารถวัดความถี่ดอปเปลอร์จากสัญญาณสะท้อนของอนุภาคในบรรยากาศได้จนถึงที่ระยะความสูงประมาณ 4.5 กิโลเมตร โดยเพิ่มระยะในการวัดสัญญาณทุก ๆ 75 เมตร ด้วยระยะเวลาในการวัดอย่างต่อเนื่องทุก 5 นาที ซึ่งข้อมูลแต่ละชุดประกอบด้วยข้อมูลย่อยจำนวน 3 ชุด ที่ระดับความสูงในการวัด 60 ระดับ และแต่ละระดับจะประกอบด้วยจำนวนค่าของการแปลงฟาสท์ฟูเรียร์จำนวน 128 จุด

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลที่สำรวจได้ในบีมแนวดิ่ง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการตกของฝน มาทำการพิจารณาหาค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณที่สะท้อนกลับเนื่องจากฝนและบรรยากาศปกติจากเส้นสเปกตรัมของสัญญาณจำนวน 128 จุด โดยเลือกจุดที่มีขนาดสูงที่สุดที่สอดคล้องกับสัญญาณที่สะท้อนกลับเนื่องจากฝน และเลือกจุดที่มีขนาดสูงที่สุดที่สอดคล้องกับสัญญาณที่สะท้อนกลับเนื่องจากบรรยากาศปกติมาใช้งาน จุดที่เลือกทั้ง 2 จุดนี้จะสอดคล้องกับความถี่ดอปเปลอร์ ซึ่งความถี่ดอปเปลอร์นี้มีความสัมพันธ์กับความเร็วดอปเปลอร์ ความเร็วดอปเปลอร์ที่ได้จะถูกนำมาใช้ร่วมกับรูปแบบการกระจายขนาดของเม็ดฝน และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตกของเม็ดฝนกับขนาดของเม็ดฝนเพื่อคำนวณหาค่าอัตราการตกของฝน นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบกับค่าอัตราการตกของฝนที่วัดได้จากเครื่องวัดอัตราการตกของฝน ณ.บริเวณพื้นดินที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกัน

Thesis Title	Rain rate estimation using data analysis of Lower Atmosphere Observation Radar
Student	Mr. Chatwat Somboonlarp
Student ID.	41061091
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Nipha Leelaruji
Thesis co-Advisor	Assoc.Prof. Narong Hemmakorn

ABSTRACT

This thesis presents the rain rate estimation by observing data analysis of lower atmosphere observation radar (LAOR). The LAOR is installed at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) is 3-beams doppler radar. This system was designed for wind measurements. The system is also called wind profiler, and can measure doppler shifts of atmospheric echoes up to 4.5 km above the site, with the resolution of 75 meters height. The measurement is performed on a continuous basis every 5 minutes. Each spectrum comprises 128-FFT-points.

This research will find the peak power of returned signal that corresponds with the rain echo and atmospheric echo from 128-FFT points of vertical beam data. For each 128-points spectrum, the points with the highest magnitude corresponding to rain echo and atmospheric echo are selected. Two highest magnitude points are corresponding to doppler shift frequencies that related with doppler velocities. Rain drop size distribution, relation between falling speed and drop diameter, and doppler velocities are used for calculating rain rate, then, compared with rain rate which have been recorded by rain gate equipment that were installed at ground floor.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาต่างๆเป็นอย่างดีจาก รศ.นิภา ลีลารุจิและรศ.ณรงค์ เหมกรณ์ ซึ่งท่านเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ Mr.Yuichi Ohno ผู้เชี่ยวชาญจาก Communication Research Laboratory ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่างๆ ให้กับผู้ทำวิจัยตั้งแต่เด็กจนโตขึ้นมา พร้อมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ห้องวิจัยการสื่อสารดาวเทียมและต่างห้องวิจัยที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ ทุกคนในครอบครัว และแฟนที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยอย่างสม่ำเสมอด้วยดีตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันบังเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านด้วยเทอญ

ชัยวัฒน์ สมบูรณ์ลาภ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..II

กิตติกรรมประกาศ..III

สารบัญ..IV

สารบัญตาราง..VII

สารบัญรูป..VIII

บทที่ 1 บทนำ..1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..1

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา......................................2

1.3 สมมติฐานและแนวความคิดในการวิจัย...2

1.4 ขอบเขตการวิจัย...3

1.5 ขั้นตอนการวิจัย..3

บทที่2 โครงสร้างของชั้นบรรยากาศและคุณลักษณะของฝน.................................4

2.1 การจำแนกชั้นบรรยากาศ..4

2.1.1 โทรโพสเฟียร์...4

2.1.2 สตาร์โตสเฟียร์...4

2.1.3 เมโซสเฟียร์...4

2.1.4 เทอร์โมสเฟียร์..5

2.2 คุณสมบัติของฝน..6

2.2.1 ชนิดของฝน..6

2.2.2 อาณาบริเวณที่ฝนตก...6

2.2.3 โครงสร้างของฝน...7

2.2.4 รูปทรงของเม็ดฝน..7

2.2.5 การกระจายขนาดเม็ดฝน..8

2.3 การวัดปริมาณน้ำฝน...11

2.3.1 หน่วยที่ใช้ในการวัด...11

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.2 การติดตั้งเครื่องมือ.....12

2.3.3 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน.....12

บทที่ 3 การใช้เรดาร์สำรวจข้อมูลในชั้นบรรยากาศ.....16

3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของเรดาร์.....16

3.1.1 หลักการทำงาน.....16

3.1.2 การนำเอาเรดาร์ไปประยุกต์ใช้งาน.....17

3.1.2.1 Ground-base radar.....17

3.1.2.2 Shipboard radar.....17

3.1.2.3 Airborne radar.....18

3.1.2.4 Spaceborne radar.....18

3.1.3 การจำแนกชนิดของเรดาร์.....18

3.1.3.1 จำแนกเป็น Primary radar หรือ secondary radar.....18

3.1.3.2 จำแนกเป็น Monostatic radar หรือ bistatic radar.....19

3.1.3.3 จำแนกตามลักษณะการส่งสัญญาณเรดาร์.....19

3.1.4 ย่านความถี่ของเรดาร์.....20

3.1.5 สมการเรดาร์.....21

3.1.6 การเข้ารหัสส่งคลื่น.....25

3.1.7 ระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ.....30

3.1.8 การประมวลผลสัญญาณ.....30

3.2 หลักการของวินด์โปรไฟเลอร์.....34

3.2.1 ตัวอย่างของวินด์โปรไฟเลอร์.....36

3.2.1.1 MU radar.....36

3.2.1.2 RASC Boundary Layer Radar.....36

3.2.1.3 NOAA Profiler Network (NPN).....38

3.2.1.4 MST radar.....38

3.3 คุณลักษณะทั่วไปของวินด์โปรไฟเลอร์.....39

3.4 รายละเอียดทางเทคนิคของวินด์โปรไฟเลอร์.....40

3.5 ข้อมูลที่บันทึกโดยระบบของวินด์โปรไฟเลอร์.....44

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง……45

4.1 การคำนวณหาความเร็วและทิศทางของลม……46

4.1.1 การคำนวณหาเวกเตอร์ของลม……47

4.1.2 การคำนวณความเร็วในแนวบีมโดยวิธีค่าสูงสุดของกำลังงาน……49

4.2 การคำนวณหาพื้นที่ครอบคลุมการสำรวจ……50

4.3 การคำนวณค่าอัตราการตกของฝน……51

4.4 ผลการคำนวณ……54

4.4.1 ผลการคำนวณหาอัตราการตกของฝน……54

4.4.1.1 เปรียบเทียบค่าที่คำนวณกับค่าที่วัดได้ในช่วง 1 วัน……55

4.4.1.2 เปรียบเทียบค่าที่คำนวณกับค่าที่วัดได้ในช่วง 3 เดือน……64

4.4.1.3 เปรียบเทียบค่าที่คำนวณกับค่าที่วัดได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยา ลาดกระบัง……70

4.4.2 การหาชั้นการหลอมละลายของเมฆฝน……71

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ……73

5.1 สรุป……73

5.2 ข้อเสนอแนะ……74

เอกสารอ้างอิง……75

ภาคผนวก……76

ภาคผนวก ก……77

ภาคผนวก ข……78

ประวัติผู้เขียน……79

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การกระจายของเม็ดฝนที่เป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมด..................................9

3.1 ชื่อและช่วงความถี่ที่เรดาร์ใช้งาน และช่วงความถี่ ที่ ITU (International Telecommunication Union) กำหนดให้ใช้กับเรดาร์..22

3.2 ข้อแตกต่างของเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ และเรดาร์สำรวจอากาศ...........................29

3.3 คุณสมบัติโดยทั่วไปของวินด์โปรไฟเลอร์...35

3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบ MU radar..37

3.5 คุณลักษณะที่ใช้ใน RASC Boundary Layer Radar ที่ติดตั้งที่อินโดนีเซีย....................38

3.6 คุณลักษณะที่ใช้ในวินด์โปรไฟเลอร์ของ NOAA Profiler Network (NPN)...................38

3.7 คุณสมบัติของ MST radar...39

3.8 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวินด์โปรไฟเลอร์ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง..42

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ชั้นบรรยากาศจำแนกตามระดับความสูงที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ..............................5

2.2 รูปทรงของเม็ดฝนด้วยการประมาณช่วงขนาดเม็ดฝน................................8

2.3 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรฝนทั้งหมดซึ่งสอดคล้องกับขนาดของเม็ดฝน และอัตราการตกของฝน...10

2.4 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Tipping Bucket ที่ติดตั้งที่จานสายอากาศ และที่ระยะ ประมาณ 2 กม.ในแนวแพร่คลื่น และโครงสร้างภายในอุปกรณ์ วัดปริมาณน้ำฝน...13

2.5 โครงสร้างของเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบคานกระดก...14

2.6 คุณลักษณะของเครื่องวัดน้ำฝนแบบคานกระดก...14

2.7 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Rain Drop Type ที่มีการลดขนาด ของช่องรับฝนให้มีพื้นที่ลดลงครึ่งหนึ่งจากขนาดเดิม...15

3.1 Primary radar และ Secondary radar...18

3.2 Monostatic radar...19

3.3 Bistatic radar...20

3.4 ความถี่ที่เรดาร์ใช้งานและสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า...................................20

3.5 ระยะทางและบีมที่ใช้หาค่า Power density..23

3.6 ค่า RCS ของวัตถุขึ้นอยู่กับรูปร่างและทิศทาง..24

3.7 แผนภาพการส่งพัลส์เรดาร์เทียบเวลากับความสูง...27

3.8 การเคลื่อนที่ของวัตถุ...28

3.9 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ของเรดาร์สำรวจบรรยากาศ...31

3.10 การวัดระยะทางของเรดาร์...32

3.11 พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาการประมวลผลสัญญาณ เรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ...33

3.12 ตัวอย่างของวินด์โปรไฟเลอร์ที่ใช้บีม 3 บีม...36

3.13 แผนภาพการประกอบประมวลผลของสัญญาณสะท้อน ที่เข้ามายังสายอากาศรับสัญญาณ...37

3.14 การวัดความเร็วลมด้วยบีมเรดาร์จำนวน 3 บีม...40

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.15 ตัวอย่างของข้อมูลที่บันทึกจาก Wind profiler จำนวน 1 ชุด....................................43

4.1 จานสายอากาศของ Wind profiler ติดตั้งที่
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง...45

4.2 องค์ประกอบที่ใช้พิจารณาความเร็วลมโดย
ใช้วิธี Velocity – Azimuth Display (VAD)..48

4.3 ทิศทางการสำรวจอัตราการตกของฝนด้วยเรดาร์
ซึ่งมีอยู่สามทิศทางที่ความสูงระดับที่ h...50

4.4 รูปทรงเรขาคณิตของลำบีมของเรดาร์ที่ใช้ในการคำนวณ..51

4.5 สเปกตรัมของการสะท้อนกลับเนื่องจากบรรยากาศ
และการสะท้อนกลับเนื่องจากฝน...52

4.6 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน
(Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ
(Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 300 เมตร จากพื้นดิน
ในวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ.2542...56

4.7 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน
(Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ
(Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 1050 เมตร จากพื้นดิน
ในวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ.2542...56

4.8 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน
(Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ
(Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 2025 เมตร จากพื้นดิน
ในวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ.2542...57

4.9 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน
(Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ
(Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 3000 เมตร จากพื้นดิน
ในวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ.2542...57

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.10 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 4050 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ.2542.....58

4.11 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 300 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ.2542.....59

4.12 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 1050 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ.2542.....59

4.13 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 2025 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ.2542.....60

4.14 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 3000 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ.2542.....60

4.15 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 4050 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ.2542.....61

4.16 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 300 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ.2542.....62

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.17 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 1050 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ.2542……..……………………………………………..62

4.18 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 2025 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ.2542……………………………………………………………63

4.19 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 3000 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ.2542…………..………………………………………..63

4.20 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 4050 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ.2542………..…………………………………………..64

4.21 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนกับเครื่องวัดอัตราการตกของฝน ที่ความสูง300 เมตร..…………………………………………………………….65

4.22 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนกับเครื่องวัดอัตราการตกของฝน ที่ความสูง1050 เมตร………………………………………………………….66

4.23 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนกับเครื่องวัดอัตราการตกของฝน ที่ความสูง2025 เมตร………………………………………………………….67

4.24 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนกับเครื่องวัดอัตราการตกของฝน ที่ความสูง3000 เมตร………………………………………………………….68

4.25 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนกับเครื่องวัดอัตราการตกของฝน ที่ความสูง4045เมตร…..……………………………………………………….69

4.26 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณโดยwind profiler กับค่าที่วัดได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยาลาดกระบัง…………………………………………………...70

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.27 เส้นสเปกตรัมแต่ละความสูง (ซ้าย) และค่าการสะท้อนของเรดาร์ (radar reflectivity) ที่แต่ละความสูง....71

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบการสื่อสารดาวเทียมได้นำมาใช้ประโยชน์ในการศึกษาและการให้บริการต่างๆ มากมาย เนื่องจากระบบการสื่อสารดาวเทียมสามารถส่งสัญญาณครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง และเจาะจงพื้นที่ได้ตามความต้องการแม้กระทั่งในทะเลหรือในชนบทที่ห่างไกล จึงนับได้ว่าระบบการสื่อสารดาวเทียมนั้นมีประโยชน์อย่างมหาศาล แต่เนื่องจากโลกกับดาวเทียมอยู่ห่างกันมากทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านดาวเทียมนั้นต้องเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลกหลายชั้น ชั้นบรรยากาศเหล่านี้จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบการสื่อสารดาวเทียมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่ใช้ความถี่ในย่าน Ku-band มักจะเกิดการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนและการเบี่ยงเบนโพลาไรเซชั่น ผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนี้ส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ในชั้นบรรยากาศนี้จะมีปรากฏการณ์หลายๆอย่าง ที่เป็นอุปสรรคของการสื่อสารผ่านดาวเทียม อาทิเช่น เกล็ดน้ำแข็งในก้อนเมฆ กระบวนการกลั่นตัวของเม็ดฝนรวมถึงความหนาแน่น ขนาดของเม็ดฝนและอัตราการตกของฝน สิ่งเหล่านี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศที่อยู่สูงจากภาคพื้นดิน เพราะฉะนั้นการศึกษาสภาพแวดล้อมในชั้นบรรยากาศจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่มีต่อระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม

ระบบเรดาร์ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมายอันเป็นประโยชน์ต่อการสื่อสารโทรคมนาคม การขนส่ง การพยากรณ์อากาศ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน แต่สำหรับงานนี้ได้นำระบบเรดาร์ที่ติดตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังซึ่งได้รับความช่วยเหลือจากรัฐบาลญี่ปุ่น โดย CRL (Communication Research Laboratory) ของกระทรวงไปรษณีย์และโทรคมนาคม (Ministry of Post and Telecommunication) ได้ทำการติดตั้งระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ หรือ เรียกว่า LAOR (Lower Atmospheric Observation Radar) ไว้ที่บริเวณอาคารสมเด็จพระเทพฯ ของสถาบันฯ ตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ.2537 เพื่อประโยชน์สำหรับการศึกษาและวิจัยทางด้านทิศทางและความเร็วของลม โดยทำการสำรวจและเก็บข้อมูลในชั้นบรรยากาศมาทำการวิเคราะห์หาค่าการเปลี่ยนแปลงของลมในชั้นบรรยากาศ ด้วยการอาศัยหลักการสะท้อนกลับของสัญญาณ เนื่องจากระบบเรดาร์นี้ ได้ถูกออกแบบสำหรับการวัดความเร็ว และทิศทางของลมเป็นหลัก จึงนิยมเรียกระบบนี้ว่า วินด์โปรไฟเลอร์

(Wind profiler) นอกเหนือจากทิศทางและความเร็วของลมแล้ว ยังมีตัวแปรอื่นที่ได้จากการสะท้อนกลับของสัญญาณที่น่าสนใจ และสามารถนำมาใช้ในการศึกษาสภาพแวดล้อมในชั้นบรรยากาศได้อีกเช่น ฝน เป็นต้น ฝนที่ได้จากการวัดด้วยวิธีนี้เป็นฝนที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ซึ่งปัจจุบันการวัดอัตราการตกของฝนสามารถทำได้เพียงระดับพื้นผิวโลกเท่านั้น ดังนั้นเราสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียมที่เดินทางระหว่างโลกกับดาวเทียมได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากกว่าการวัดจากภาคพื้นดินเพียงอย่างเดียว

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

โดยปกติแล้วการวัดข้อมูลฝนนั้นจะทำการวัดในรูปแบบของอัตราการตกของฝน ซึ่งอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการวัดอัตราการตกของฝนนี้เรียกว่า เครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain gauge) เครื่องวัดนี้จะมีรูปร่างลักษณะเป็นถังทรงกระบอก ปากด้านบนเปิดเพื่อรอรับฝนที่ตกลงมา ภายในถังจะมีเซนเซอร์คอยตรวจสอบปริมาณน้ำ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบ จะถูกส่งไปเก็บไว้ที่หน่วยความจำ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปยังหน่วยประมวลผลเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลออกมาเป็นค่าอัตราการตกของฝนในช่วงเวลานั้น ๆ แต่เครื่องวัดอัตราการตกของฝนนี้มีข้อจำกัดตรงที่ต้องติดตั้งบริเวณพื้นดิน จึงเป็นผลทำให้สามารถวัดอัตราการตกของฝนได้เพียง ณ ระดับพื้นดิน

สำหรับระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ เดิมทีใช้สำหรับศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความเร็วของลมในชั้นบรรยากาศที่ระดับความสูงต่าง ๆ เหนือพื้นดิน แต่สำหรับงานนี้ได้นำข้อมูลที่บันทึกได้จากระบบเรดาร์นี้มาทำการวิเคราะห์และประมวลผลหาค่าอัตราการตกของฝนเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ทางด้านงานวิจัยอื่นต่อไป เนื่องจากข้อมูลอัตราการตกของฝนนั้นเป็นข้อมูลที่สำรวจได้เหนือระดับพื้นดิน

1.3 สมมติฐานและแนวความคิดในการวิจัย

การสำรวจของระบบเรดาร์นี้จะเป็นการสำรวจถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในชั้นบรรยากาศ ซึ่ง หมายถึง ลม นั่นเอง การสำรวจนั้นจะเน้นในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความเร็วของลม สำหรับช่วงเวลาที่มีฝนตก จะมีอนุภาคของเม็ดฝนเคลื่อนที่อยู่ในชั้นบรรยากาศเช่นกัน เมื่อพิจารณาสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจะพบว่ามีการสะท้อนกลับเนื่องจากฝนและบรรยากาศปกติ จากจุดนี้เราจะได้ทำการตรวจหาจุดที่มีความสัมพันธ์ต่อการสะท้อนกลับจากฝนและบรรยากาศปกติในชุดข้อมูลที่สำรวจได้ เพื่อนำค่าไปคำนวณหาค่าอัตราการตกของฝนต่อไป โดยข้อมูลที่นำมา

พิจารณานั้นเป็นข้อมูลจากการสำรวจในทิศทางแนวดิ่งของระบบเรดาร์ เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับการตกของอนุภาคเม็ดฝน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยข้อมูลที่ถูกบันทึกด้วยระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ เราทำการประมวลผลข้อมูลเรดาร์เพื่อคำนวณหาค่าอัตราการตกของฝน จากนั้นแสดงค่าที่คำนวณได้ทุก ๆ 5 นาที แล้วแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราการตกของฝนโดยพล๊อตเป็นกราฟตลอดช่วงเหตุการณ์ที่มีฝนตก และเปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนกับเครื่องวัดอัตราการตกของฝนแบบ Rain gauge

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 ศึกษาถึงโครงสร้างของชั้นบรรยากาศ คุณลักษณะของฝนและการวัดอัตราการตกของฝน

1.5.2 ศึกษาถึงระบบเรดาร์และการใช้เรดาร์สำรวจข้อมูลในชั้นบรรยากาศ

1.5.3 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่สำรวจและบันทึกจากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าอัตราการตกของฝน

1.5.4 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูล

บทที่ 2
โครงสร้างของชั้นบรรยากาศและคุณลักษณะของฝน

2.1 การจำแนกชั้นบรรยากาศ

การจำแนกชั้นบรรยากาศสามารถแบ่งตามระดับความสูงและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้หลายชนิดซึ่งจำแนกตามอนุภาคที่ห่อหุ้มโลกที่มีจำนวนมากที่สุดในแต่ละระดับความสูงจึงใช้คำลงท้ายว่า "สเฟียร์" (Sphere) และที่ระดับสูงสุดในแต่ละชั้นจะใช้คำลงท้ายว่า "พอส" (Pause) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 โทรโพสเฟียร์ (Troposphere)

ระดับบนสุดของชั้นนี้เรียกว่า โทรโพพอส (Tropopause) ชั้นนี้ระดับความสูงจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ รูปที่ 2.1 ความร้อนที่ชั้นนี้จะเกิดจากการดูดกลืนรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวของโลก มีการถ่ายเทความร้อนจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคในบรรยากาศซึ่งความร้อนจะสูงมากในบริเวณแถบเส้นศูนย์สูตร มีการระเหยเป็นไอของน้ำก่อให้เกิดเมฆและฝน เกิดลมระดับความสูงประมาณ 15 กิโลเมตร

2.1.2 สตาร์โตสเฟียร์ (Stratosphere)

ระดับบนสุดของชั้นนี้เรียกว่า สตาร์โตพอส (Startopause) ชั้นนี้ระดับความสูงจะแปรผันตามอุณหภูมิ รูปที่ 2.1 โดยมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 270 $^{\circ}$K ที่ระดับความสูงประมาณ 50 กิโลเมตร ชั้นนี้ประกอบด้วยโอโซนจำนวนมากทำหน้าที่ดูดรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 290-300 นาโนเมตร เป็นสาเหตุให้ชั้นนี้มีอุณหภูมิสูง (250-290 $^{\circ}$K)

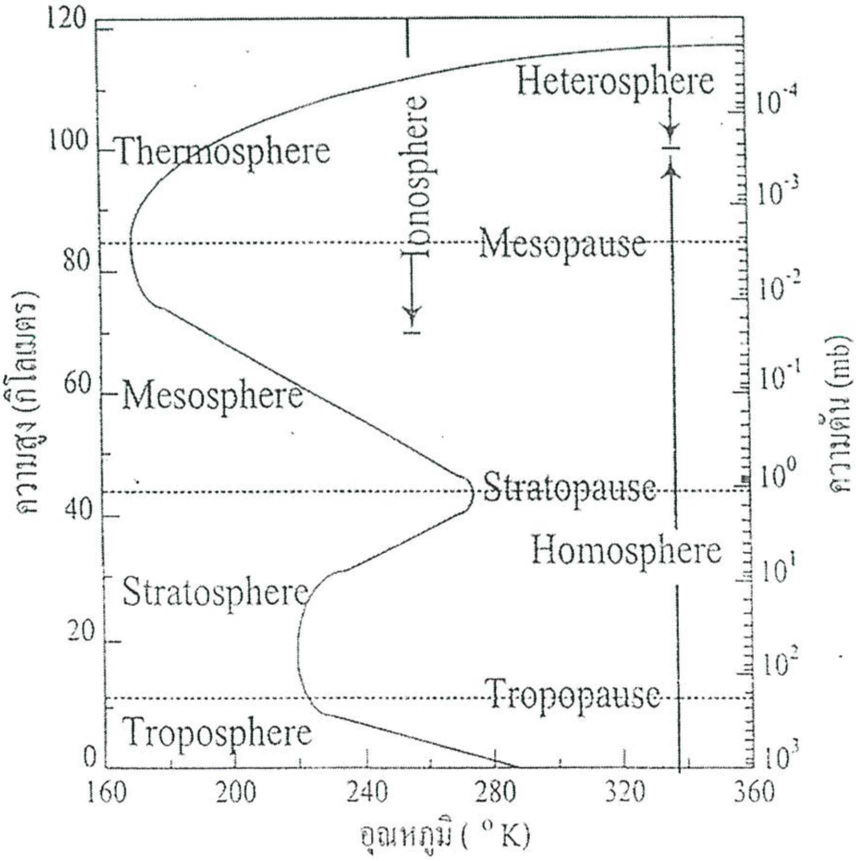
2.1.3 เมโซสเฟียร์ (Mesosphere)

ระดับบนสุดของชั้นนี้เรียกวา เมโซพอส (Mesopause) ชั้นนี้ระดับความสูงจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ รูปที่ 2.1 โดยมีอุณหภูมิต่ำสุดในช่วงฤดูร้อนประมาณ 180-190 $^{\circ}$K ชั้นนี้จะมีความสมดุลทางความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนจากโมเลกุลของออกซิเจนและความเย็นจากก๊าซคาร์บอน-ไดออกไซด์ มีการดูดรังสีอัลตราไวโอเลตเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ชั้นนี้มีระดับความสูงประมาณ 55-80 กิโลเมตร

2.1.4 เทอร์โมสเฟียร์ (Thermosphere)

ชั้นนี้ระดับความสูงจะแปรผันตามอุณหภูมิ รูปที่2.1 อุณหภูมิสูงสุด 1000-2000 K เนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนของออกซิเจนและอนุภาคอื่น ๆ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์โดยตรงซึ่งทำให้สามารถสังเกตความแตกต่างระหว่างกลางวันกับกลางคืนได้อย่างชัดเจนชั้นนี้เป็นชั้นที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดและมีระดับความสูงตั้งแต่ 80-90 กิโลเมตรขึ้นไป

นอกจากนี้ยังเรียกชั้นโทรโพสเฟียร์จนถึงชั้นสตาร์โตสเฟียร์ที่ระดับความสูงประมาณ 100 กิโลเมตรว่า โฮโมสเฟียร (homosphere) เพราะมีไอน้ำและโอโซนรวมตัวกันใน 2 ชั้นนี้ และที่ระดับความสูงประมาณ 300 กิโลเมตร ซึ่งมีออกซิเจนมากที่สุด ระดับความสูงประมาณ 800 กิโลเมตร ก๊าซฮีเลียมและไฮโดรเจนมีมากที่สุด ชั้นดังกล่าวจะมีความแตกต่างขององค์ประกอบของอนุภาคมากจึงเรียกว่า เฮทเตอโรสเฟียร์ (heteorophere) ส่วนที่ระดับความสูงตั้งแต่ 60 กิโลเมตร ขึ้นไปจะมีการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์มากที่สุด เรียกว่า ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) ซึ่งเป็นชั้นที่มีความสำคัญต่อการติดต่อสื่อสารเป็นอย่างมาก ที่ระดับความสูงประมาณ 600-800 กิโลเมตร อนุภาคในบรรยากาศจะชนกันน้อยลงทำให้เกิดการเดินทางออกนอกบรรยากาศเป็นไปได้ดี เรียกว่า เอกซ์โซสเฟียร์ (exosphere)



รูปที่ 2.1 ชั้นบรรยากาศจำแนกตามระดับความสูงที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ

2.2 คุณสมบัติของฝน

2.2.1 ชนิดของฝน

โดยทั่วไปแล้ว ฝนสามารถจะแบ่งออกเป็นแบบใหญ่ ๆ ได้สองแบบด้วยกัน คือ แบบ Stratiform และแบบ Convective ฝนแบบแรกเป็นแบบที่เกิดจากการเปลี่ยนผลึกน้ำแข็งและเกล็ดหิมะมาเป็นหยดน้ำ ซึ่งจะมีอัตราการตกของน้ำฝนต่ำอยู่ระหว่าง 10 ถึง 20 มม./ชม. จะมีความหนาของชั้นฝนคงที่และชั้นรอยต่อระหว่างที่เกล็ดหิมะกลายเป็นหยดน้ำจะมีความหนาประมาณ 400-500 เมตร ซึ่งเป็นชั้นที่มีผลต่อการสะท้อนของสัญญาณเรดาร์เป็นสำคัญ ชั้นนี้เรียกว่า bright band จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเยือกแข็งประกอบด้วยอนูของเมฆฝนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง20-40 ไมโครเมตร จำนวนมาก ส่วนฝนแบบ convective เป็นแบบที่เกิดจากการชนกันของเมฆฝนทำให้เมฆฝนเพิ่มปริมาณมากขึ้นและกลายเป็นหยดน้ำอนูของเมฆฝนชนิดนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-40 ไมโครเมตร

การเกิดฝนนั้นจะเกิดจากทั้งสองแบบพร้อมกัน ซึ่งฝนที่เกิดจากแบบ Stratiform จะมีอาณาบริเวณกว้างในแนวระดับเพราะว่าเมฆฝนแบบนี้สูงจากพื้นดินหลายกิโลเมตร และอัตราการตกจะเบาบาง แต่ระยะเวลาในการตกนาน ส่วนในกรณีของฝนแบบ convective ลักษณะการตกจะขยายออกไปทั่วในแนวดิ่งและแนวระดับ ระยะทางเกือบ 10 กิโลเมตร หรือมากกว่า ซึ่งจะทำให้เกิดฝนตกหนักในชั่วเวลาสั้น เมื่อรวมฝนทั้งสองแบบนี้เข้าด้วยกันแล้ว จะเป็นผลให้เกิดฝนตกหนักในระยะเวลาที่ยาวนาน

CCIR ได้แบ่งขนาดอัตราการตกของฝนไว้ดังนี้

ฝนตกเล็กน้อย (drizzle)	0.25	มม./ชม.
ฝนตกเบาบาง (light rain)	1.0	มม./ชม.
ฝนตกพอประมาณ (moderate rain)	4.0	มม./ชม.
ฝนตกหนัก (heavy rain)	16.0	มม./ชม.
ฝนตกหนักมาก (very heavy rain)	100	มม./ชม.

2.2.2 อาณาบริเวณที่ฝนตก

การที่จะทราบอาณาบริเวณที่ฝนตกนั้น ส่วนสำคัญอยู่ที่ปริมาณของเมฆฝนว่าจะมีมากเท่าใดและทิศทางของลมที่จะพัดฝนให้เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเท่าใด จากการศึกษาและตรวจสอบโดยสถานีอุตุนิยมวิทยาพบว่าระดับความสูงของเมฆฝนนั้น 50% จะอยู่ในระดับความสูง 5-6 กิโลเมตร และอาจจะสูงอีก 16 กิโลเมตร และการเคลื่อนของเมฆฝนจะอยู่ในช่วง 35-40 กม./ชม. ระยะเวลาที่ฝนตกแต่ละครั้งพบว่า ช่วงระยะเวลาที่ฝนตกนั้นคิดเฉลี่ย 50% แล้ว สำหรับอัตรา 20มม./ชม. จะมี

ฝนตกอยู่ประมาณ 6 นาที สำหรับอัตราที่มากกว่า 50 มม./ชม. จะมีฝนตกอยู่ประมาณ 4 นาที เมื่อนำไปสัมพันธ์กับความเร็วของฝนแล้ว 50% ของบริเวณที่มีฝนตกหนักจะมีอาณาบริเวณถึง 3 กิโลเมตร ในทิศทางลม

2.2.3 โครงสร้างของฝน

โครงสร้างของฝนเปลี่ยนแปลงตามภูมิประเทศ ปัจจัยท้องถิ่น เช่น ปริมาณการสะสมของฝน ชนิดและความสัมพันธ์การเกิดของโครงสร้างฝนที่แตกต่างกัน (คือ แบบ stratiform, แบบ convective , แบบผสมกัน) การขยายในแนวตั้งและแนวนอนของเซลล์ของฝน ผลกระทบทั้งหมดนี้สามารถทำนายความสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่นตามเส้นทางระหว่างโลกกับดาวเทียมได้

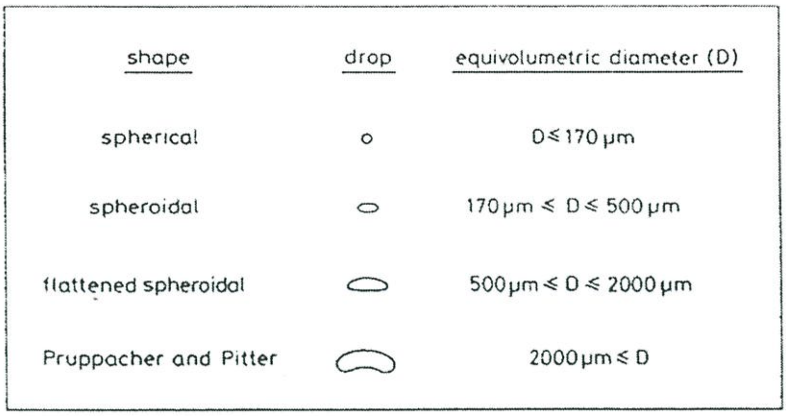
ลักษณะเฉพาะของเซลล์ฝน โดยทั่วไปพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอาณาบริเวณฝนตกจะลดลงเมื่ออัตราการตกของฝนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางนี้จะอยู่ประมาณ 2-5 กิโลเมตร

ความสูงของโครงสร้างฝนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการแพร่กระจายคลื่นผ่านระยะทาง slant path เนื่องจากขอบเขตของความสูงฝนทางแนวตั้งเป็นสิ่งสำคัญต่อการลดทอนของสัญญาณ ข้อมูลเรดาร์นั้นจะแสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของดัชนีการสะท้อน (reflectivity) ของเซลล์ฝนเกือบจะคงที่จากผิวโลกไปถึงความสูงที่มีค่าดัชนีการสะท้อนสูงสุด เซลล์ฝนสามารถที่จะทำเป็นแบบจำลองของแท่งยูนิฟอร์ม (uniform) ไปจนถึงความสูงของค่าดัชนีการสะท้อนสูงสุด ซึ่งความสูงนี้จะสมมติเป็น เกล็ดน้ำแข็ง เกล็ดหิมะ และเกล็ดหิมะที่หลอมละลาย

ฝนแบบ stratiform จะแสดงลักษณะเฉพาะของชั้นที่มีค่าดัชนีการสะท้อนสูงสุด(bright band) เมื่อยิงเรดาร์ผ่านทะลุฝน, bright band จะประกอบไปด้วยเกล็ดหิมะ และเกล็ดหิมะที่หลอมละลายที่สามารถสมมติว่ามีอยู่จริงเหนือชั้นฝนที่เป็นของเหลว ดังนั้น ทั้งเซลล์ฝนแบบ convective และโครงสร้างของฝนแบบ stratiform จะเกิดที่ความสูงของฝนสูงสุด ที่สามารถกำหนดด้วยการวัดดัชนีการสะท้อนของเรดาร์ ความสูงของฝนสูงสุดนี้ ถูกพิจารณาว่าเป็นความสูงที่มีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส (0 ^{0}C isotherm)

2.2.4 รูปทรงของเม็ดฝน

เม็ดฝนที่มีขนาดเล็กนั้นจะมีลักษณะเป็นทรงกลม แต่เมื่อฝนมีอัตราการตกหนักแล้วขนาดของเม็ดฝนจะโตขึ้นและรูปร่างจะผิดรูปไปจากทรงกลม ซึ่งเกิดจากแรงต้านอากาศ และเม็ดฝนขนาดใหญ่นี้รูปร่างจะไม่คงที่แน่นอน จะเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาจนกว่าที่จะแตกกระจายออกเป็นเม็ดเล็กๆ รูปทรงที่แท้จริงของเม็ดฝนที่เวลาขณะใดขณะหนึ่ง จะเป็นการรวมกันระหว่างแรงตึงผิวและแรงต้านอากาศ สำหรับเม็ดฝนที่มีขนาดเล็กมาก (เส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าหรือเท่ากับ 170 ไมโครเมตร) แรงตึงผิวจะมีค่ามากกว่าแรงต้านอากาศภายใต้สภาวะลมทั่วๆ ไป ขนาดเม็ดฝน



รูปที่ 2.2 รูปทรงของเม็ดฝนด้วยการประมาณช่วงขนาดเม็ดฝน

เกือบจะเป็นทรงกลม (spherical) แต่ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 170 และ 500 ไมโครเมตร ภาคตัดขวางของเม็ดฝนจะเป็นวงรี ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 500 และ 2000 ไมโครเมตร ด้านบนจะมีลักษณะมนส่วนด้านล่างจะมีลักษณะแบน ส่วนชนิดสุดท้ายที่ฐานของเม็ดฝนจะกลวง ซึ่งเรียกรูปร่างแบบนี้ว่า Prupacher and Pitter สามารถสรุปรูปทรงของเม็ดฝนได้ ในรูปที่ 2.2 จะสังเกตเห็นว่า เมื่ออ้างถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดฝนที่ไม่เป็นทรงกลมแล้ว จะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางที่มีปริมาตรเท่ากับขนาดเม็ดฝนที่เป็นทรงกลม

2.2.5 การกระจายขนาดเม็ดฝน

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและการกระจายขนาดเม็ดฝน คือ

$$N_{(D)} = N'_{(D)} / V_{(D)} \qquad (2.1)$$

เมื่อ $N'_{(D)}$ คือ จำนวนของเม็ดฝนต่อหนึ่งหน่วยเวลาต่อการเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วยในเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ที่ภาคตัดขวางของพื้นที่หนึ่งของอุปกรณ์วัด, $V_{(D)}$ คือ ความเร็วลม และ $N_{(D)}$ คือ การกระจายขนาดเม็ดฝน (จำนวนของเม็ดฝนที่มีอยู่จริง ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลาง D และ D+dD ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร) โดยทั่ว ๆ ไป การวัดการกระจายของเม็ดฝนจะวัดที่พื้นดิน ดังนั้นจึงกำหนดตัวห้อย g จะใช้สำหรับการวัดที่พื้นดิน ในการประมาณการกระจายขนาดเม็ดฝนที่ความสูง h จะมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$N_{h(D)} = N_{g(D)} x[V_{g(D)} / V_{h(D)}] \qquad (2.2)$$

เมื่อ $N_{h(D)}, N_{g(D)}$ คือ การกระจายขนาดเม็ดฝนที่ความสูง h และที่พื้นดิน

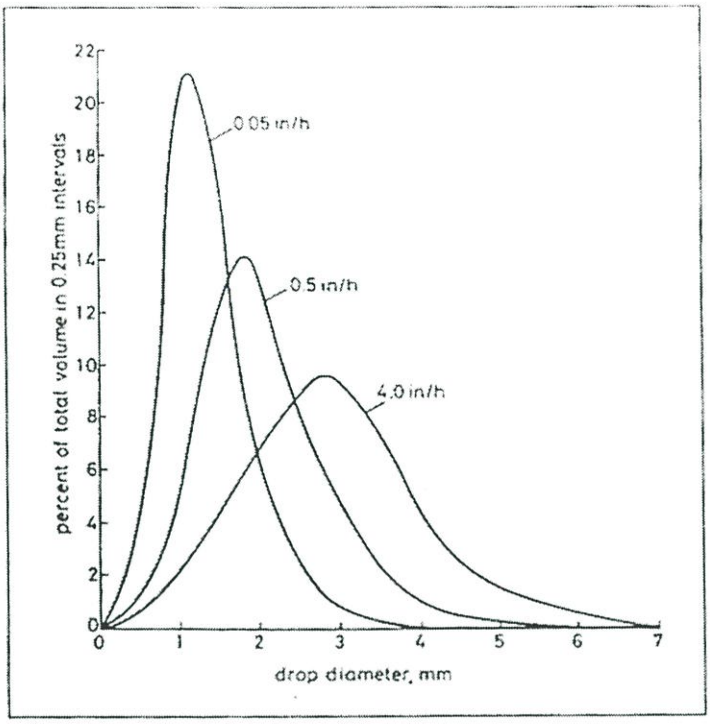
$V_{h(D)}, V_{g(D)}$ คือ ความเร็วลมที่ความสูง h และที่พื้นดิน

ตารางที่ 2.1 การกระจายของเม็ดฝนที่เป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมด

Drop-diameter	Rainfall-rate(in-hr)							
limits	0.01	0.05	0.1	0.5	1	2	4	6
mm-mm								
0.00-0.25	1	0.5	0.3	0.1	0	0	0	0
0.25-0.50	6.6	2.5	1.7	0.7	0.4	0.2	0.1	0.1
0.50-0.75	20.4	7	5.3	1.8	1.3	1	0.9	0.3
0.75-1.00	27	2	10.7	3.9	2.5	2	1.7	1.6
1.00-1.25	23.1	18	17.1	7.5	8.1	3.4	2.8	2.8
1.25-1.50	12.7	21.1	18.3	11	2.5	5.4	3.9	3.4
1.50-1.75	5.5	18.9	14.5	13.5	10.3	2.1	4.8	4.2
1.75-2.00	2	12.4	11.8	14.1	11.8	8.2	6.2	5.1
2.00-2.25	1	8.1	7.4	11.3	12.1	10.7	7.7	6.6
2.25-2.50	0.5	8.4	4.7	9.6	11.2	10.8	8.3	8.3
2.50-2.75	0.2	3.2	3.2	7.7	8.7	10.3	8.7	3
2.75-3.00	0	1.7	2.8	5.9	6.8	8.4	8.4	8.2
3.00-3.25	0	0.8	3.3	4.2	6.8	7.2	9	9.5
3.25-3.50	0	0.8	0.7	2.5	5	6.2	8.3	8.8
3.50-3.75	0	0.4	0.4	1.7	3.2	6.2	8.7	7.3
3.75-4.00	0	0.2	0.4	1.3	2.1	3.8	6.3	6.7
4.00-4.25	0	0.2	0.3	1	1.4	2.9	4.1	6.2
4.25-4.50	0	0	0.2	0.8	1.2	1.8	2.8	4.4
4.50-4.75	0	0	0	0.4	0.3	1.4	2.8	3.2
4.75-5.00	0	0	0	0.4	0.2	1	1.2	2
5.00-5.25	0	0	0	0.2	0.4	0.8	1.3	1.8
5.25-5.50	0	0	0	0.2	0.2	0.5	1.4	1.8
5.50-5.75	0	0	0	0	0.2	0.3	0.2	0.9
5.75-6.00	0	0	0	0	0.2	0.3	0.5	0.7
6.00 6.25	0	0	0	0	0.3	0.2	0.5	0.5
6.25-6.50	0	0	0	0	0	0.2	0.5	0.8
6.50-6.75	0	0	0	0	0	0	0.2	0.5
6.75-7.00	0	0	0	0	0	0	0	0.3

ในการวัดการกระจายขนาดเม็ดฝนนั้น ซึ่งในครั้งแรกจะครอบคลุมขนาดเม็ดฝน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าอัตราการตกของฝนที่สูงขึ้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดฝนมีขนาดปานกลาง ผลการทดลองนี้จะเห็นได้ชัดเมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรฝนทั้งหมดซึ่งสอดคล้องกับขนาดของเม็ดฝนและอัตราการตกของฝน

ในตารางที่ 2.1 ไม่ได้อธิบายผลการทดลองในทางคณิตศาสตร์ ต่อมาการวัดของ Marshall and Palmer[1] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอ็กโปแนนเชียล เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานดังสมการต่อไปนี้

$$N_{g(D)} = N_0 e^{-\lambda D} \qquad (2.3)$$

เมื่อ N_0 และ λ เป็นสัมประสิทธิที่ถูกเลือกให้เหมาะสมกับการวัดการกระจายขนาดเม็ดฝน เทอม N_g และ N_0 มีหน่วยเป็น $mm^{-1}\ m^{-2}$ ในขณะที่ λ มีหน่วยเป็น mm^{-1} เทอม N_0 ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 8000 และ λ มีค่าเป็น $4.1R^{-0.21}$ เมื่อ R คืออัตราการตกของฝนมีหน่วยเป็น มม./ชม. ผลลัพธ์ต่อมาแสดงให้เห็นว่า การกระจายแบบเอ็กโปแนนเชียล สามารถอธิบายได้อย่างสมเหตุสมผลกับข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดเม็ดฝนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 1.5 มิลลิเมตร ส่วนค่าของสัมประสิทธิ์ยังไม่เหมาะสม

ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงแก้ไขการกระจายแบบเอ็กโปแนนเชียลใหม่ โดยสมมุติว่าเม็ดฝนมีขนาดเป็นทรงกลม คือ

$$N_{g(D)} = N_0 e^{-3.67D/D_0} \tag{2.4}$$

ในการกระจายนี้ ค่าจำกัดที่สูงกว่า (D_{max}) และต่ำกว่า (D_{min}) บนขนาดเม็ดฝนถูกกำหนดเทอมของ D_0 ถูกตั้งค่าไว้อย่างน้อยสุดสี่เท่าของขนาด D_{min} และไม่ใหญ่กว่าครึ่งหนึ่งของขนาด D_{max}เพื่อเป็นการแน่ใจว่าครึ่งหนึ่งของเม็ดฝนจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า D_0 นั่นคือ D_0 เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดฝนปริมาตรปานกลาง สำหรับการกระจายของ Marshall and Palmer

$$D_0 = 0.89R^{0.21} \tag{2.5}$$

โดยทั่วๆ ไป เม็ดฝนจะไม่เป็นทรงกลม ดังนั้นจึงมีการกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่าเท่ากับเม็ดฝนที่เป็นทรงกลม D_e นำไปแทนในสมการที่ 2.4 จะได้

$$N_{g(D)} = N_0 e^{-3.67D_e/D_0} \tag{2.6}$$

ซึ่งสมการนี้ คือ การกระจายขนาดเม็ดฝนของ Marshall and Palmer ถูกพบว่าสามารถอธิบายได้ดีมากกับข้อมูลระยะยาว เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการคำนวณการเสียหายของการแพร่กระจายคลื่น

2.3 การวัดปริมาณน้ำฝน

2.3.1 หน่วยที่ใช้ในการวัด

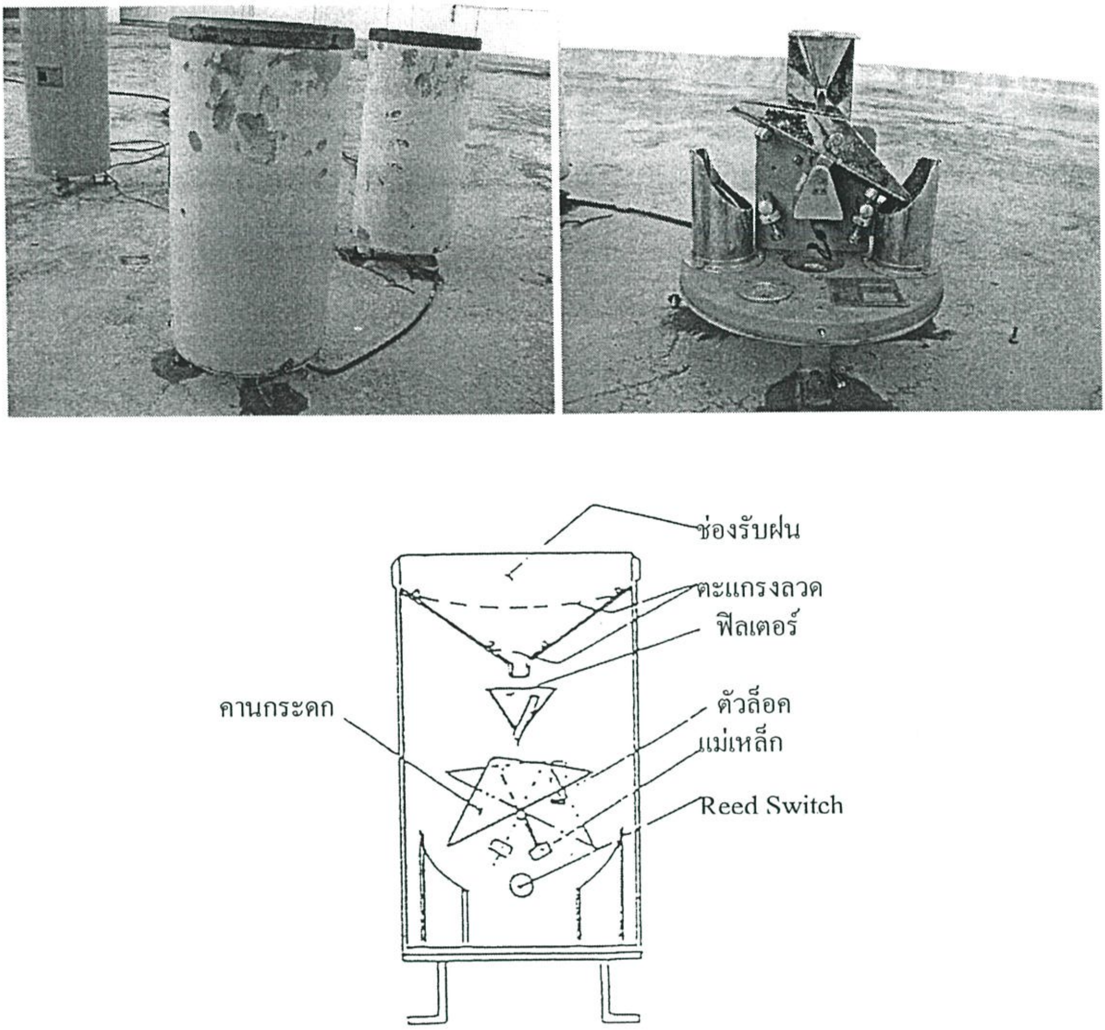
การวัดจำนวนน้ำฝนนั้นใช้วัดเป็นความสูงของน้ำฝนที่ตกลงมาในเนื้อที่จำกัดอันหนึ่ง โดยคิดเสียว่าน้ำฝนนั้นไม่มีการระเหยหรือการไหลซึมไปไหน โดยที่เรารู้เนื้อที่ของปากถัง ดังนั้นเมื่อเราต้องการวัดความสูงหรือความลึกของน้ำฝน เราก็สามารถใช้ไม้บรรทัดหยั่งวัดความสูงได้หรือจะทำเป็นแก้วสำหรับตวงน้ำฝนไว้ต่างหากก็ได้ หน่วยที่ใช้วัดจำนวนน้ำฝนที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้ จะทำการวัดเป็น มิลลิเมตร การอ่านค่าของจำนวน น้ำฝนต้องวัดให้ได้ใกล้เคียงถึง 0.2 มิลลิเมตร สำหรับจำนวนน้ำฝน 10 มิลลิเมตร หรือน้อยกว่า แต่ถ้าจำนวนน้ำฝนมากกว่านี้ ยอมให้ได้ค่าใกล้เคียง 2 % ของจำนวนฝนทั้งหมด ในบางประเทศนั้นจะใช้หน่วยที่วัดเป็นนิ้ว ซึ่งเทียบค่าได้ 1 นิ้ว เท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร ก็นับว่าถูกต้องดี

2.3.2 การติดตั้งเครื่องมือ

ปรากฏว่าจำนวนน้ำฝนที่จะเข้าไปในถังนั้น จะขึ้นอยู่กับลมประการหนึ่ง วิธีการในการติดตั้งเครื่องมือประการหนึ่ง และความสูงของบรรดาสิ่งที่อยู่แวดล้อมอีกประการหนึ่ง ค่าที่เปลี่ยนแปลงเหล่านี้เป็นเหตุมาจากลม และส่วนใหญ่เป็นลมหวนรอบๆ ถังวัดฝนนั้น กระแสอากาศไหลขึ้นทำให้ได้จำนวนฝนน้อยลง และกระแสอากาศไหลลงทำให้ได้จำนวนฝนมากขึ้นกว่าความเป็นจริง ถ้ายิ่งมีลมหวนอย่างแรงและบ่อยๆ จำนวนของฝนที่ได้ก็ยิ่งน้อยกว่าความเป็นจริงยิ่งขึ้น ความแรงและความถี่ของลมหวนนี้ จะขึ้นอยู่กับความแรงของลมอย่างหนึ่ง ลักษณะโดยทั่วไปของพื้นดินรอบๆ เครื่องวัดอย่างหนึ่ง ความห่างและความสูงของสิ่งแวดล้อมของเครื่องวัดอย่างหนึ่งและความสูงของเครื่องซึ่งตั้งอยู่เหนือระดับพื้นดินอย่างหนึ่ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบผลการตรวจของสถานีต่างๆ ด้วยว่าเป็นอย่างไร ในเมื่อสถานีต่างๆ เหล่านั้นได้ทำการติดตั้งเครื่องมือเป็นแบบเดียวกัน สำหรับประเทศไทยเรากำหนดให้ติดตั้งไว้บนพื้นดิน

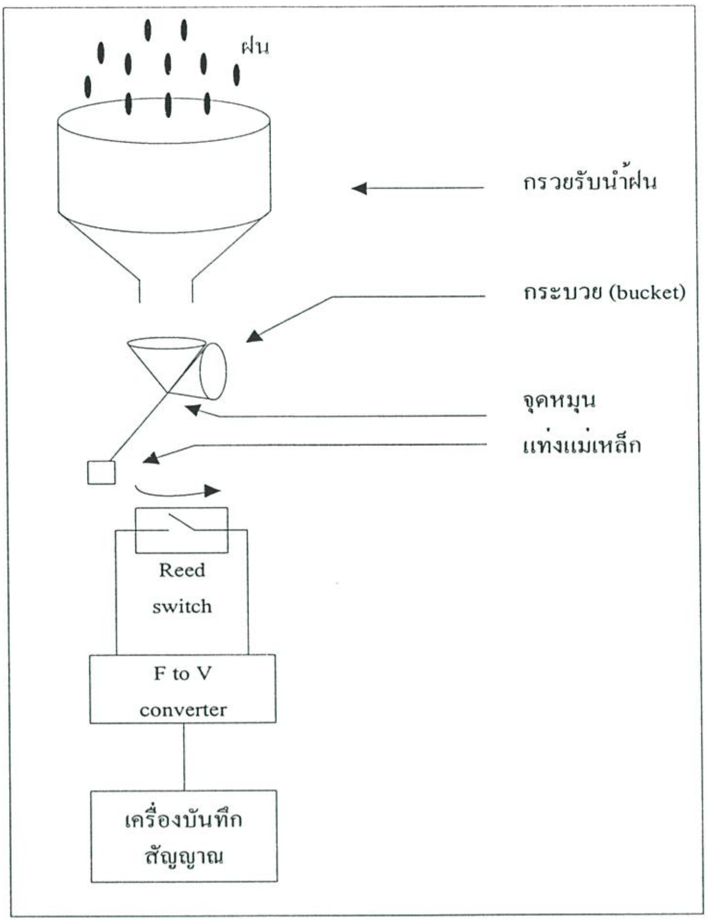
2.3.3 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณน้ำฝนในงานวิจัยส่วนใหญ่มีสองชนิด แบบแรกคือแบบคานกระดก (Tipping Bucket Type) มีขนาดของกระบวยรับน้ำ (Bucket) เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบคานกระดกนี้ใช้เพื่อวัดปริมาณของน้ำฝนที่ตกลงมาซึ่งสามารถติดตั้งไว้ภายนอกอาคารได้และทำการต่อด้วยสายเคเบิลเข้าไปยังเครื่องบันทึกสัญญาณที่อยู่ภายในอาคาร เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบคานกระดกมีหลักการทำงานดังรูปที่ 2.5 กล่าวคือ เมื่อมีฝนตก น้ำฝนจะตกลงสู่กรวยรับน้ำฝน ซึ่งมีรัศมีคงที่อยู่ค่าหนึ่งจากนั้นน้ำฝนจะไหลลงสู่กระบวยเล็กๆ ที่ติดกันอยู่ 2 อัน โดยมีปากของกระบวยที่ตรงกันข้ามเพื่อสลับกับใส่น้ำและเทน้ำเมื่อข้างหนึ่งข้างใดเต็ม การกระดกของกระบวยรับน้ำจะมีเวลาในการทำงานที่แน่นอนประมาณ 0.2 วินาที ซึ่งปริมาณน้ำฝนจากเครื่องวัดน้ำฝนชนิดนี้เท่ากับ nV เมื่อ V เป็นปริมาตรของกระบวย และ n คือจำนวนครั้งที่น้ำฝนถูกเทออก (คือจำนวนพัลส์) ในขณะที่กระบวยเทน้ำออก แท่งแม่เหล็กที่ติดอยู่กับกระบวยจะเคลื่อนที่ไปกระตุ้นการทำงานของสวิตช์หน้าสัมผัสทางไฟฟ้า (reed switch) โดยการสวิตช์ของหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าจะถูกแปลงเป็นระดับแรงดันไฟฟ้า ด้วยชุดแปลงความถี่เป็นแรงดัน (F to V converter) จากนั้นต่อเข้ากับเครื่องบันทึกสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นระดับแรงดันมาบันทึกที่เครื่องวัดสัญญาณ ดังนั้นจึงทำให้ทราบถึงปริมาณน้ำฝน และอัตราการตกของฝน

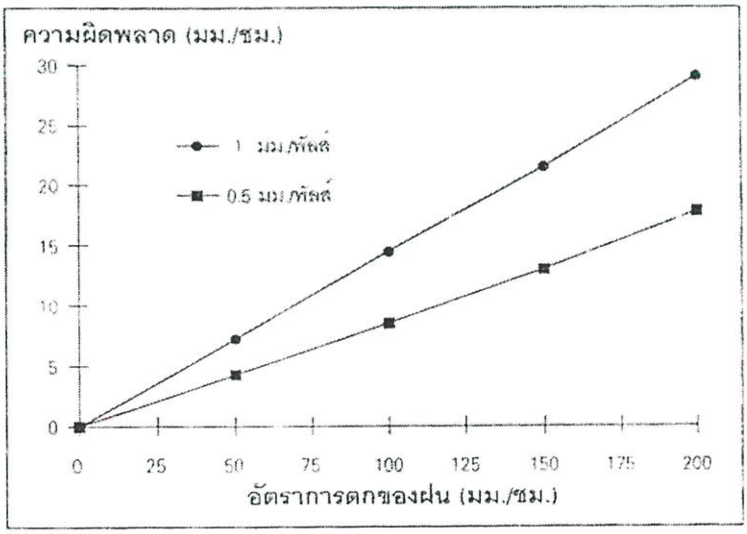


รูปที่ 2.4 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝนแบบ Tipping Bucket ที่ติดตั้งที่จานสายอากาศ และโครงสร้างภายในอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน

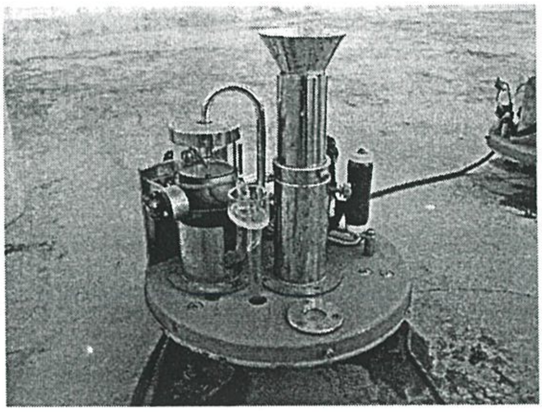
ส่วนในรูปที่ 2.6 แสดงคุณลักษณะของเครื่องวัดน้ำฝนแบบคานกระดก โดยการเปรียบเทียบกันระหว่างอัตราการตกของฝนกับความผิดพลาด เมื่อใช้กระบวยรับน้ำที่มีปริมาตร 0.5 และ 1 มม./พัลส์ จะเห็นได้ว่า ถ้าใช้เครื่องวัดน้ำฝนแบบคานกระดกที่มีขนาดกระบวยเล็กกว่า (0.5 มม./พัลส์) จะทำให้ความผิดพลาดในการวัดน้อยกว่าที่อัตราการตกของฝนเดียวกัน (สาเหตุสำคัญก็คือการกระฉอกของน้ำในขณะที่กระบวยกระดกเทน้ำทิ้ง) แต่ถ้าใช้ขนาดกระบวยน้ำฝนเล็กเกินไป ก็ไม่สามารถวัดอัตราการตกของฝนที่ตกหนักมากๆ ได้ เนื่องจากเมื่อฝนตกหนักมากๆ จะทำให้ที่กระบวยของเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนชนิดนี้เทน้ำทิ้งไม่ทัน ทำให้เกิดความผิดพลาดอย่างสูง

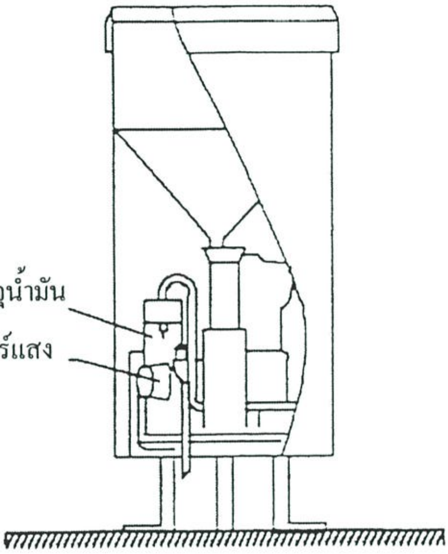


รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบคานกระดก



รูปที่ 2.6 คุณลักษณะของเครื่องวัดน้ำฝนแบบคานกระดก





รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบ Rain Drop Type (เซนเซอร์หยดน้ำ)

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำค่าปริมาณน้ำฝนทุกๆ 1 นาทีที่ได้จากเครื่องวัดแบบคานกระดกมาคำนวณเป็นค่าในหน่วยมิลลิเมตรต่อชั่วโมง แล้วค่าที่ได้ไม่ละเอียดเพียงพอ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเครื่องวัดอัตราการตกของฝนแบบที่สองมาใช้งาน นั่นก็คือ เครื่องวัดแบบเซนเซอร์หยดน้ำ (Rain Drop Type: RD) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 เครื่องวัดนี้มีความละเอียดอยู่ที่ 0.0083 มิลลิเมตรต่อน้ำหนึ่งหยดที่ผ่านตัวเซ็นเซอร์ แต่อุปกรณ์นี้มีข้อจำกัดอยู่ในกรณีที่อัตราการตกของฝนสูงมากๆ ค่าสูงสุดที่อุปกรณ์ตัวนี้วัดได้คือ 14 หยดต่อวินาที ก่อนที่หยดน้ำที่ผ่านชั้นน้ำมันจะเป็นสายต่อเนื่องกันด้วยปากรับน้ำฝนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร หรือที่อัตราการตกของฝนประมาณ 420 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง แต่จากข้อจำกัดของอุปกรณ์แปลงสัญญาณพัลส์ให้เป็นแรงดันไฟตรงจึงทำให้วัดค่าอัตราการตกของฝนสูงสุดได้ประมาณ 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ในช่วงเวลาการเก็บข้อมูล 1 นาที

บทที่ 3
การใช้เรดาร์สำรวจข้อมูลในชั้นบรรยากาศ

เรดาร์ (RADAR) ย่อมาจาก Radio detection and ranging เป็นการส่งสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟแล้วรับสัญญาณสะท้อนกลับจากวัตถุที่ต้องการตรวจหา ระบบเรดาร์นำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมายอันเป็นประโยชน์ต่อการติดต่อสื่อสารทางโทรคมนาคม การขนส่ง การพยากรณ์อากาศ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และความต้องการในการนำไปประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้พบว่าเรดาร์ยังสามารถใช้ได้ทั้งทางบก ทางน้ำ และทางอากาศ อีกด้วย สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการทำงานโดยทั่วไปของระบบเรดาร์ ตลอดจนการประยุกต์ใช้เรดาร์ในการวัดข้อมูลในบรรยากาศอันจะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ข้อมูลในบรรยากาศต่อไป

3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของเรดาร์

ระบบเรดาร์จะทำงานด้วยหลักการเบื้องต้นที่คล้ายคลึงกันตามหลักการทำงานที่ได้กล่าวไว้ในรายละเอียดต่อไป สำหรับในการเลือกใช้งานเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เฉพาะด้านจะต้องเลือกคุณสมบัติที่ต้องการให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ และชนิดของเรดาร์เป็นหลักเพื่อให้ได้ผลการตรวจจับและวัดข้อมูลที่ต้องการได้ดีที่สุดให้ความถูกต้องแม่นยำ และน่าเชื่อถือที่สุด จะเห็นว่าการพิจารณาเลือกระบบที่เหมาะสมเป็นประเด็นแรกที่ต้องคำนึงถึงและนำมาพิจารณาก่อนอื่น

3.1.1 หลักการทำงาน

เรดาร์ทำการส่งสัญญาณโดยอาศัยการส่งคลื่นวิทยุในช่วงความถี่ไมโครเวฟซึ่งถือว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแพร่กระจายสู่บรรยากาศด้วยความเร็วแสง (3x10 เมตรต่อวินาที) และมีผลกระทบต่อวัตถุที่อยู่ตามแนวเส้นทางเดินของมัน โดยเมื่อมันตกกระทบวัตถุใดๆ จะมีผลทำให้เกิดกระกระจาย และเบี่ยงเบนและการหักเหของคลื่น เรานำเอาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ในการตรวจหาระยะทางและความเร็วของวัตถุ นอกจากนี้ยังใช้ระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ต้องการวัดซึ่งสัมพันธ์กับจุดอ้างอิงที่เรารู้ โดยการนำเอาคลื่นดังกล่าวมารวมกันเป็นบีมแล้วส่งผ่านสายอากาศของเรดาร์ ระบบเรดาร์มีจุดเด่นตรงที่สามารถวัดระยะทางได้อย่างรวดเร็วซึ่งไม่มีเทคนิควิธีการอื่นสามารถทำได้ดีเท่า และเรดาร์สมัยใหม่ยังสามารถดึงเอาข้อมูลอย่างอื่นจากสัญญาณสะท้อนของวัตถุได้อีกด้วย

สำนักหอสมุดกลาง _พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชนิดของวัตถุที่เรดาร์สามารถตรวจจับได้สามารถจำแนกได้เป็น 2 จำพวกคือ

1. **Soft target:** วัตถุประเภทนี้จะเป็นองค์ประกอบของชั้นบรรยากาศ เช่น เมฆ ไอน้ำ ฝุ่นละออง ฝน ก๊าซ และอนุภาคอื่นๆ ในอากาศ
2. **Hard target:** วัตถุชนิดนี้จะให้ค่าการสะท้อนที่สูงกว่า soft target จะไม่สามารถระบุรูปร่างได้อย่างชัดเจนแล้ว ค่าการกระจายของอนุภาคยังเพิ่มตามระยะทางด้วย นั่นคือ สัญญาณสะท้อนจะเพิ่มตามระยะทางที่มากขึ้นซึ่งตรงกันข้ามกับ hard target

ข้อแตกต่างของ soft target กับ hard target นอกจาก soft target จะไม่สามารถระบุรูปร่างได้อย่างชัดเจนแล้ว ค่าการกระจายของอนุภาคยังเพิ่มตามระยะทางด้วย นั่นคือ สัญญาณสะท้อนจะเพิ่มตามระยะทางที่มากขึ้นซึ่งตรงกันข้ามกับ hard target

หลักการทำงานของเรดาร์โดยทั่วไปเริ่มจากอุปกรณ์เครื่องส่งสัญญาณทำการผลิตคลื่นวิทยุความถี่สูง หรือคลื่นไมโครเวฟ ส่งไปยังสายอากาศส่งคลื่น โดยขนาด ลักษณะ และคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน การส่งคลื่นจะส่งไปในลักษณะของบีม ซึ่งเปลี่ยนแปลงทิศทางตามการหมุน หรือการเคลื่อนที่ของสายอากาศ เพื่อให้คลื่นกระจายออกไปโดยรอบเพื่อวัตถุประสงค์ในการตรวจหาวัตถุที่ต้องการวัด โดยคลื่นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง (ในกรณีที่ส่งผ่านอากาศ) เมื่อคลื่นตกกระทบวัตถุ จะเกิดการสะท้อนสัญญาณ และมีสัญญาณบางส่วนสะท้อนกลับมายังตัวจานรับสัญญาณเรดาร์ แล้วจึงจะส่งต่อไปยังอุปกรณ์เครื่องรับสัญญาณเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนซึ่งอาจมีปนมาออกก่อนที่จะทำการขยายสัญญาณเนื่องจากสัญญาณที่สะท้อนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ส่ง เพื่อให้ได้ระดับของสัญญาณที่เหมาะสมก่อนนำไปวิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผล

3.1.2 การนำเอาเรดาร์ไปประยุกต์ใช้งาน

ระบบเรดาร์ในระยะแรก ๆ เข้ามามีบทบาทเกี่ยวกับทางด้านการทหาร แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาเรดาร์มาใช้ประโยชน์ทางด้านอื่นๆ อีกมากมาย เช่น ใช้กับเรือนำร่องเพื่อให้ถึงฝั่งได้อย่างปลอดภัย ใช้กับเครื่องบินเพื่อควบคุมการจราจรทางอากาศที่สนามบิน ใช้ตรวจจับความเร็ว ตรวจสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศ ซึ่งแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้ [2]

3.1.2.1 Ground-base radar: ใช้ในการตรวจหาตำแหน่ง การเ คลื่อนไหว ความเร็ ว (ใช้กับพวกเรดาร์ของกรมตำรวจ) ตรวจดูเส้นทางการบินของเครื่องบิน หรือวัตถุในอากาศ

3.1.2.2 Shipboard radar: ใช้ในการเดินเรือเพื่อช่วยนำร่องในการเดินเรือได้อย่างปลอดภัย เช่น ตรวจหาตำแหน่งของทุ่นลอยในทะเล ตรวจหาแนวชายฝั่ง และป้องกันการชนกันของเรือหรือชนภูเขาน้ำแข็งในกรณีที่มีเมฆหมอกปกคลุมจนยากแก่การสังเกตได้ด้วยตาเปล่า

3.1.2.3 Airborne radar: ใช้ในการตรวจจับเครื่องบินลำอื่น ตรวจหาเรือที่แล่นในทะเล หรือใช้ในการลงจอดของเครื่องบิน นอกจากนี้ยังใช้เป็นแผนที่บอกตำแหน่งของเกาะหรือแผ่นดิน ตรวจหาสภาพภูมิอากาศเพื่อใช้ในการพยากรณ์อากาศ

3.1.2.4 Spaceborne radar: ใช้ในการนำทางอากาศยาน รวมทั้งการสำรวจข้อมูลจากระยะไกล (Remote sensing) เพื่อใช้ในการสำรวจสภาพภูมิอากาศและมลภาวะ สำรวจพื้นผิวโลกเพื่อตรวจดูทรัพยากรธรรมชาติ สำรวจพื้นที่ทางการเกษตร ป่าไม้ และสภาพภูมิประเทศ

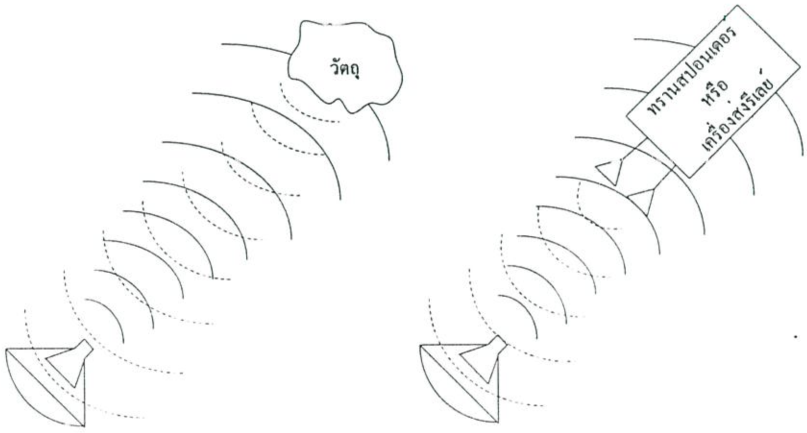
3.1.3 การจำแนกชนิดของเรดาร์

การจำแนกชนิดของเรดาร์สามารถพิจารณาอย่างกว้างๆ ได้ดังนี้ [3]

3.1.3.1 จำแนกเป็น Primary radar หรือ secondary radar

- Primary radar แสดงในรูปที่ 3.1 (ก) สัญญาณที่สะท้อนจากวัตถุไปยังเครื่องรับเป็นสัญญาณที่สะท้อนจากตัววัตถุนั้นโดยตรง

- Secondary radar แสดงในรูปที่ 3.1 (ข) สัญญาณที่สะท้อน (Reflected signal) ไม่ใช่สัญญาณสะท้อนจากตัววัตถุโดยตรง แต่จะเกิดจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในวัตถุ ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์จำพวกเครื่องส่งรีเลย์ (Relay transmitter) หรือ ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณไปยังสายอากาศทางด้านรับของเรดาร์ ในบางกรณีการส่งคลื่นไปในบรรยากาศจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากสาเหตุต่างๆ ซึ่งเมื่อคลื่นไปกระทบวัตถุทำให้สัญญาณการสะท้อนกลับไม่แรงพอจึงต้องใช้ตัวทวนสัญญาณ (Repeater) ติดไปกับวัตถุเพื่อให้คลื่นนั้นแรงพอ

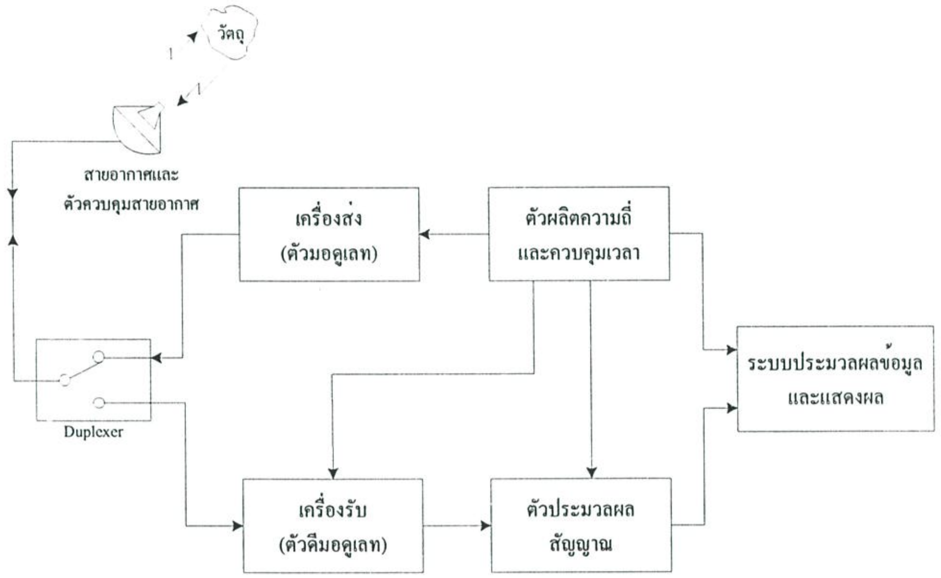


Primary radar (ก) Secondary radar (ข)

รูปที่ 3.1 Primary radar และ Secondary radar

3.1.3.2 จำแนกเป็น Monostatic radar (Bistatic radar)

- Monostatic radar แสดงในรูปที่ 3.2 เรดาร์ชนิดนี้ใช้สายอากาศรับ-ส่งร่วมกันโดยมีสวิตซ์อัตโนมัติ เรียกว่า ดูเพล็กเซอร์ (Duplexer) หรือ TR-Switch ทำหน้าที่เป็นตัวแยกสัญญาณรับ-ส่ง ไม่ให้ปนกัน เรดาร์ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ระบบนี้เพื่อเป็นการประหยัดสายอากาศ

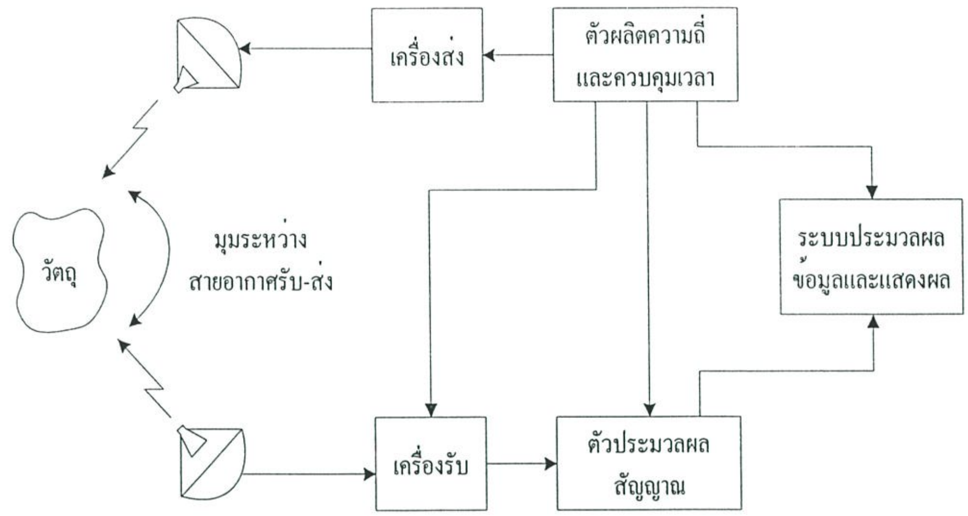


รูปที่ 3.2 Monostatic radar

- Bistatic radar ระบบนี้ใช้สายอากาศรับ- ส่งแยกกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ปกติเรดาร์ชนิดนี้มักจะใช้กับคลื่นต่อเนื่อง (CW : Continuous wave) หรือคลื่นต่อเนื่องที่มีการมอดูเลตทางความถี่ (FMCW : Frequency - modulated continuous wave)

3.1.3.3 จำแนกตามลักษณะการส่งสัญญาณเรดาร์

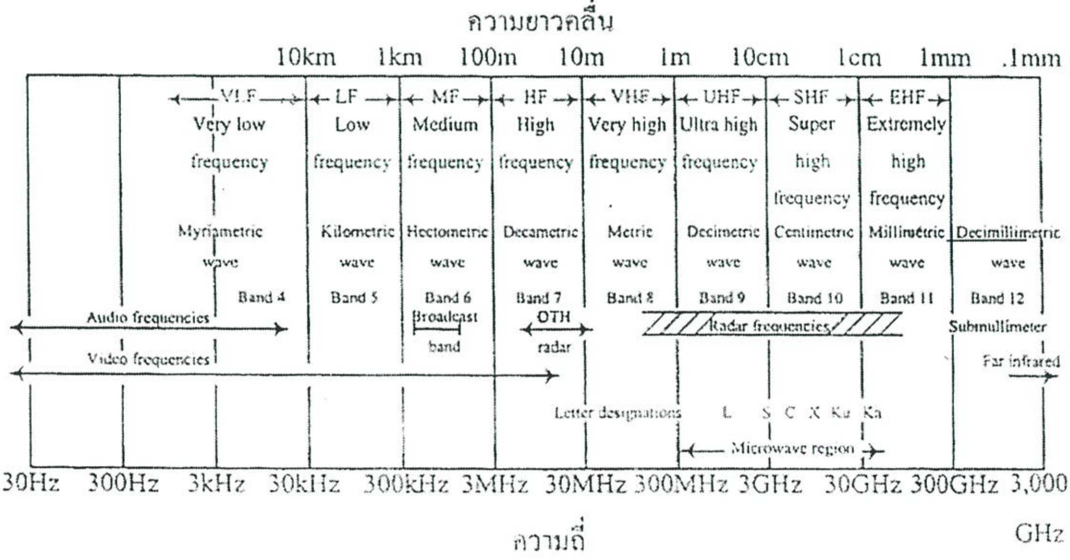
- Pulse radar
- CW radar
- FM-CW radar
- Pulse Doppler radar



รูปที่ 3.3 Bistatic radar

3.1.4 ย่านความถี่ของเรดาร์

ระบบเรดาร์จะใช้ช่วงความถี่ประมาณ 220 MHz ถึง 35 GHz ดังแสดงแถบความถี่ที่เรดาร์ใช้งานในรูปที่ 3.4 แต่ยังมีช่วงความถี่อื่นที่เรดาร์ใช้งานได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 ความถี่ที่เรดาร์ใช้งานและสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การใช้งานระบบเรดาร์ในแต่ละช่วงความถี่ โดยทั่วไปสามารถสรุปได้ดังนี้ [2]

HF ใช้กับเรดาร์นับวัตถุที่เคลื่อนที่ตามแนวเส้นขอบฟ้า เช่น เครื่องบิน ขีปนาวุธ และเรือ รวมไปถึงการวัดในระยะไกลๆ แต่ให้ความชัดเจนทางรายละเอียดน้อย เรียกว่า over – the - horizon (OTH) radar มักจะใช้วัดในมหาสมุทร

VHF และ UHF ใช้วัดระยะไกล หรือจับการเคลื่อนที่ในระดับแนวแส้นสายตา (line-of-sight) แต่ให้ความชัดเจนทางรายละเอียดน้อยถึงปานกลาง ประสิทธิภาพในการวัดไม่ขึ้นกับสภาพดินฟ้าอากาศ

L-band วัดการเคลื่อนที่ในระยะไกล และการควบคุมการจราจร ประสิทธิภาพในการวัดใช้ได้ในสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงน้อยมาก

S-band วัดการเคลื่อนที่ระยะใกล้ ประสิทธิภาพในการวัดใช้ได้ในสภาพอากาศที่มีฝนตกหนักหรือมีหิมะ

C-band วัดการเคลื่อนที่ระยะใกล้ และตรวจหาวัตถุระยะไกลได้ดี ประสิทธิภาพในการวัดสามารถวัดได้ในสภาพอากาศที่มีฝนตกน้อยหรือปานกลาง

X-band วัดการเคลื่อนที่ระยะใกล้ในสภาพอากาศแจ่มใส และจะลดประสิทธิภาพลงเมื่อมีฝน

Ku และ Ka-band ตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่ในระยะใกล้ ใช้ได้กับทุกสภาพอากาศ ใช้กับภาพถ่ายดาวเทียมที่ให้ความชัดเจนทางรายละเอียดสูง

K-band ใช้วัดการระเหยของน้ำ (ความถี่นี้ใช้น้อยมาก)

V, W และ mm วัดได้ในระยะใกล้เมื่ออากาศแจ่มใส ถ้ามีฝนตกจะถูกจำกัดระยะในการวัด ใช้ทางด้านการทหาร และการทดลองหรือทดสอบ ตลอดจนการสำรวจข้อมูลระยะไกล (remote sensing)

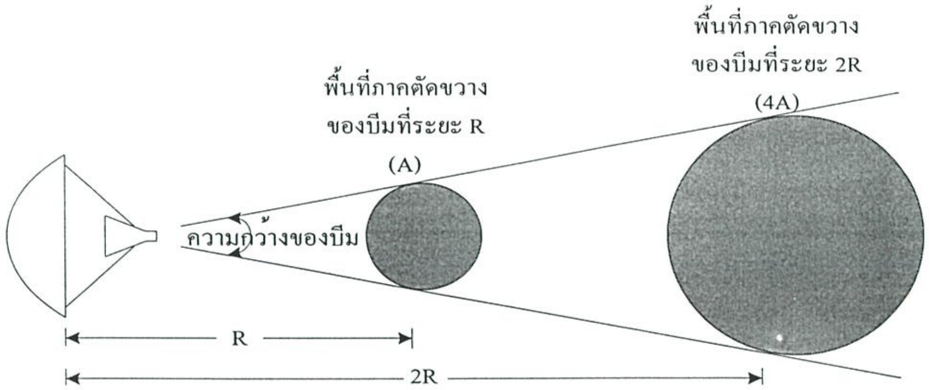
3.1.5 สมการเรดาร์

สมการเรดาร์เกี่ยวข้องกับระยะทางของเรดาร์ คุณลักษณะของเครื่องส่ง เครื่องรับ สายอากาศ วัตถุที่ต้องการวัด และสภาวะแวดล้อมอื่นๆ ซึ่งสมการเรดาร์ไม่เพียงแต่มีประโยชน์ในการกำหนดระยะทางที่ไกลที่สุดที่เรดาร์สามารถวัดได้ แต่ยังเป็นตัวช่วยให้เข้าใจระบบการทำงานของเรดาร์และยังเป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบเรดาร์อีกด้วย สมการเรดาร์ที่สามารถพิจารณาในรูปอย่างง่ายๆ ประกอบด้วย [3]

- ค่า Power density คือ ค่ากำลังงานที่ตกกระทบวัตถุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนระนาบมีค่าเท่ากับค่ากำลังงานที่เรดาร์ใช้ส่งคลื่นหารด้วยพื้นที่ของบีมในระยะทางตรงตำแหน่งที่วัตถุที่วัดอยู่ดังแสดงในรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.1 ชื่อและช่วงความถี่ที่เรดาร์ใช้งาน และช่วงความถี่ที่ ITU (International Telecommunication Union) กำหนดให้ใช้กับเรดาร์

ความถี่	ช่วงความถี่	ช่วงความถี่ที่ ITU กำหนด
HF	3.30 MHz	1.605-40 MHz หรือมากกว่านั้น
VHF	30-300 MHz	138-144 MHz
		216-255 MHz
UHF	300-1,000 MHz	420-450 MHz
		890-942 MHz
L	1,000-2,000 MHz	1,215-1,400 MHz
S	2,000-4,000 MHz	2,300-2,500 MHz
		2,700-3,700 MHz
C	4,000-8,000 MHz	5,250-5,925 MHz
X	8,000-12,000 MHz	8,500-10,680 MHz
Ku	12-18 GHz	13.4-14 GHz
		15.7-17.7 GHz
K	18-27 GHz	24.05-24.25 GHz
Ka	27-40 GHz	33.4-36 GHz
V	40-75 GHz	59-64 GHz
W	75-110 GHz	76-81 GHz
		92-100 GHz
mm	110-300 GHz	126-142 GHz
(Millimeter)		144-149 GHz
		231-235 GHz
		238-248 GHz



รูปที่ 3.5 ระยะทางและบีมที่ใช้หาค่า Power density

พื้นที่ของลำบีมที่ระยะทางใดๆ เป็นพื้นที่ของทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะทางหารด้วยอัตราขยายของสายอากาศค่า Power density เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P/A_F = \frac{P_T}{4\pi R_T^2 / G_T} \tag{3.1}$$

เมื่อ P/A_F แทน Power density (W/m^2)

R_T แทน ระยะทางจากเครื่องส่งไปยังเป้าหมาย (m)

$4\pi R_T^2$ แทน พื้นที่ผิวของทรงกลมรัศมี R_T (m^2)

G_T แทน เกนของสายอากาศ

P_T แทน Power ที่ส่ง

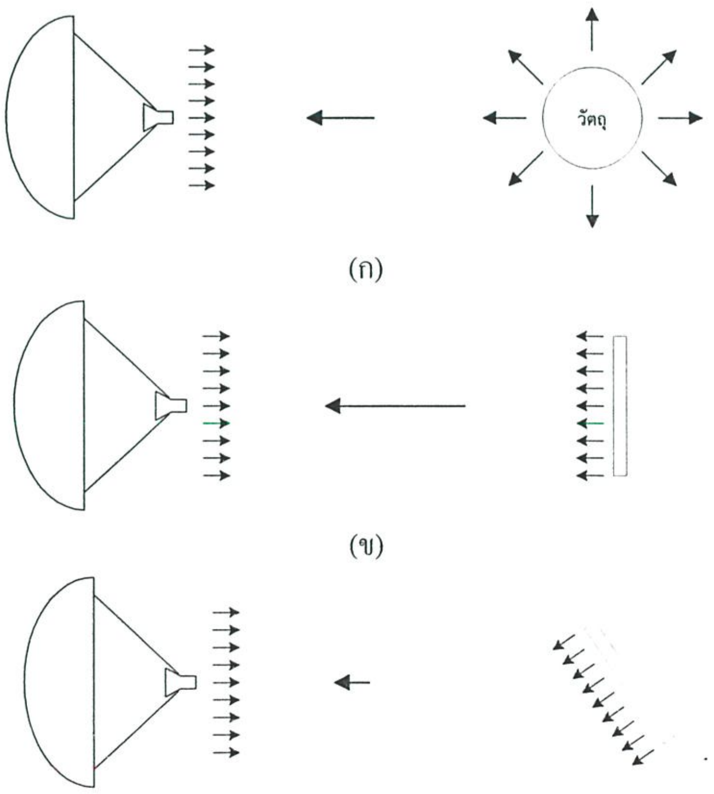
ค่ากำลังงานที่สะท้อนจากวัตถุ (Target reflection) ในการแพร่กระจายพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางใด ๆ (ถ้าตัวกลางเป็นบรรยากาศ ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance)ในบรรยากาศกรณี Free space มีค่าเท่ากับ 120) ค่าพลังงานที่สะท้อนกลับโดยการเดินทางผ่านตัวกลางใดๆ จะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นที่ส่งไปกระทบกับพื้นผิววัตถุ โดยลักษณะและทิศทางของคลื่นที่สะท้อนกลับจะขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุนั้นๆ เช่น ถ้าพื้นผิววัตถุเป็นทรงกลม จะเกิดการสะท้อนกลับในด้านเดียวกับคลื่นที่ตกกระทบ ทั้งนี้ทิศทางการสะท้อนกลับจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งและทิศทางในการวางตัวของระนาบด้วย ดังแสดงภาพตัวอย่างในรูปที่ 3.6 และจะเรียกส่วนของพลังงานที่คลื่นสะท้อนกลับในทิศทางของสายอากาศรับของเรดาร์ว่า การกระจายย้อนกลับ (Backscatter)

ค่ากำลังงานที่สะท้อนจากวัตถุจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ Power density และคุณสมบัติในการสะท้อนของวัตถุ เรียกว่า ค่า Radar cross-section (RCS) ของวัตถุ สามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$P_{Tgt} = \frac{P}{A_F}\sigma$$
$$= \frac{P_T G_T}{4\pi R_T^2}\sigma \qquad (3.2)$$

เมื่อ P_{Tgt} เป็น ประสิทธิภาพกำลังงานที่สะท้อนของวัตถุในทิศทางของเรดาร์ (W) และ σ เป็น ค่า Radar cross-section (RCS) ของวัตถุ (m^2)

จากรูปที่ 3.6 เราจะเห็นว่า ในกรณีที่วัตถุเป็นทรงกลมซึ่งกระจายกำลังงานในทุกทิศทางทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับไปยังเรดาร์มีเป็นส่วนน้อย ทำให้คา RCS น้อย ถ้าวัตถุเป็นระนาบและทิศทางตั้งตรงกับเรดาร์ค่ากำลังงานในการสะท้อนกลับจะสะท้อนได้หมด ทำให้มีค่า RCS มาก ในกรณีที่วัตถุเป็นระนาบแต่วางเอียงไปจากเรดาร์ทำให้ค่ากำลังงานที่สะท้อนกลับสะท้อนไปไกลจากเรดาร์จึงทำให้มีค่า RCS น้อยที่สุด



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3.6 ค่า RCS ของวัตถุขึ้นอยู่กับรูปร่างและทิศทาง

(ก) วัตถุทรงกลม

(ข) วัตถุที่เป็นระนาบและมีทิศทางตั้งตรงกับเรดาร์

(ค) วัตถุที่เป็นระนาบตั้งในทิศทางเอียงไปจากเรดาร์

Backscatter propagation เป็นค่าพลังงานที่สะท้อนกลับอันเนื่องมาจากการแพร่กระจายคลื่นของวัตถุด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่น

ค่า Power density ของคลื่นที่มีการสะท้อนคลื่นกลับไปยังเรดาร์ หาได้จากอัตราส่วนของค่ากำลังงานที่สะท้อนจากวัตถุกับพื้นที่ผิวทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะทางจากวัตถุไปยังเรดาร์ (พิจารณากรณีใช้สายอากาศรับ-ส่งร่วมกัน เพราะว่าระยะทางจากสายอากาศส่งไปยังวัตถุมีค่าเท่ากับระยะางจากวัตถุไปยังสายอากาศรับ) เขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$P / A_B = \frac{P_T G_T}{4\pi R_T^2} \sigma \frac{1}{4\pi R_R^2} \tag{3.3}$$

เมื่อ P/A_B เป็นความหนาแน่นของกำลังงานที่สะท้อนกลับจากวัตถุไปยังสายอากาศ ทางด้านรับ (Backscatter power density) (W/m^2)

R_R เป็นระยะทางจากวัตถุไปยังสายอากาศทางด้านรับของเรดาร์ (เมตร)

ค่าอัตราการขยายของสายอากาศ (Antenna gain) อัตราขยายของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญทางด้านเครื่องส่ง ส่วนลักษณะพื้นที่ของวัตถุที่สามารถให้ค่าการสะท้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Effective area) นั้นจะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญทางด้านรับ ดังนั้น สำหรับสายอากาศทุกชนิดต้องพิจารณาค่าทั้งสองนี้ไปพร้อม ๆ กัน เพื่อให้การส่งและรับมีประสิทธิภาพมากที่สุด อัตราขยายของสายอากาศเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G = \frac{4\pi A_E}{\lambda^2} \tag{3.4}$$

เมื่อ G แทน อัตราขยายของสายอากาศ

A_E แทน Effective area (m^2)

λ แทน ความยาวคลื่น (m)

3.1.6 การเข้ารหัสส่งคลื่น

ในการส่งคลื่นจากสายอากาศ ถ้าต้องการวัดระยะทางจะต้องมีการเข้ารหัส (Coded) หรือทำเครื่องหมาย (Marked) เพื่อเป็นตัวระบุค่าสัญญาณของคลื่นเมื่อคลื่นสะท้อนไปยังสายอากาศ ถ้าหากเราส่งคลื่นออกไปในลักษณะที่ต่อเนื่องเป็นสายยาวๆ จะไม่สามารถระบุได้ว่าคลื่นที่ส่งออกไปคลื่นไหนเป็นตัวทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนกลับมายังเครื่องรับ นั่นคือไม่สามารถจับเวลาได้ว่าคลื่นไหนใช้เวลาเท่าไรในการส่งไปยังวัตถุแล้วสะท้อนกลับมายังเครื่องรับ

การเข้ารหัสในการส่งคลื่นมี 2 วิธี คือ

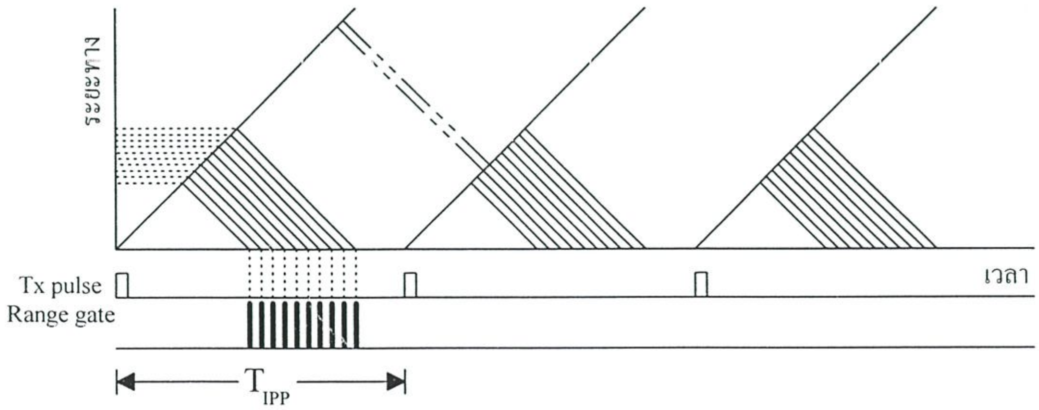
1. ส่งคลื่นความถี่สูงในลักษณะเป็นพัลส์และจับเวลาระหว่างที่ส่งพัลส์กับสัญญาณสะท้อนกลับ วิธีนี้เรียกว่า พัลส์เรดาร์ (Pulsed radar)
2. เปลี่ยนค่าความถี่ของคลื่นความถี่สูงทางด้านส่งด้วยอัตราที่แน่นอน และมีการเปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณที่สะท้อนกลับเปรียบเทียบกับความถี่ของสัญญาณที่ส่ง ที่เรียกว่า การมอดูเลตคลื่นความถี่ต่อเนื่องในระบบเรดาร์ (FM-CW radar: Frequency - modulated continuous wave)

การส่งคลื่นเรดาร์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. **Pulsed radar:** ทำการส่งและรับคลื่นเป็นพัลส์โดยมีการกำหนดช่วงเวลาในการส่งคลื่นแต่ละลูก (IPP: Inter - pulse period) ให้สัมพันธ์กับอัตราการการสุ่มตัวอย่างสัญญาณตามจำนวนการสุ่มตัวอย่างที่ต้องการ ในที่นี้การสุ่มตัวอย่างสัญญาณจะต้องถูกกำหนดให้อยู่ในขอบเขตของช่วงเวลาระหว่างพัลส์แต่ละลูกเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาด ซึ่งถ้าหากว่าอัตราการสุ่มตัวอย่างสัญญาณมีมากกว่าช่วงเวลาในการส่งพัลส์ ข้ อมูลที่ได้จะไม่ถูกต้อง เรียกเหตุการณ์นี้ว่า Aliasing effect จะทำให้ระยะทางของวัตถุที่คำนวณได้ผิดพลาด เรียกว่า Ambiguity range ซึ่งเป็นระยะที่แสดงเป็นเส้นประในรูปที่ 3.7 คือ ระยะทางของวัตถุจะมีค่ามากกว่าค่าของ $ct_{IPP}/2$ แต่จะพบว่าระยะที่คำนวณได้เป็นระยะที่น้อยกว่า $ct_{IPP}/2$ เพราะเกิดหลังพัลส์ลูกถัดไป ดังนั้นในการหาระยะทางจึงเทียบกับพัลส์ลูกหลังแทนจึงได้ระยะทางที่ผิดไปจากความเป็นจริง จากรูปที่ 3.7 ช่วงเวลาในการส่งพัลส์แต่ละลูกเพื่อไม่ให้เกิด ambiguity range เรียกว่า interpulse-period (IPP) ส่วนความถี่ในการเกิดพัลส์แต่ละลูก เรียกว่า pulse-repetition-frequency (PRF)
2. **CW radar (Continuous wave) หรือ Doppler radar:** เป็นการส่งคลื่นวิทยุอย่างต่อเนื่องกันไปเป็นสายยาว โดยไม่มีการมอดูเลตคลื่นสัญญาณ ในการส่งคลื่นดังกล่าวออกไปนั้นจะได้ข้อมูลจากสัญญาณของวัตถุใดๆ ที่อยู่ในแนวบีมเรดาร์สะท้อนกลับไปยังสายอากาศรับคลื่น ค่ามุมแบริ่ง และมุมเงยของวัตถุหาได้จากตำแหน่งและทิศทางของสายอากาศที่ทำมุมกับวัตถุ ในขณะที่สัญญาณสะท้อนกลับ มีค่ามากที่สุด แต่ CW radar ไม่สามารถวัดระยะทางได้เนื่องจากส่งคลื่นอย่างต่อเนื่องไปโดยไม่มีการเว้นช่วงเวลาในการส่งคลื่นลูกถัดไป ดังนั้น จึงไม่สามารถจับเวลาที่คลื่นแต่ละลูกส่งออกไปกระทบวัตถุแล้วสะท้อนกลับได้

3. **FM-CW radar:** เป็นการปรับปรุง CW radar ในเรื่องการวัดระยะทาง โดยนำสัญญาณคลื่นพาหะ (Carrier) ของคลื่นต่อเนื่องมาทำ Timing mark เพื่อระบุเวลาในการส่งและเวลาของสัญญาณสะท้อน โดยปกติใช้ Timing mark เป็นสเปกตรัม ซึ่งสเปกตรัมของคลื่นต่อเนื่องสามารถนำมามอดูเลตทางแอมปลิจูด ความถี่ หรือเฟสได้ ตัวอย่างของการมอดูเลตทางแอมปลิจูด คือ Pulsed radar ซึ่งเมื่อพัลส์ยิ่งแคบ พ บว่าสเปกตรัมที่ส่งจะมีความกว้าง ทำให้การวัดระยะทางถูกต้องยิ่งขึ้น ในกรณีของ CW radar วิธีที่นิยมทำให้สเปกตรัมที่ส่งกว้างโดยการมอดูเลตทางความถี่ของคลื่นพาหะ โดย Timing mark จะเปลี่ยนตามความถี่และเวลาที่ได้จะเกิดจากผลต่างทางความถี่ของสัญญาณสะท้อนกับสัญญาณที่ส่ง
4. **Pulse Doppler radar:** หรือ MTI radar เป็นการนำหลักการของความถี่ดอปเปลอร์มาประยุกต์ใช้กับ Pulsed radar เพื่อทำการตรวจวัตถุที่เคลื่อนที่ซึ่งมีสัญญาณที่ไม่ต้องการปนมากับคลื่นสะท้อน เรียกว่า Clutter ดังนั้นสามารถเรียก Pulse Doppler radar ได้อีกอย่างหนึ่งว่า MTI (Moving Target Indication) radar หลักการคล้าย CW radar ซึ่งจำกัดในเรื่องของการวัดระยะทางแต่จะดีกว่าตรงที่ส่งสัญญาณเป็นพัลส์

ระบบ CW radar จะใช้กับการตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่ หรือติดตั้งเรดาร์ไปกับวัตถุที่เคลื่อนที่ โดยอาศัยหลักการของการดอปเปลอร์ (Doppler effect) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความถี่ไปตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ คือ ถ้าวัตถุเคลื่อนที่เข้าหาจุดที่ทำการสังเกตความถี่ของคลื่น ณ จุดสังเกตจะมากขึ้น และที่ระยะห่างออกไปความถี่จะลดลง หรือถ้าวัตถุเคลื่อนที่ออกจากจุดสังเกต ความถี่ของคลื่นสะท้อน ณ จุดสังเกตจะลดลง โดยทั่วไปถ้าความเร็วที่วัตถุเคลื่อนที่และความถี่ที่ใช้ในการส่งคลื่นเทียบกับความเร็วที่คลื่นวิทยุเดินทาง (เท่ากับความเร็วแสงในกรณีที่คลื่นเดินทางในอากาศ) จะสามารถหาความถี่ที่เปลี่ยนแปลงของ



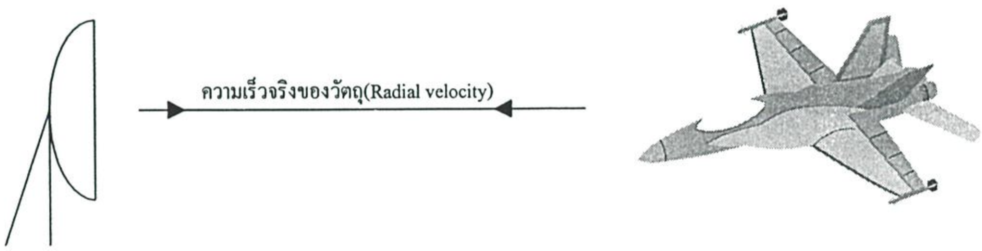
รูปที่ 3.7 แผนภาพการส่งพัลส์เรดาร์เทียบเวลากับความสูง

วัตถุเมื่อสะท้อนไปยังเรดาร์ เรียกว่า ความถี่ดอปเปลอร์ (Doppler shift frequency) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

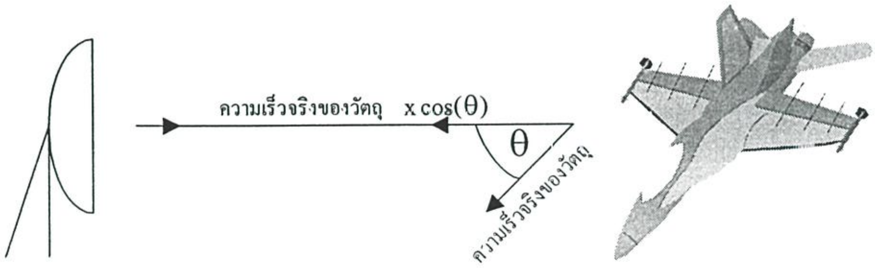
$$f_d = \frac{2v}{c} f_0 \tag{3.5}$$

เมื่อ f_d เป็นความถี่ดอปเปลอร์
f_0 เป็นความถี่ที่ใช้ส่งคลื่น
v เป็นความเร็วของวัตถุ
c เป็นความเร็วของคลื่นวิทยุ

โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ สามารถหาความถี่ของคลื่นสะท้อนเมื่อวัตถุเคลื่อนที่เข้าหาสายอากาศรับของเรดาร์ได้จาก $f_0 + f_d$ และความถี่ของคลื่นสะท้อนเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ออกจากสายอากาศรับของเรดาร์ได้จาก $f_0 - f_d$ ในความเป็นจริงความถี่ดอปเปลอร์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วที่แท้จริงของวัตถุ แต่ขึ้นอยู่กับความเร็วของวัตถุในทิศทางของสายอากาศเรดาร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8(ก)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 การเคลื่อนที่ของวัตถุ
(ก) วัตถุเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับบีมของเรดาร์
(ข) วัตถุเคลื่อนที่ต่างทิศทางกับบีม

จะเห็นว่าวัตถุเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับสายอากาศเรดาร์ ดังนั้นค่าความเร็วที่แท้จริงจะมีค่าเท่ากับความเร็วของวัตถุในทิศทางของสายอากาศเรดาร์ เรียกความเร็วดังกล่าวว่า Radial velocity ส่วนในรูปที่ 3.8(ข) วัตถุเคลื่อนที่ในทิศทางทำมุมกับสายอากาศเรดาร์ ดังนั้นความเร็วของวัตถุในทิศทางของสายอากาศ (คือความเร็วที่แท้จริงของวัตถุ $x \cos\theta$) ไม่ใช่ความเร็วที่แท้จริงของวัตถุ

ระบบเรดาร์ที่ใช้วัดข้อมูลในบรรยากาศ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ เรดาร์ชนิดสำรวจชั้นบรรยากาศ (Atmospheric radar) และเรดาร์ชนิดสำรวจอากาศ (Weather radar) ซึ่งเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศจะวัดสัญญาณสะท้อนของอนุภาคในบรรยากาศในสภาวะที่อากาศปกติคือท้องฟ้าแจ่มใส (Clear air echoes) แต่เรดาร์สำรวจอากาศมักจะใช้วัดฝนเป็นหลัก สำหรับข้อแตกต่างของเรดาร์ทั้ง สองระบบนี้สามารถพิจารณาได้ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อแตกต่างของเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ และเรดาร์สำรวจอากาศ

	เรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ	เรดาร์สำรวจอากาศ
ความถี่ที่ใช้ในการทำงาน	HF (3-30 MHz) VHF (30-300 MHz) UHF (300 MHz – 3 GHz)	SHF (3-30 GHz)
ขนาดของจานสายอากาศ	ขนาดใหญ่ เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10-300 เมตร	ขนาดเล็ก เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-10 เมตร
พื้นที่ในการวัด	ครอบคลุมพื้นที่ในแนวดิ่ง ทำการวัดโดยใช้มุมแคบๆ เทียบกับมุมในแนวดิ่ง (Zenith)	ครอบคลุมพื้นที่ในแนวระนาบมากถึงหลายร้อยกิโลเมตร วัดด้วยการสแกนสายอากาศด้วยมุมเงย (Elevation angle) ค่าน้อย ๆ

3.1.7 ระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ

ชั้นบรรยากาศประกอบด้วยก๊าซต่างๆ จำนวนมาก ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิและป้องกันการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ อันอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ การเปลี่ยนแปลงในบรรยากาศที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุณหภูมิ ลม ความชื้น เมฆ และการเกิดฝน รวมไปถึงสภาพดินฟ้าอากาศ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศซึ่งจัดว่าเป็น Soft target เพราะไม่สามารถระบุรูปร่างของวัตถุได้อย่างแน่นอนจึงจำเป็นต้องกำหนดระยะและทิศทางในการวัดให้ชัดเจน

เรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ [4]

1. ป้องกันและหลีกเลี่ยงจากภัยธรรมชาติ โดยเฉพาะใช้กับทางด้านการบินและการเดินเรือ
2. พยากรณ์อากาศ โดยปกติแหล่งข้อมูลในการพยากรณ์อากาศมักจะได้จาก ภาพถ่ายดาวเทียม เครื่องมือวัดจาเครื่องบิน และ radiosonde ซึ่งเป็นการปล่อยบอลลูนโดยมีเครื่องมือวัดหรือตัวเซนเซอร์ติดไปด้วย แต่สามารถใช้เรดาร์มาพยากรณ์อากาศได้ด้วย
3. การวิจัยเรดาร์สามารถใช้วัดชั้นบรรยากาศระดับล่างและระดับที่สูงขึ้นไปได้

การเปลี่ยนแปลงของอนุภาค ในชั้นบรรยากาศระดับล่างและระดับกลางเรียกว่า Coherent scattering เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห (Refraction index) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคในอากาศที่รวมตัวกันเป็นโมเลกุลหรืออิเลกตรอนทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ระบบเรดาร์ที่ใช้มักจะเรียกว่า MST (Mesosphere Stratosphere Troposphere) radar ในชั้นไอโอโนสเฟียร์จะมีการกระจายของอนุภาคเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนและอิออนที่อยู่กันอย่างหนาแน่นทำให้เกิดความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอนุภาค เรียกว่า incoherent scattering

การวัดการเคลื่อนที่ของอนุภาคในบรรยากาศซึ่งก็คือลม สามารถวัดได้จากค่าดอปเปลอร์ของอนุภาคที่สะท้อนกลับ (Doppler shift) โดยหาค่าความถี่ดอปเปลอร์ได้จากสมการที่ 3.5 เมื่อ V เป็นองค์ประกอบความเร็วของเวกเตอร์ของอนุภาค ในระดับแนวเส้นสายตา (line-of-sight) ที่สัมพันธ์กับเรดาร์

3.1.8 การประมวลผลสัญญาณ

เมื่อสายอากาศทางด้านเครื่องรับ ทำการรับสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคในบรรยากาศ จะผ่านขั้นตอนต่างๆ ที่เครื่องรับดังกล่าวไปแล้วในขั้นตอนการรับสัญญาณพัลส์เรดาร์ และ CW radar ในการประมวลผลสัญญาณเรดาร์มักจะใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 3.9 ซึ่งการคำนวณการประมวลผลจะเป็นแบบ Real-time ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบเรดาร์ที่ใช้ แต่ละขั้นตอนอธิบายการทำงานได้ดังนี้

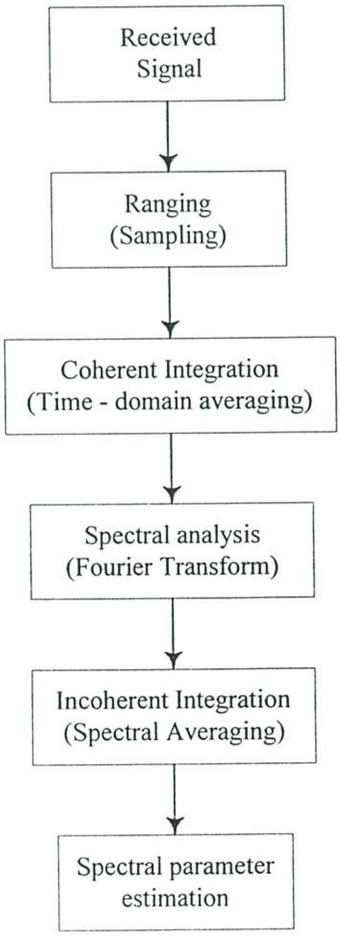
-Ranging (Sampling) ทำการหาระยะทางได้จากสมการที่ 3.6 โดยการวัดระยะทางของวัตถุอาศัยหลักการในการหาความเร็วจาก อัตราส่วนของระยะทางเทียบกับเวลา ซึ่งระบบเรดาร์จะส่งคลื่นวิทยุเพื่อตรวจหาสัญญาณสะท้อนกลับของวัตถุดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ด้วยหลักการของการกระจายคลื่นผ่านอากาศ พบว่าความเร็วของคลื่นที่ส่งจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง (3×10^8 เมตรต่อวินาที) ดังนั้นสามารถคำนวณระยะทางของเรดาร์ได้จาก

$$R = c\frac{t}{2} \tag{3.6}$$

เมื่อ R แทน ระยะทาง (เมตร)

c เป็นค่าความเร็วของวัตถุในตัวกลาง (กรณีเดินทางผ่านอากาศจะเป็นค่าความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ $3\text{x}10^8$ เมตรต่อวินาที)

t เป็นเวลาเดินทาง ไป-กลับ ของพัลส์ที่ส่ง (วินาที)



รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลของเรดาร์สำรวจบรรยากาศ

ดังนั้น ถ้าคิดเวลาในหน่วยไมโครวินาที และแทนค่า $c=3\text{x}10^8$ เมตรต่อวินาที ลงไปในสมการที่ 3.6 แล้วจะได้ว่า $R = 150t$ (เมตร) หรือ $R = 0.15t$ (กิโลเมตร)

ส่วนอัตราการการสุ่มตัวอย่างสัญญาณเป็นไปตามรูปที่ 3.7 ดังได้อธิบายไปแล้ว โดยปกติ MST radar ที่ใช้สำรวจบรรยากาศจะใช้วัดระยะความสูงน้อยกว่า 100 กิโลเมตร ที่มีค่า IPP น้อยกว่า 1 มิลลิวินาที ในกรณีที่สายอากาศมีการปรับบีม 3 ทิศทาง คือ แกนตั้ง ทิศเหนือ และทิศตะวันออก

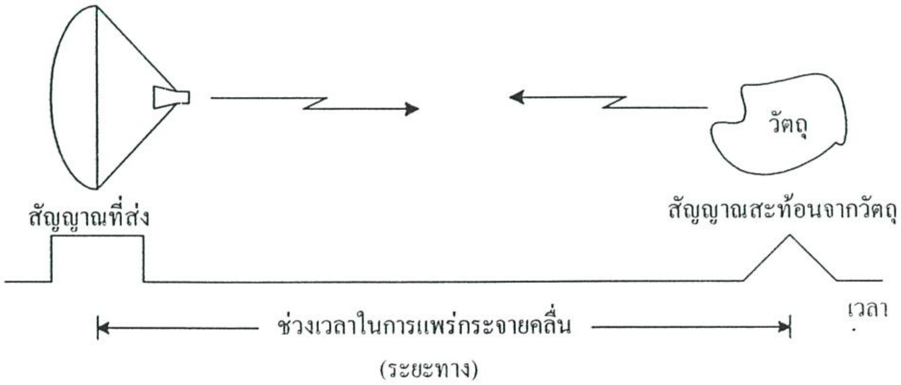
- Coherent integration (Time-domain averaging): จะเป็นการรวมกันของสัญญาณจากตัว Quadrature detector กับสัญญาณพัลส์หลายๆ สัญญาณเพื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ซึ่งต้องให้เฟสของสัญญาณที่รับได้คงที่เมื่อเทียบกับสัญญาณอ้างอิง

- Spectral analysis (Fourier transform): ทำการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณที่รับในแต่ละช่วงที่ทำการการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ (range gate) ในอนุกรมของเวลา ในกรณีของสัญญาณดิจิตอลต้องทำการแปลงฟูเรียร์แบบดีสครีต (Discrete Fourier Transform) หรือฟาสท์ฟูเรียร์ โดยทำการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ ซึ่งความถี่ในการการสุ่มตัวอย่างไม่เกินความถี่ไนควิซท์ (Nyquist frequency) ดังในสมการที่ 3.7

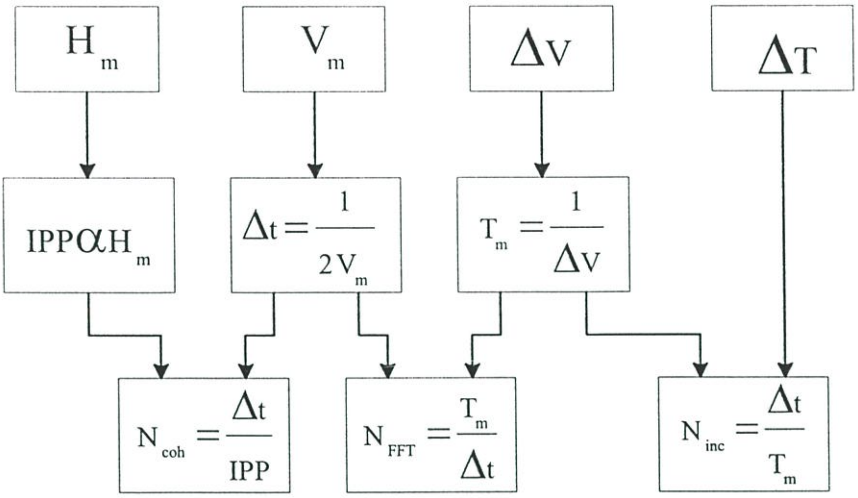
$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \tag{3.7}$$

เมื่อ f_N เป็นความถี่ไนควิซท์

$2\Delta t$ เป็นช่วงเวลาที่ทำการการสุ่มตัวอย่าง



รูปที่ 3.10 การวัดระยะทางของเรดาร์



รูปที่ 3.11 พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาการประมวลผลสัญญาณเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ

- **Incoherent integration (Spectral averaging):** จะทำการหาค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของสัญญาณเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงของดอปเปลอร์สเปคตรัม ซึ่งในการหาค่าเฉลี่ยสเปกตรัมจำนวน N_i พบว่าประสิทธิภาพในการตรวจวัดสัญญาณดอปเปอร์สเปคตรัมในบรรยากาศจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน $N_i^{1/2}$

- **Spectral parameter estimation:** เป็นการประมาณค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ค่าความเร็วเฉลี่ยของดอปเปลอร์ และความกว้างของสเปกตรัม จากดอปเปลอร์สเปคตรัมที่มีต่ออัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและประสิทธิภาพในการตรวจวัดสัญญาณดอปเปลอร์สเปกตรัมมาก เพื่อนำไปเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาหาระยะทางหรือความถี่ที่ผิดพลาดอันอาจจะเกิดขึ้นได้ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาระบบประมวลผลสัญญาณแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่ง H_m เป็นระยะทางที่มากที่สุด, V_m เป็น radial velocity, Δt เป็นช่วงเวลาในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล, Δv เป็นสเปกตรัมความเร็วดอปเปลอร์มีค่าน้อยที่สุด, T_m เป็นเวลาที่มากที่สุดในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล, ΔT เป็นเวลาในการสังเกตการณ์ของดอปเปลอร์สเปกตรัม, N_{coh} เป็นจำนวนของการทำ Coherent Integration, N_{FFT} เป็นจำนวนจุดของ FFT, N_{inc} เป็นจำนวนของการทำ Incoherent integration

3.2 หลักการของวินด์โปรไฟเลอร์

ระบบเรดาร์ที่ใช้วัดความเร็วและทิศทางของลมในบรรยากาศซึ่งเรียกว่าวินด์โปรไฟเลอร์ เป็นดอปเปลอร์เรดาร์ชนิดหนึ่งที่ใช้วัดลมโดยติดตั้งระบบเรดาร์ที่ภาคพื้นดินทำการวัดเวกเตอร์ของลมที่อยู่เหนือจากเรดาร์ขึ้นไปโดยใช้หลักการสะท้อนสัญญาณจากอนุภาคในบรรยากาศในลักษณะของสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคของอากาศ (Clear - air echoes) สัญญาณสะท้อนของอนุภาคดังกล่าวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหในแต่ละระดับซึ่งมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นของเรดาร์ (Brag scattering) ความเร็วในแนวระนาบของลมตามบีมของเรดาร์นั้นสามารถวัดได้จากสัญญาณดอปเปลอร์ตามทิศทางของบีม ส่วนระยะสูงสุดที่สามารถวัดได้จะขึ้นอยู่กับกำลังของเครื่องส่ง ขนาดของสายอากาศ และความถี่ที่เรดาร์ใช้งาน

วินด์โปรไฟเลอร์เป็นพัลส์ดอปเปลอร์เรดาร์ มีวัตถุประสงค์หลักคือ ใช้ทำการวัดเวกเตอร์ของลมใน 3 มิติ ทำงานได้ในสภาพอากาศเกือบทุกสภาวะ ประกอบด้วยสายอากาศชนิดเฟสอาร์เรย์ที่กำหนดตำแหน่งคงที่ไว้แล้ว หรือใช้จานสายอากาศชนิดจานพาราโบลาร์ อุปกรณ์เครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณเรดาร์ และหน่วยประมวลผลสัญญาณ สำหรับบีมที่ใช้วัดสัญญาณดอปเปลอร์จะต้องใช้สายอากาศที่ชี้ไปยังทิศทางที่ต้องการวัดเวกเตอร์ของลมอย่างน้อย 3 ทิศทาง เช่น ทิศเหนือ ทิศตะวันออก และทิศในแนวดิ่ง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.12 ถ้าในกรณีที่กำหนดเป็นบีม 5 ทิศทาง จะประกอบด้วยทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก ทิศตะวันตก และทิศในแนวดิ่ง เรดาร์จะทำการส่งสัญญาณพัลส์ไปตามแนวทุกทิศทางของบีมเรดาร์ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะกระทบกับโมเลกุลหรืออนุภาคของอากาศแล้วมีพลังงานของสัญญาณจำนวนหนึ่งสะท้อนกลับมายังสายอากาศที่รับสัญญาณ จากนั้นเราจะนำสัญญาณสะท้อนซึ่งมีค่าน้อยนี้ไปทำการขยายสัญญาณและลดสัญญาณรบกวนในวงจรของอุปกรณ์ Low Noise Amplifier (LNA) จากนั้นจะลดความถี่ของสัญญาณให้เป็นความถี่ปานกลาง (IF: Intermediate frequency) แล้วนำค่าของสัญญาณที่ได้ไปผ่านวงจรควอดคราเจอร์ ดีเทคเตอร์ (Quadrature detector) ซึ่งจะได้องค์ประกอบของสัญญาณ 2 ชนิด คือ สัญญาณ In-phase และสัญญาณ Quadeature-phase เรียกว่า แผนภาพเฟสเซอร์ (Phasor diagram) เป็นองค์ประกอบพิกัดฉากของเวกเตอร์ 2 มิติในระนาบเชิงซ้อน จากนั้นจะทำการรวมพัลส์จำนวนหลายร้อยพัลส์เพื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนหลังจากผ่านกระบวนการแปลงสัญญาณจากอะนาลอกเป็นดิจิตอลเรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนนี้เรียกว่า การรวมแบบ coherent องค์ประกอบของสัญญาณ In-phase และ Quadrature - phase จะใช้เป็นตัวหาค่าของการเปลี่ยนแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (DFT: Discrete Fourier Transform) ซึ่งนิยมใช้การเปลงแบบฟาสท์ฟูเรียร์ (FFT: Fast Fourier Transform) มากกว่าเนื่องจากให้ผลการคำนวณที่ใช้เวลาน้อยกว่ามาก โดยทั่วไปแล้วการแปลงแบบ FFT มักจะใช้กับจุดข้อมูลจำนวน 64 หรือ 128 (จำนวนเชิงซ้อน) จุดข้อมูล จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยแบบ Incoherent ช่วงเวลาที่ได้ใน 1 เส้นสเปกตรัมสำหรับทุก ๆ

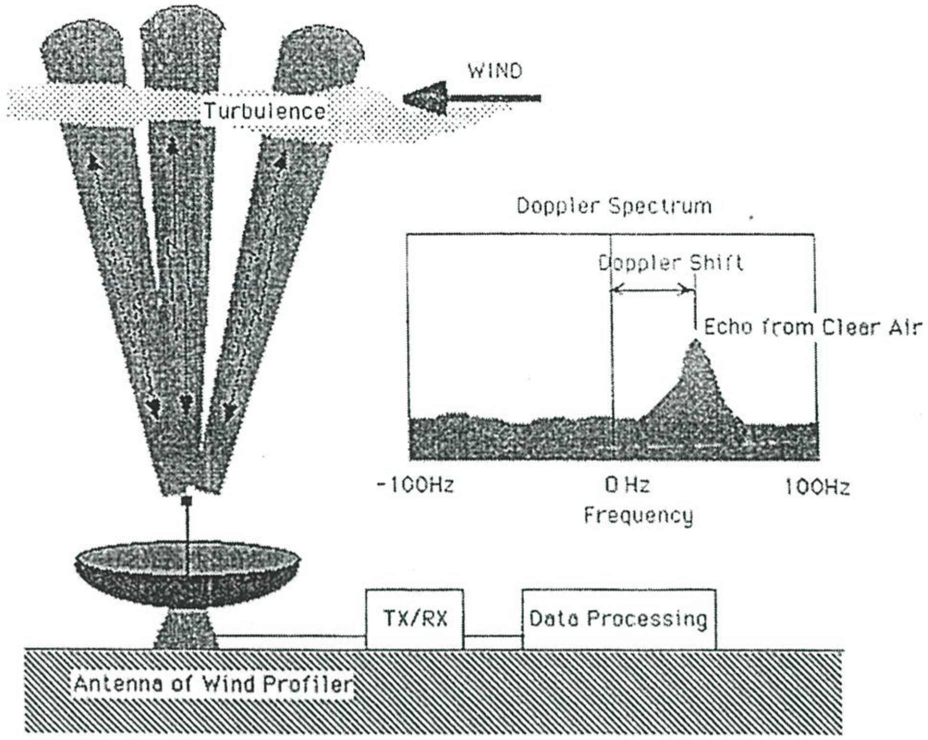
ช่วงการการสุ่มตัวอย่างสัญญาณจะมีค่าประมาณ 20-30 วินาที เรียกว่า dwell time แผนภาพการประมวลผลสัญญาณสะท้อนแสดงในรูปที่ 3.13

ข้อมูลของสัญญาณสะท้อนจะประกอบด้วย สเปกตรัมของสัญญาณดอปเปลอร์ ข้อมูลที่มีสเปกตรัมของสัญญาณอยู่ครบจะเป็นข้อมูลดิบ เราทำการคำนวณโมเมนต์ 3 ตัวแรก (first 3 moment) ด้วยอัลกอริทึมในการประมาณคาโมเมนต์ครั้งแรก คือ โมเมนต์ 0 จะได้ค่าความเข้มของสัญญาณ (แอมปลิจูด) โมเมนต์ที่ 1 เป็นสัญญาณดอปเปลอร์ (หรือ ความเร็วของวัตถุ) และโมเมนต์ที่ 2 (2^{nd} moment) เป็นความกว้างของสเปกตรัมของสัญญาณ (variance) วินด์โปรไฟเลอร์ใช้การประมาณค่าความเร็วของอนุภาค (radial velocity) สำหรับทุก ๆ ช่วงการการสุ่มตัวอย่างสัญญาณในแต่ละบีม สมมติว่าลมในแนวระนาบมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันในแนวบีมของเรดาร์ จะกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า การวัดความเร็วของอนุภาค คือองค์ประกอบของเวกเตอร์ของลมใน 3 มิติไปตามทิศทางของสายอาอาศที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นจะได้เวกเตอร์ความเร็วของลมในทิศพิกัดคาร์ทีเซียน 3 ตัวคือ (u, v, w)

คุณสมบัติโดยทั่วไปของวินด์โปรไฟเลอร์ที่ใช้งานกับอยู่ในปัจจุบันแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติโดยทั่วไปของวินด์โปรไฟเลอร์

Radar Frequency	VHF Radar (50MHz)	UHF Radar (400MHz)	UHF Radar (1GHz)
Observable Range	2.20 km	0.5-17 km	0.2-3 km
Antenna Size	100x100m	10x10m	
Transmit Peak Power	1000-100 kW	10 kW	
Example	MU Radar	NOAA Profiler Network MRI Wind Profiler	CRL Wind Profile RASC BLR RADLAN Co. LAP-3000



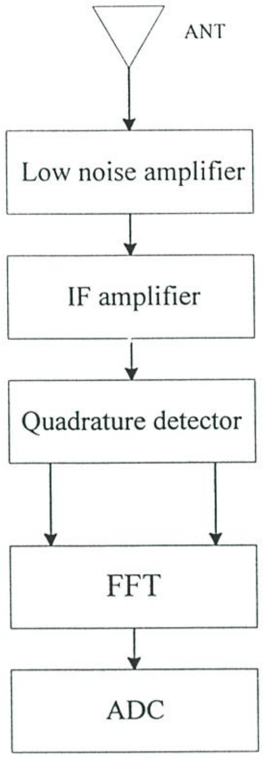
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างของวินด์โปรไฟเลอร์ที่ใช้บีม 3 บีม

3.2.1 ตัวอย่างของวินด์โปรไฟเลอร์

วินด์โปรไฟเลอร์ที่มีใช้กันอยู่โดยทั่วไปมีหลายชนิดซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติโดยทั่วๆ ไปที่แตกต่างกันดังแสดงให้เห็นในตัวอย่างที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

3.2.1.1 MU radar: MU radar เป็นระบบเรดาร์ที่มีขนาดใหญ่ ใช้วัดและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศในระดับกลางและระดับบน (Middle and upper atmosphere) ใช้สำหรับงานวิจัยทั้งภายในและระหว่างประเทศโดยการรวมมือกันกับกลุ่มผู้วิจัย ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วๆ ไป ของระบบ MU radar ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.4

3.2.1.2 RASC Boundary Layer Radar (RASC BLR): เป็นระบบเรดาร์ที่ใช้สังเกตการเปลี่ยนแปลงในการเคลื่อนไหวของอนุภาค ในอากาศชั้นบรรยากาศระดับล่าง (Boundary layer) ในระยะตั้งแต่10 เมตร ไปจนถึง 2 หรือ 3 กิโลเมตร เมื่อวัดในระดับที่อยู่เหนือจากพื้นผิวโลกขึ้นไป



รูปที่ 3.13 แผนภาพการประกอบประมวลผลของสัญญาณสะท้อนที่เข้ามายังสายอากาศรับสัญญาณ

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบ MU radar

สถานที่ที่ทำการติดตั้ง	Shigaraki , Shiga , Japan (34 51N , 136 06 E
ระบบเรดาร์	Monostatic pulse radar Active phased array system
ความถี่ที่ใช้งาน	46.5 MHz
แบนด์วิดธ์ (Bandwidth)	1.65MHz
ชนิดของสายอากาศ	Circular array of 475 crossed yagis
Aperture	103 m in diameter
ความกว้างของบีม (beam width)	3.6 degree
เครื่องส่ง (Transmitter)	475 solid state amplifiers
Peak power	1 MW
Average power	50kW
Pulse repetition frequency (PRF)	2.5 kHz maximum
ความกว้างของพัลส์ (Pulse width)	1.-500 micro sec
Receiver dynamic range	1.65 MHz
Polarization	Linear and circular

ตารางที่ 3.5 คุณลักษณะที่ใช้ใน RASC Boundary Layer Radar ที่ติดตั้งที่อินโดนีเซีย

ความถี่ที่ใช้ส่ง	L-band ; UHF ที่ความถี่ 1,397.5 MHz
สายอากาศที่ใช้	จานพาราโบลาร์ 3 ตัว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เมตร
มุมของสายอากาศ	• (Vertical) • 15 (Northward) • 15 (Eastward) • ทำการคำนวณองค์ประกอบความเร็วลม 3 ค่าตามจำนวนบีม

3.2.1.3 NOAA Profiler Network (NPN): เป็นระบบวินด์โปรไฟเลอร์ ที่ติดตั้งใน NOAA Profiler Network (NPN) ทำงานอย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตราการการสุ่มตัวอย่างทุก ๆ นาที ระหว่าง low และ high mode ซึ่งข้อแตกต่างของ low mode และ high mode คือ low mode จะทำการสุ่มตัวอย่างสัญญาณในชั้นบรรยากาศระดับล่าง (Lower atmosphere) โดยวัดระยะความสูงเริ่มแรกที่ 500 เมตร เมื่อวัดจากพื้นดิน จนถึงระยะความสูง 9.25 กิโลเมตร ส่วน high mode จะวัดระยะความสูงเริ่มแรกที่ 7.5 กิโลเมตร เทียบกับระดับพื้นดิน จนถึงระยะความสูงประมาณ 16.25 กิโลเมตร สามารถพิจารณาคุณลักษณะโดยทั่วๆ ไปของระบบวินด์โปรไฟเลอร์ชนิดนี้ได้ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 คุณลักษณะที่ใช้ในวินด์โปรไฟเลอร์ของ NOAA Profiler Network (NPN)

Sampling mode	ทุกๆ 1 นาที ทั้ง low mode และ high mode
จำนวนบีมที่ใช้	3 บีม (Eastward , northward และ vertical โดยทำการเปลี่ยนบีมในทุกๆ 2 นาที
Range gates ในแต่ละโหมด (sampling heights)	32
Space in vertical	250 เมตร

3.2.1.4 MST radar: ย่อมาจากคำว่า Mesosphere, Stratosphere, Troposphere radar ใช้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของลม คลื่น การเปลี่ยนแปลงในบรรยากาศ ตลอดจนการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของ MST radar

ความถี่ที่ใช้งาน	53 MHz
Peak power aperture product	3X10 W m
ระยะทางที่วัดได้	5-10 กิโลเมตร
Spatial resolution Range Angle	150 เมตร (pulse width) 3 (Beam width)
Velocity resolution	0.1 เมตรต่อวินาที
Time resolution	นาที

3.3 คุณลักษณะทั่วไปของวินด์โปรไฟเลอร์

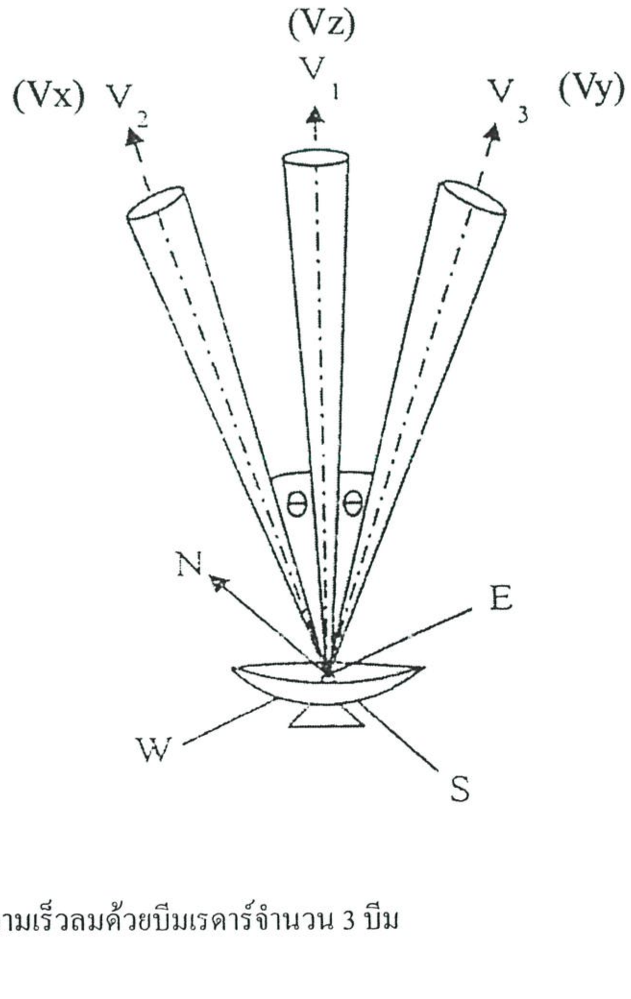
วินด์โปรไฟเลอร์ที่มีการติดตั้งที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประกอบด้วยจานสายอากาศชนิดจานพาราโบลาร์ที่มีแกนปรับหมุนได้รอบทิศทางทำการควบคุมด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ทำการส่งและรับสัญญาณในจานเดียวกัน ทำงานในย่านความถี่ชนิด L แบนด์ ประกอบด้วยบีมของเรดาร์จำนวน 3 บีม คือ บีมในแนวดิ่ง (Zenith) บีมในแนวทิศเหนือ และบีมในแนวทิศตะวันออก โดยบีมในแนวทิศเหนือ และบีมในแนวทิศตะวันออกจะทำมุมกับบีมในแนวดิ่ง (θ) เป็นค่าน้อยๆ เพราะถือว่าข้อมูลลมที่วัดได้ในแต่ละแนวบีมที่ระดับความสูงเดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน (Homogeneous) วินด์โปรไฟเลอร์นี้ทำการวัดข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องโดยทำการวัดสัญญาณสะท้อนของอนุภาคในบรรยากาศในแต่ละบีมโดยทำการวัดและบันทึกสัญญาณทีละบีมของเรดาร์จากนั้นทำการสแกนไปยังบีมถัดไปจนครบ 3 บีม แล้วเริ่มทำการวัดใหม่ต่อไป

วิธีดังกล่าวนี้ เรียกว่า วิธี Doppler-Beam-Swing (DBS) โดยทั่วไปนิยมใช้จานสายอากาศเพียงจานเดียวทำหน้าที่ทั้งส่ง และรับสัญญาณ (Monostatic radar) โดยติดตั้งระบบเรดาร์บนพื้นดินวัดความเร็วลมโดยอาศัยหลักการของการดอปเปอร์เรดาร์ โดยทางด้านส่ง จะทำการส่งสัญญาณพัลส์คลื่นความถี่ไมโครเวฟตามแนวบีมของเรดาร์จำนวน 3 บีม คือ บีมในแนวดิ่ง และบีมในแนวที่ทำมุม θ ไปกระทบกับแนวดิ่งไปทางทิศเหนือ และทิศตะวันออก ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เมื่อสัญญาณที่ส่งออกไปกระทบกับอนุภาคต่างๆ ในบรรยากาศในแต่ละระดับความสูงจะสะท้อนและมีสัญญาณสะท้อนส่วนหนึ่งสะท้อนกลับมายังจานสายอากาศ ซึ่งเป็นสัญญาณที่รับได้ในเวลาต่างๆ แสดงให้เห็นถึง ลักษณะของอากาศในแต่ละระดับความสูงที่ทำการวัดสัญญาณ

3.4 รายละเอียดทางเทคนิคของวินด์โปรไฟเลอร์

วินด์โปรไฟเลอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ไมโครเวฟทำงานที่ความถี่ 1,357.5 MHz ใช้จานสายอากาศแบบจานพาราโบลาร์ที่มีแกนปรับหมุนได้รอบทิศทาง ควบคุมด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ทำการส่ง และรับสัญญาณในจานเดียวกัน โดยทำการวัดข้อมูลใน3 ทิศทางตามแนวบีมของเรดาร์จำนวน 3 บีม อย่างต่อเนื่องในทุกๆ 5 นาที มุมระหว่างบีมที่ใช้ (θ) เท่ากัน 15 องศาเทียบกับบีมในแนวดิ่ง

การวัดความเร็วลมในที่นี้ใช้บีมของสายอากาศจำนวน 3 บีม ทำการวัดความเร็วลมใน 3 ทิศทาง ที่แต่ละระดับความสูง โดยทำการวัดระดับความสูงเริ่มต้นตามการหาระยะทางของเรดาร์ในสมการที่ 3.6 และระยะถัดไปจะเพิ่มความความสูงในการวัดความเร็วของอนุภาคในบรรยากาศ ซึ่งก็คือลม ทุกๆ ระยะที่คำนวณได้ตามสมการที่ 3.8 จนถึงระดับความสูงที่มากที่สุดที่ระบบสามารถวัดได้



รูปที่ 3.14 การวัดความเร็วลมด้วยบีมเรดาร์จำนวน 3 บีม

ดังแสดงไว้ในสมการที่ 3.9

$$R_{inc} = \frac{c \times \text{sampling rate}}{2} \tag{3.8}$$

เมื่อ R_{inc} เป็นความสูงในแต่ละระดับที่ทำการสังเกต (height spacing)

c เป็นความเร็วแสง (3 x 10^8 เมตรต่อวินาที)

$$R_{max} = \frac{c \times IPP}{2} \tag{3.9}$$

เมื่อ R_{max} เป็นระยะทางสูงสุดที่สามารถวัดข้อมูลได้

c เป็นความเร็วแสง (3 x 10^8 เมตรต่อวินาที)

IPP เป็นคาบเวลาในการส่งพัลส์แต่ละลูก (Inter-pulse period)

ค่าความเร็วตามแนวบีม (V_0) (Velocity resolution) อาศัยหลักการของปรากฏการณ์ดอปเปลอร์หาค่าความเร็วจาก

$$\frac{2V}{c} = \frac{\Delta f}{f} \tag{3.10}$$

ดังนั้นหาค่า V_0 ได้จาก

$$V_0 = \frac{\Delta f}{f} . \frac{c}{2} \tag{3.11}$$

เมื่อ V เป็นความเร็วของอนุภาคในบรรยากาศอันเป็นผลเนื่องจากปรากฏการณ์ดอปเปอร์

V_0 เป็นความเร็วตามแนวบีม (Velocity resolution)

c เป็นความเร็วแสง (3 x 10^8 เมตร ต่อ วินาที)

f เป็นความถี่ที่เรดาร์ใช้ส่งคลื่น

Δf เป็นความถี่ที่เปลี่ยนไป (Doppler frequency shift หรือ Frequency.change) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.12

$$\Delta f = \frac{1}{(IPP)(\#COH)(\#FFT)} \tag{3.12}$$

เมื่อ IPP เป็นคาบเวลาในการส่งพัลส์แต่ละลูก

#COH เป็นจำนวนครั้งในการทำ Coherent integration

#FFT เป็นจำนวนในการแปลงฟาสท์ฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform)

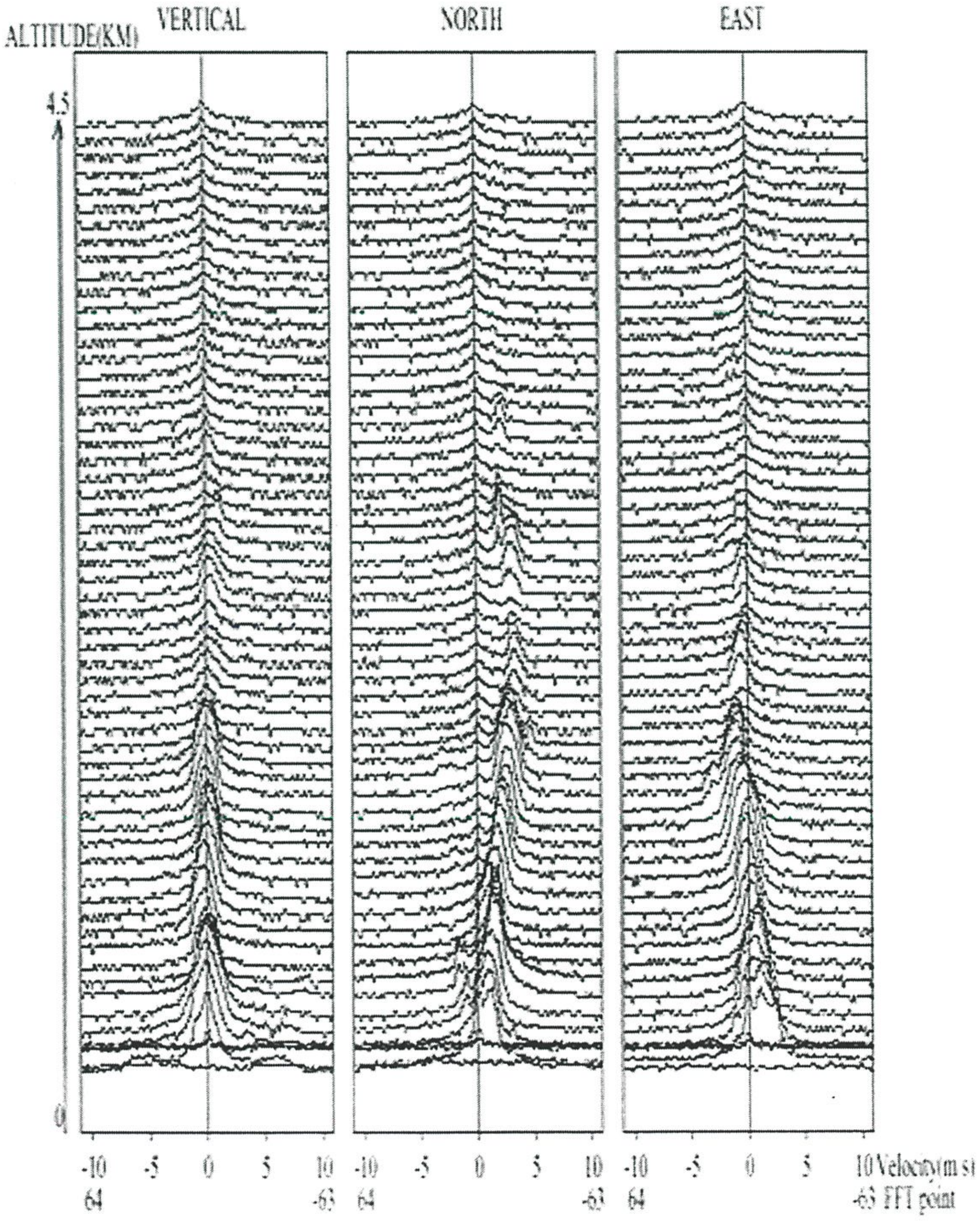
ตารางที่ 3.8 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวินด์โปรไฟเลอร์ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความถี่ของเรดาร์ที่ใช้	1,357.5 MHz
Peak power ที่ส่ง	1kW
IPP (Inter-pulse period)	50 μs
ความกว้างของพัลส์ (Pules width)	1 μs
ความสูงเริ่มต้นที่วัดได้	150 m
อัตราการการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ	0.5 μs
ความสูงในการวัดระยะถัดไปเพิ่มขึ้นทุกๆ	75 m
จำนวนครั้งในการทำ Coherent integration (Coherent number)	100
จำนวนจุดในการแปลงฟาสท์ฟูเรียร์ (number of FFT)	128
ช่วงเวลาที่ทำการวัดข้อมูล	5 min
ชนิดของสายอากาศ	จานสายอากาศแบบพาราโบลาร์
ความกว้างของบีมสายอากาศ	3.9 degree
ทิศทางของบีม (Azimuth, Elevation)	แนวดิ่ง (O,O), ทิศตะวันออก (90,15) ทิศเหนือ (O,15)

ดังนั้นเราจะได้ว่า ประสิทธิภาพในการวัด สามารถวัดข้อมูลของวินด์โปรไฟเลอร์นี้สามารถทำการวัดที่ระดับความสูงเริ่มต้นเมื่อเทียบระดับความสูงจากพื้นดินที่ระยะ 150 เมตร ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.6 เมื่อเวลาที่คลื่นเดินทางไปยังอนุภาคในอากาศแล้วสะท้อนสัญญาณกลับมายังจานรับสัญญาณเรดาร์ ซึ่งก็คือ ความกว้างของพัลส์ (Pulse width) มีค่าเท่ากับ 1 ไมโครวินาที และระยะความสูงถัดไปสามารถวัดได้เพิ่มขึ้นทุกๆ ระยะ 75 เมตร ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.8 และค่าของ sampling rate ในตารางที่ 3.8 ได้ระยะสูงสุดที่ระบบสามารถวัดได้อยู่ที่ระยะประมาณ 7.5 กิโลเมตร ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.9 และค่าของ IPP ในตารางที่ 3.8 แต่ในที่นี้เราทำการสุ่มตัวอย่างสัญญาณจำนวน 60 ระดับ จึงวัดได้จนถึงระยะความสูงประมาณ 4.575 กิโลเมตร ค่าความละเอียด

ของความเร็วตามแนวบีม (velocity resolution) ในระบบนี้เท่ากับ 0.17265 เมตร/วินาที ต่อหนึ่งจุด FFT ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.11 และค่าของ IPP, #COH และ #FFT ในตารางที่ 3.8 เช่นกัน

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กับ Wind profiler ที่ติดตั้งที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แสดงไว้ในตารางที่ 3.8



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างของข้อมูลที่บันทึกจาก Wind profiler จำนวน 1 ชุด

3.5 ข้อมูลที่บันทึกโดยระบบของวินด์โปรไฟเลอร์

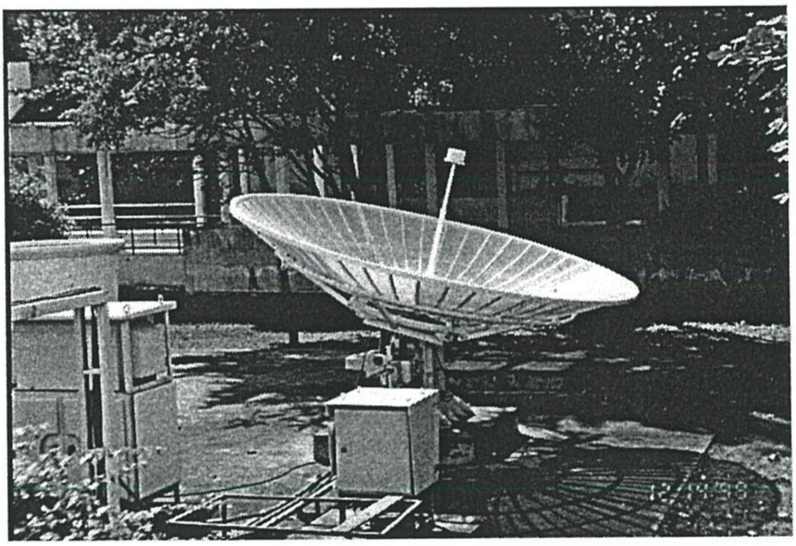
ข้อมูลที่บันทึกโดยระบบนี้ในทุกๆ 5 นาที ประกอบด้วยค่าสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคในบรรยากาศที่ระดับความสูงจำนวน 60 ระดับ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวประกอบด้วยสเปกตรัมซึ่งได้จากการคำนวณฟาสท์ฟูเรียร์ (FFT: Fast Fourier Transform) ของสัญญาณเรดาร์ที่สะท้อนกลับจำนวน 3 ชุด อันเนื่องมาจากการยิงบีมเรดาร์จำนวน 3 บีม ในแต่ละชุดประกอบด้วยสเปกตรัมของข้อมูลจากการคำนวณฟาสท์ฟูเรียร์ 128 จุด จำนวน 60 เส้นสเปกตรัมของสัญญาณ ดังแสดงตัวอย่างของข้อมูลดังกล่าวในรูปที่ 3.15 เมื่อพิจารณาข้อมูลในแต่ละระดับ หรือ สเปกตรัม 128 จุดเพียงเส้นเดียวจะเห็นว่า ค่ากึ่งกลางของข้อมูลอยู่ที่ความถี่ศูนย์ โดยมีช่วงความถี่อยู่ระหว่าง 64 ถึง 63 จุด FFT ช่วงดังกล่าวมีความหมายในการตีความทิศทางการพัดของลมคือ

- แถบความถี่ทางด้านบวกจะแสดงถึงทิศทางลมพัดเข้าหาจานรับสัญญาณ
- แถบความถี่ทางด้านลบจะแสดงถึงทิศทางลมพัดออกจากจานรับสัญญาณ

บทที่ 4

การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะนำเสนอวิธีการประมาณอัตราการตกของฝน โดยใช้ข้อมูลในแนวดิ่งจากระบบเรดาร์นี้ด้วยวิธีการค้นหาความถี่ของสัญญาณดอปเปลอร์สเปกตรัมที่มีระดับพลังงานสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับการสะท้อนกลับเนื่องจากฝนและความเร็วดอปเปลอร์เนื่องจากการสะท้อนกลับจากบรรยากาศ ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำมาใช้คำนวณหาอัตราการตกของฝน ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบการประมาณอัตราการตกของฝนจากข้อมูลของระบบเรดาร์สำรวจบรรยากาศและอัตราการตกของฝนที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการตกของฝนซึ่งติดตั้งอยู่ภาคพื้นดิน จะนำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าประมาณของอัตราการตกของฝน จากข้อมูลที่บันทึกโดยระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ 4.1 จานสายอากาศของ Wind profiler ติดตั้งที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯลาดกระบัง

สำหรับระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศซึ่งติดตั้งที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประกอบด้วยอุปกรณ์ไมโครเวฟทำงานที่ความถี่ 1,357 MHz ใช้จานส่งและรับสัญญาณเป็นจานเดียวกันแบบพาราโบล่าดังรูปที่ 4.1 สามารถปรับหมุนได้รอบตัวโดยการควบคุมจากไมโครคอมพิวเตอร์ ใช้วัดข้อมูลอย่างต่อเนื่องทุก ๆ 5 นาที โดยการส่งพัลส์ไมโครเวฟขึ้นไปในแนวดิ่งและในแนวทำมุม θ เทียบกับแนวดิ่งไปทางทิศเหนือและตะวันออกอีก 2 บีม

สัญญาณไมโครเวฟที่ถูกส่งออกไป จะสะท้อนกลับลงมาเนื่องจากอนุภาคต่างๆในบรรยากาศ สัญญาณที่รับได้ในเวลาต่าง ๆ จะแสดงถึงคุณลักษณะของอากาศที่แต่ละระดับความสูง เมื่อ

พิจารณาสัญญาณที่รับได้ในโดเมนความถี่ จะสังเกตเห็นว่าพลังงานส่วนใหญ่ของสัญญาณเกิดขึ้น ณ ความถี่ที่สัมพันธ์กับความเร็วของอนุภาคในอากาศที่ระดับความสูงนั้น อันเนื่องมาจากผลของดอปเปลอร์ (Doppler Effect) ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ในแนวดิ่ง (V_1) ไ ด้จากการวัดด้วยบีมเรดาร์ในแนวดิ่ง และสำหรับอีก 2 บีมที่ทำมุม θ กับบีมในแนวดิ่ง สามารถคำนวณหาความเร็วของอนุภาคที่เกิดขึ้นในแต่ละแนวบีมนั้นโดยที่ V_2 มีองค์ประกอบของอนุภาคที่เคลื่อนที่ในแนวเหนือ-ใต้ และ V_3 มีองค์ประกอบของอนุภาคที่เคลื่อนที่ในแนวตะวันออก-ตะวันตก จากข้อมูลองค์ประกอบในแต่ละแนวบีม ทำให้สามารถคำนวณเวกเตอร์ความเร็วลมใน 3 มิติได้โดยมุมระหว่างบีม θ ที่เลือกใช้เท่ากับ 15 องศา ระบบเรดาร์สามารถวัดข้อมูลที่ระดับความสูงเริ่มต้น 150 เมตรจากพื้นดินไปจนถึงประมาณ 4 กิโลเมตร

ข้อมูลที่บันทึกโดยระบบเรดาร์ในทุก ๆ 5 นาทีนี้ จะประกอบด้วยสเปกตรัมซึ่งได้จากการคำนวณ FFT (Fast Fourier Transform) ของสัญญาณเรดาร์ที่สะท้อนกลับมาจำนวน 3 ชุด อันเนื่องมาจากการยิงเรดาร์ 3 บีม ข้อมูลในแต่ละชุดจะประกอบด้วยสเปกตรัมของข้อมูล 128 จุด จำนวน 60 เส้นซึ่งสอดคล้องกับการวัดข้อมูลที่ความสูง 60 ระดับ

เมื่อพิจารณาข้อมูลเพียงระดับเดียวหรือสเปกตรัม 128 จุดหนึ่งเส้น จะมีช่วงความถี่ระหว่าง -64 ถึง 63 จุด FFT และมีค่ากึ่งกลางอยู่ที่ความถี่ศูนย์ แถบความถี่ที่มีค่าเป็นบวก (ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วที่มีค่าลบ) แสดงถึงลมที่เคลื่อนที่ในทิศทางพุ่งเข้าหาจานรับสัญญาณ ในขณะที่แถบความถี่ช่วงลบ (ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วที่มีค่าบวก) แสดงถึงลมที่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม ความละเอียดของค่าความเร็วตามแนวบีม (Velocity Resolution) ที่สามารถวัดได้โดยระบบนี้ มีค่าเท่ากับ 0.17265 เมตร/วินาทีต่อหนึ่งจุด FFT

ในการวัดอัตราการตกของฝน โดยใช้เรดาร์วัดความเร็วและทิศทางของลมนั้น หลักการและการคำนวณหาค่าต่างๆ ของเรดาร์จะเกี่ยวข้องกับเรื่องลมและทิศทางของมัน ดังนั้นมันจึงละเลยไม่ได้ ที่จะพิจารณาเรื่องของลมด้วย

4.1 การคำนวณหาความเร็วและทิศทางของลม

ข้อมูลที่บันทึกได้จากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศไม่สามารถนำมาสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของลมได้ในทันที หากแต่ต้องนำเอาข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์และหาวิธีการคำนวณที่เหมาะสม เพื่อพิจารณาค่าความเร็วและทิศทางของลมก่อน โดยทำการคำนวณหาเวกเตอร์ของลมใน 3 มิติ $(u,v,w)^T$ ตามแนวบีมของเรดาร์ซึ่งในแต่ละบีมจะมีค่าของสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคในบรรยากาศที่ 60 ระดับความสูง โดยเก็บบันทึกไว้ในไฟล์ข้อมูล แล้วนำเอาข้อมูลดังกล่าว มาทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการหาค่าสูงสุดของกำลังงาน (peak power) [7] เพื่อคำนวณหาความเร็วลมในแนวบีมของเรดาร์ เพื่อแสดงเป็นโปรไฟล์ของลม (wind profile)

4.1.1 การคำนวณหาเวกเตอร์ของลม

การหาความเร็วลมพิจารณาจากค่าสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคในบรรยากาศ ในแต่ละระดับความสูง ซึ่งเป็นความถี่ที่สัมพันธ์กับความเร็วของอนุภาคในอากาศเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ดอบเปลอร์ (Doppler effect) โดยสามารถพิจารณาค่าความเร็วของลมใน 3 ทิศทางจากบีมเรดาร์ 3 บีม เป็นเวกเตอร์องค์ประกอบความเร็วลมใน 3 ทิศทาง คือทิศทางในแนวดิ่ง แนวเหนือ-ใต้ และแนวตะวันออก - ตะวันตก ดังแสดงในรูปที่ 3.14 จึงสามารถหาความเร็วลมในแนวดิ่ง (v_Z) ได้จากการวัดด้วยบีมเรดาร์ในแนวดิ่ง ส่วนอีก 2 บีม ซึ่งทำมุมกับแนวดิ่งโดยที่ v_y และ v_x สามารถนำมาหาค่าความเร็วในแนวทิศเหนือ และทิศตะวันออกได้ พิจารณาองค์ประกอบความเร็วลมในแนวระดับเส้นสายตา หรือในแนวระนาบ (line-of-sight) ในแต่ละระดับความสูง หรือความเร็วดอปเปลอร์เขียนได้เป็น

$$v_d = V.I \tag{4.1}$$

เมื่อ v_d เป็นความเร็วดอปเปลอร์ หรือองค์ประกอบความเร็วลมในระดับแนวเส้นสายตาในแต่ละระดับความสูง

v_x เป็นองค์ประกอบของลมที่พัดในแนวทิศเหนือ – ใต้

v_y เป็นองค์ประกอบของลมที่พัดในแนวทิศตะวันออก- ตะวันตก

v_z เป็นความเร็วลมในแนวดิ่ง

V เป็นเวกเตอร์ความเร็วลม เมื่อ $V = (v_x, v_y, v_z)$

I เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย ตามทิศทางของบีมสายอากาศ

θ_X เป็นมุมระหว่าง I กับแกน X ซึ่งแทนทิศเหนือ

θ_Y เป็นมุมระหว่าง I กับแกน Y ซึ่งแทนทิศตะวันออก

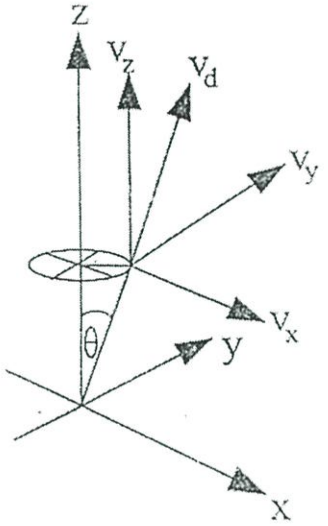
θ_Z เป็นมุมระหว่าง I กับแกน Z ซึ่งแทนทิศพุ่งขึ้น (แกนตั้ง)

ถ้าวัด v_d ในบีมทั้ง 3 ทิศทาง นั่นคือ I จะมี 3 ตัวคือ i_1 ,i_2 และ i_3 สามารถประมาณเวกเตอร์ความเร็วลมจากสามการที่ 4.1 และเขียนใหม่ได้เป็น [ ]

$$V = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{function of} \\ \text{zenith angles of} \\ \text{the three beams} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{d2} \\ v_{d3} \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} \cos\theta_{x1} & \cos\theta_{y1} & \cos\theta_{z1} \\ \cos\theta_{x2} & \cos\theta_{y2} & \cos\theta_{z2} \\ \cos\theta_{x3} & \cos\theta_{y3} & \cos\theta_{z3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{d2} \\ v_{d3} \end{bmatrix} \qquad (4.2)$$

การวัดความเร็วลมโดยใช้บีมจำนวนหลายบีม เรียกว่า วิธี Velocity – Azimuth Display (VAD) [ ] ซึ่งในแต่ละบีมจะทำมุมกับบีมในแนวดิ่ง ความเร็วคอปเปเลอร์, เวกเตอร์องค์ประกอบ



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบที่ใช้พิจารณาความเร็วลมโดยใช้วิธี Velocity – Azimuth Display (VAD)

ความเร็วลมใน 3 ทิศทางเมื่อพิจารณาตามแกน x, y และ z รวมทั้งมุมระหว่างบีม (θ) แสดงได้ดังรูป ที่ 4.2

ค่าความเร็วตามแนวบีม (v_0) (Velocity resolution) จากสมการที่ 3.11 และค่า # FFT จากตารางที่ 3.2 จะสามารถคำนวณหาความเร็วสูงสุดที่ระบบเรดาร์สามารถวัดได้จาก

$$V_{max} = V_0 . \frac{\# FFT}{2} \qquad (4.3)$$

เมื่อ V_{max} เป็นความเร็วสูงสุดที่เรดาร์สามารถวัดได้

V_0 เป็นค่าความเร็วตามแนวบีม (Velocity resolution)

#FFT เป็นจำนวนในการแปลงฟาสท์ฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform)

จากสมการที่ 4.2 เวกเตอร์ความเร็วลม คือ เวกเตอร์ความเร็วลมในสามมิติ $(u, v, w)^T$ ซึ่งสามารถหาค่า $(u, v, w)^T$ ได้จากโปรเจคชั่นของ v_x,v_yและ v_z ลงบนระนาบ และแกนตั้ง ดังแสดงเป็นสมการได้ดังนี้ [5]

$$u = v_x \csc\theta - v_z \cot\theta \qquad (4.4)$$

$$v = v_y \csc\theta - v_z \cot\theta \qquad (4.5)$$

$$w = v_z \qquad (4.6)$$

เมื่อ u เป็นความเร็วลมในแนวทิศเหนือ
v เป็นความเร็วลมในแนวทิศตะวันออก
w เป็นความเร็วลมตามแนวดิ่ง
v_x เป็นองค์ประกอบของลมที่พัดในแนวทิศเหนือ-ใต้
v_y เป็นองค์ประกอบของลมที่พัดในแนวทิศตะวันออก- ตะวันตก
v_z เป็นความเร็วลมในแนวดิ่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ w
θ เป็นมุมระหว่างบีม

4.1.2 การคำนวณความเร็วในแนวบีมโดยวิธีค่าสูงสุดของกำลังงาน

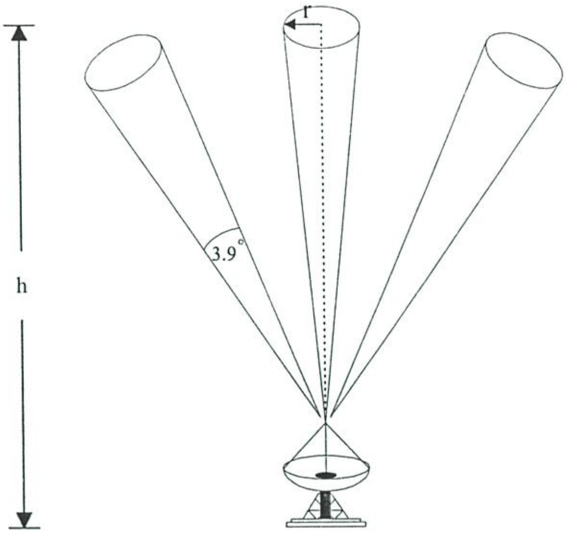
การประมาณความเร็วลมที่เกิดขึ้นในแนวบีมของเรดาร์ด้วยวิธีพีคเพาเวอร์ ทำได้โดยการค้นหาความถี่ของสัญญาณดอปเปลอร์สเปคตรัมในแต่ละระดับความสูงที่มีแอมปลิจูดของสัญญาณสูงที่สุด [7] ซึ่งรูปที่ 3.15 เป็นตัวอย่างของข้อมูลที่ได้จากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศหนึ่งชุด โดยจะนำมาสร้างเป็นสเปกตรัมของสัญญาณ และสามารถนำมาใช้คำนวณหาค่าความเร็วของลมในแต่ละบีมได้จาก

$$V_{bh} = P_{bh} . V_0 \qquad ; b = 1,2 \text{ and } 3, \; h = 1,2,..,60 \qquad (4.7)$$

เมื่อ V_{bh} เป็นความเร็วลมในทิศทางของการส่งเรดาร์บีมที่ b
(1 แทนบีมของเรดาร์ในแนวดิ่ง, 2 แทนบีมของเรดาร์ในแนวทิศเหนือ และ
3 แทนบีมของเรดาร์ในแนวทิศตะวันออก)

P_{bh} เป็นตำแหน่งทางความถี่ที่ค้นหาได้โดยวิธีพีคเพาเวอร์ในแต่ละเส้นสเปคตรัม ซึ่งมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มอยู่ระหว่าง -64 ถึง 63

4.2 การคำนวณหาพื้นที่ครอบคลุมการสำรวจ



รูปที่ 4.3 ทิศทางการสำรวจอัตราการตกของฝนด้วยเรดาร์ ซึ่งมีอยู่สามทิศทางที่ความสูงระดับที่ h

สำหรับพื้นที่ครอบคลุมการสำรวจนั้น มันจะขึ้นอยู่กับความสูง (h) และความกว้างของบีม (Beam width) ถ้ายิ่งระยะความสูงของบีมมีค่ามาก พื้นที่ครอบคลุมของการสำรวจก็ยิ่งกว้างขึ้นตาม และ เช่นเดียวกัน ถ้าความกว้างของบีมกว้างขึ้น พื้นที่การสำรวจก็กว้างขึ้นตาม ดังนั้นจะได้

$$A = f(h,\theta) \tag{4.8}$$

เมื่อ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของบีม ซึ่งกำหนดให้เป็นพื้นที่ครอบคลุมของการสำรวจ

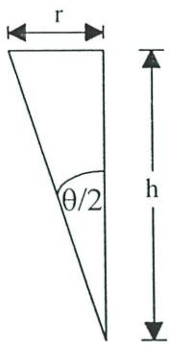
h เป็นความสูงของบีม ที่ตำแหน่งระยะสำรวจ

θ เป็นความกว้างของบีม

ด้วยเหตุที่พื้นที่หน้าตัดของบีมเป็นรูปวงกลม ดังนั้น พื้นที่ครอบคลุมคือ

$$A = \pi r^2 \tag{4.9}$$

ซึ่ง r กำหนดให้เป็น รัศมีของพื้นที่ครอบคลุมที่ระดับความสูง h



รูปที่ 4.4 รูปทรงเรขาคณิตของลำบีมของเรดาร์ที่ใช้ในการคำนวณ

จากรูปที่ 4.4 เราสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ ระหว่างพื้นที่ครอบคลุมกับความสูงและความกว้างของบีมได้ดังนี้

$$r = h\tan\frac{\theta}{2} \tag{4.10}$$

$$A = \pi(h\tan\frac{\theta}{2})^2 \tag{4.11}$$

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ระดับความสูง (h) ของการสำรวจอยู่ที่ ระดับความสูง ตั้งแต่ 300 เมตร ถึง 4 กิโลเมตร สำรวจอัตราการตกของฝนที่ระดับความสูงทุกๆ 75 เมตร และความกว้างของบีม (θ) เท่ากับ 3.9 องศา สมมติว่าเราทำการสำรวจอัตราการตกของฝนที่ระดับความสูง (h) 4 กิโลเมตร ดังนั้น พื้นที่ครอบคลุมการสำรวจสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A = \pi(4000\tan(1.95^\circ))^2 = 58{,}268 \text{ ตารางเมตร} \tag{4.12}$$

พื้นที่สำรวจดังกล่าวนี้ เป็นเพียงการสำรวจในแกนเดียวเท่านั้น ซึ่งระบบเรดาร์ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะทำการสำรวจทั้งหมด สามแกน ดังนั้น พื้นที่การสำรวจอัตราการตกของฝนทั้งหมดคือ

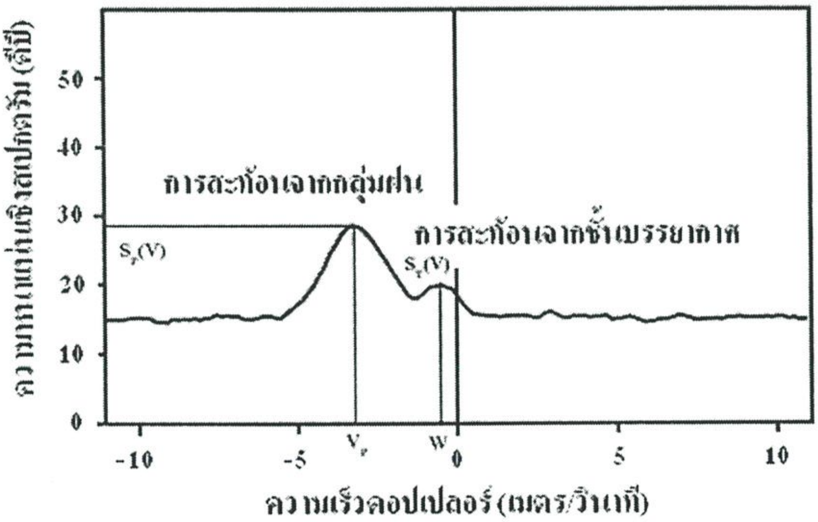
$$A_t = 3A = 174{,}804 \text{ ตารางเมตร} \tag{4.13}$$

4.3 การคำนวณค่าอัตราการตกของฝน

ในการคำนวณอัตราการตกของฝนจากข้อมูลที่บันทึกโดยระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศทำได้โดยการพิจารณาข้อมูลของสเปกตรัมของบีมในแนวดิ่ง สำหรับในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เราจะเลือกพิจารณาสเปกตรัมของบีมในแนวดิ่งในช่วงความสูงต่ำๆ ซึ่งสเปกตรัมในช่วงความสูงต่ำๆ นี้

จะสามารถแยกแยะพีคที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนกลับจากบรรยากาศทั่วไปกับพีคที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนกลับจากฝนที่อยู่ในเส้นสเปกตรัมเดียวกันได้ในกรณีที่ฝนตกไม่ค่อยหนัก

สำหรับการคำนวณความเร็วของอนุภาคในแนวบีมนั้น เราสามารถที่จะใช้วิธีพีคเพาเวอร์ ในการคำนวณ [6] ซึ่งจะทำการค้นหาตำแหน่งทางความถี่สเปกตรัมที่มีแอมปลิจูด (Amplitude) ของสัญญาณสูงที่สุดที่เกิดขึ้นในช่วงการสะท้อนกลับจากฝน (ความถี่ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วในช่วง –9.65 ถึง –2.0 เมตร/วินาที) และการสะท้อนกลับจากบรรยากาศ (ความถี่ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วในช่วง –1.5 ถึง 1.5 เมตร/วินาที) ตามสมการที่ 4.7 ซึ่งในที่นี้ใช้ข้อมูลสเปกตรัมในแนวดิ่งเพียงแนวเดียว



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของการสะท้อนกลับเนื่องจากบรรยากาศและการสะท้อนกลับเนื่องจากฝน

บทความที่อ้างอิง [7] ได้นำเสนอรูปแบบดอปเปลอร์สเปกตรัมของการสะท้อนกลับเนื่องจากบรรยากาศและการสะท้อนกลับเนื่องจากฝน ดังรูปที่ 4.5 โดยรูปแบบสเปกตรัมที่ได้จากการสะท้อนกลับเนื่องจากบรรยากาศแสดงในสมการที่ 4.14

$$S_t = P_0 \exp[-(V-w)^2/2\sigma^2] \qquad (4.14)$$

โดยที่ V คือ ความเร็วของดอปเปลอร์สเปกตรัม

w คือ ความเร็วดอปเปลอร์ของการสะท้อนกลับจากบรรยากาศ

σ คือ ความกว้างของสเปกตรัม

P_0 คือ พลังงานสูงสุดของการสะท้อนกลับเนื่องจากบรรยากาศ

สำหรับรูปแบบสเปกตรัมที่ได้จากการสะท้อนกลับเนื่องจากฝนนั้นได้แสดงในเทอมของเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดเม็ดฝน D (มิลลิเมตร) ดังสมการที่ 4.15

$$S_p = CN(D)D^6 \mid dD/dV \mid \tag{4.15}$$

โดยที่ C คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับระบบเรดาร์

N(D) คือการกระจายขนาดของเม็ดฝน ซึ่งในการศึกษานี้เลือกสมมติการกระจายแบบแกมม่า โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ μ ดังสมการข้างล่าง

$$N(D) = N_0 D^{\mu} \exp(-\Lambda D) \tag{4.16}$$

สำหรับในการศึกษานี้ได้กำหนด $\mu=3$ และได้นำความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตกของเม็ดฝน (V) และขนาดของเม็ดฝน (D) ของ [8] มาประกอบการคำนวณดังสมการที่ 4.17

$$V(D) = [-\alpha_1 + \alpha_2 \exp(-\alpha_3 D)](\rho_0/\rho)^{0.4} \tag{4.17}$$

โดยที่ $\alpha_1 = 9.65$ เมตร/วินาที, $\alpha_2 = 10.3$ เมตร/วินาที , $\alpha_3 = 0.6$ mm^{-1}

ρ_0 คือความหนาแน่นของอากาศ ณ.ระดับพื้นดิน

ρ คือความหนาแน่นของอากาศ ณ.ระดับสำรวจ

เครื่องหมายของ V จะเป็นลบเมื่ออนุภาคฝนตกลงมา[9] และสำหรับค่า dD/dV สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.17 แล้ว S_p จะแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S_p(V) = [CN_0/(\alpha_2\alpha_3\beta)]D^{\mu+6}\exp((\alpha_3 - \Lambda)D) \tag{4.18}$$

โดยที่ $\beta = (\rho_0/\rho)^{0.4}$ สามารถดูได้จากภาคผนวก ก.

สำหรับวิธีการนี้ Λ และ N_0 สามารถคำนวณโดยการพิจารณาใช้ตำแหน่งของการสะท้อนกลับเนื่องจากฝนที่พีคสูงสุด $(V_p, S(V_p))$ และความเร็วดอปเปลอร์ของการสะท้อนกลับเนื่องจากบรรยากาศ (w) [9] ตามสมการต่อไปนี้

$$\Lambda = \{(\mu+6)/D_p\} + \alpha_3 \tag{4.19}$$

$$N_0 = (S(V_p)\alpha_2\alpha_3\beta(e/D_p)^{\mu+6})/C \tag{4.20}$$

โดยที่ D_p คือขนาดของเม็ดฝน ซึ่งจะสอดคล้องกับความเร็วในการตก $(V_p - w)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.16 จากนั้นจะได้เป็น

$$D_p = -\log_e[(\alpha_1 + (V_p - w)/\beta)/\alpha_2]/\alpha_3 \tag{4.21}$$

จากนั้นสามารถคำนวณค่าอัตราการตกของฝนได้โดย

$$R = 6\pi \times 10^{-4} \int_0^\infty D^3 N(D) V(D) dD \tag{4.22}$$

จากสูตรที่สำคัญสำหรับการกระจายขนาดของเม็ดฝนแบบเอกซ์โปเนนเชียล [10]

$$\int_0^\infty x^{v-1} e^{-\mu x} dx = (1/\mu^v)\Gamma(v) \quad \text{Re } \mu>0, \text{Re } V>0 \tag{4.23}$$

โดยที่ $\Gamma(V)$ คือแกมม่าฟังก์ชัน (ถ้า V คือค่าจำนวนเต็ม $n, \Gamma(V) = (n-1)!$) ดังนั้นอัตราการตกของฝนสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$R = 6\pi \times 10^{-4} N_0 \beta \Gamma(\mu + 4)\left[\frac{\alpha_1}{\Lambda^{\mu+4}} - \frac{\alpha_2}{(\Lambda + \alpha_3)^{\mu+4}}\right] \tag{4.24}$$

โดยที่ $\Gamma(\mu + 4) = (\mu + 3)!$

4.4 ผลการคำนวณ

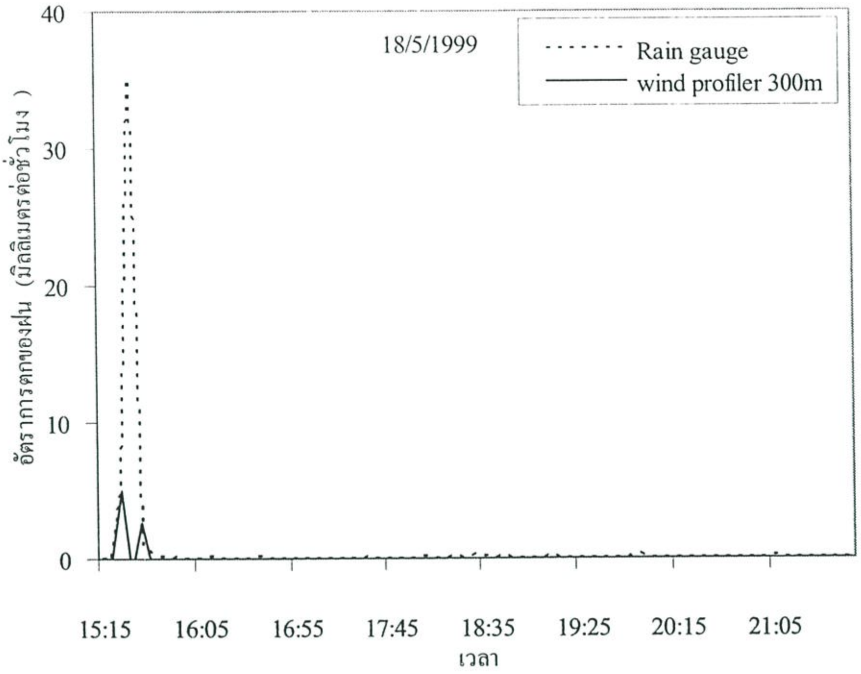
ในส่วนนี้ได้นำเสนอถึงผลการคำนวณหาอัตราการตกของฝนโดยใช้ข้อมูลที่บันทึกได้จากระบบเรดาร์ และหาชั้นการหลอมละลายของเมฆฝน

4.4.1 ผลการคำนวณหาอัตราการตกของฝน

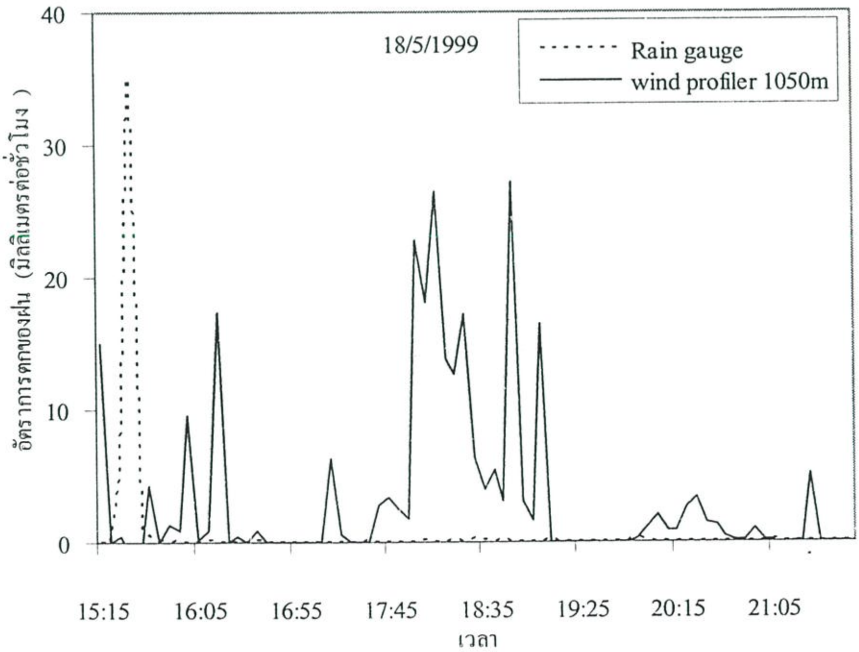
ข้อมูลดอปเปลอร์สเปกตรัม (Doppler Spectrum) ในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศซึ่งติดตั้ง ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตั้งแต่วันที่ 3 พฤษภาคม ถึง 7 สิงหาคม พ.ศ. 2542 ได้นำมาใช้ในการคำนวณค่าการประมาณอัตราการตกของฝน โดยวิธีการตรวจหาตำแหน่งสูงสุดที่สัมพันธ์กับการสะท้อนกลับเนื่องจากฝนและความเร็วดอปเปลอร์ของการสะท้อนกลับเนื่องจากบรรยากาศของดอปเปลอร์สเปกตรัม จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าอัตราการตกของฝนที่ระดับความสูงต่างๆ

4.4.1.1 เปรียบเทียบค่าที่คำนวณกับค่าที่วัดได้ในช่วง 1 วัน

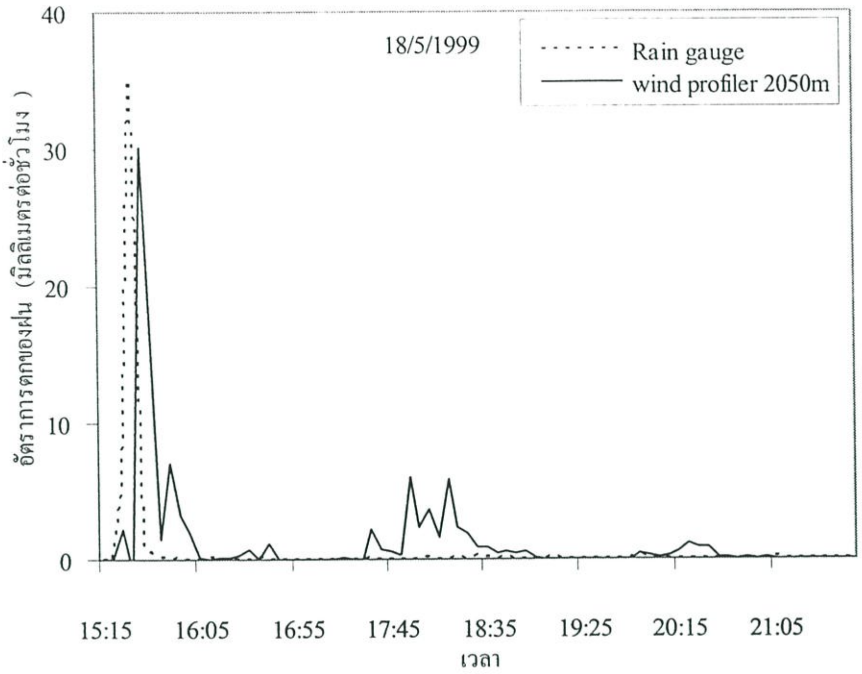
รูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.10 เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการตกของฝนในวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2542 โดยการใช้ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจของระบบเรดาร์ที่ระดับความสูงต่างๆ คือ 300, 1050, 2025, 3000 และ 4050 เมตร ตามลำดับ ข้อมูลจากการสำรวจเฉลี่ยประมาณ 5 นาทีจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย 5 นาทีของอัตราการตกของฝนที่ได้จากเครื่องวัด (Rain gauge) ที่ติดตั้ง ณ พื้นดินในช่วงเวลาเดียวกัน รูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนที่ความสูง 300 เมตร จากรูปที่เวลา 15:20-15:25 ค่าที่ได้จากการคำนวณจะสอดคล้องกับค่าที่วัดได้ สำหรับช่วงเวลา 15:30-15:35 นั้นค่าที่วัดได้มีค่าอัตราการตกค่อนข้างสูง ซึ่งแตกต่างจากที่คำนวณได้ค่อนข้างมาก เนื่องมาจากดอปเปลอร์สเปกตรัมที่สำรวจได้นั้นมีลักษณะคล้ายเส้นตรงทำให้ไม่สามารถค้นหาจุดสูงสุดที่เกิดจากการสะท้อนกลับจากฝนและบรรยากาศที่ชัดเจนได้ ส่วนในช่วงเวลา 15:40 เป็นต้นไป อัตราการตกของฝนทั้งสองแบบมีเพียงเล็กน้อย รูปที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนที่ความสูง 1050 เมตร ที่ช่วงเวลา 15:15-15:20 นั้นมีค่าที่คำนวณได้จากระบบเรดาร์ แต่เครื่องวัดไม่มีค่า จุดนี้บ่งบอกได้ว่า ระบบเรดาร์สามารถตรวจวัดหาอัตราการตกของฝนจากกลุ่มเมฆฝนที่ความสูงนี้ก่อนที่ฝนจะตกลงสู่พื้นดิน ส่วนช่วงเวลา 15:30-15:40 ดอปเปลอร์สเปกตรัมที่สำรวจได้ไม่สามารถนำมาคำนวณได้เช่นเดียวกับกรณีในรูปที่ 4.6 สำหรับในช่วงเวลา 15:50 เป็นต้นไป สังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากเครื่องวัดนั้นมีค่าอัตราการตกเพียงเล็กน้อยแต่ค่าที่คำนวณได้ค่อยข้างมากโดยเฉพาะช่วงเวลา 17:45-19:00 จะแตกต่างกันชัดเจนทั้งนี้เนื่องจากความสูงที่ทำการสำรวจนั้นต่างกันและกลุ่มฝนในช่วงเวลานี้ตกลงมายังพื้นดินเพียงจำนวนน้อย รูปที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนที่ความสูง 2025 เมตร ค่าที่คำนวณได้จะคล้ายกับที่ 1050 เมตร ในแต่ละช่วงเวลา แต่ความแตกต่างระหว่างค่าที่คำนวณได้กับค่าที่วัดได้ในช่วงเวลา 17:45-19:00 จะน้อยกว่าที่ 1050 เมตรเนื่องจากที่ความสูงนี้ ณ.ช่วงเวลานั้นมีปริมาณฝนน้อยกว่า รูปที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนที่ความสูง 3000 เมตร ค่าที่คำนวณได้มีลักษณะเช่นเดียวกับที่ความสูง 1050 เมตร และ 2025 เมตร รูปที่ 4.10 เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนที่ความสูง 4050 เมตร ที่ความสูงนี้จะเห็นว่าที่เวลา 15:20-15:50 ค่าที่ได้จากการคำนวณไม่ได้แสดงไว้เนื่องจากดอปเปลอร์สเปกตรัมไม่สามารถนำมาคำนวณได้แสดงว่าในช่วงเวลานี้มีจำนวนฝนมากณ.ความสูงดังกล่าว



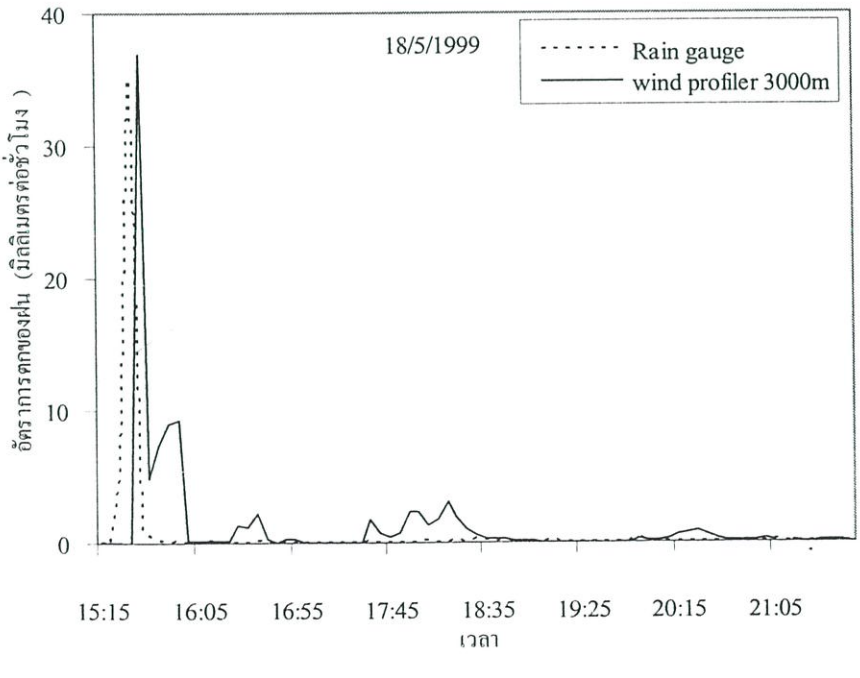
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 300 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2542



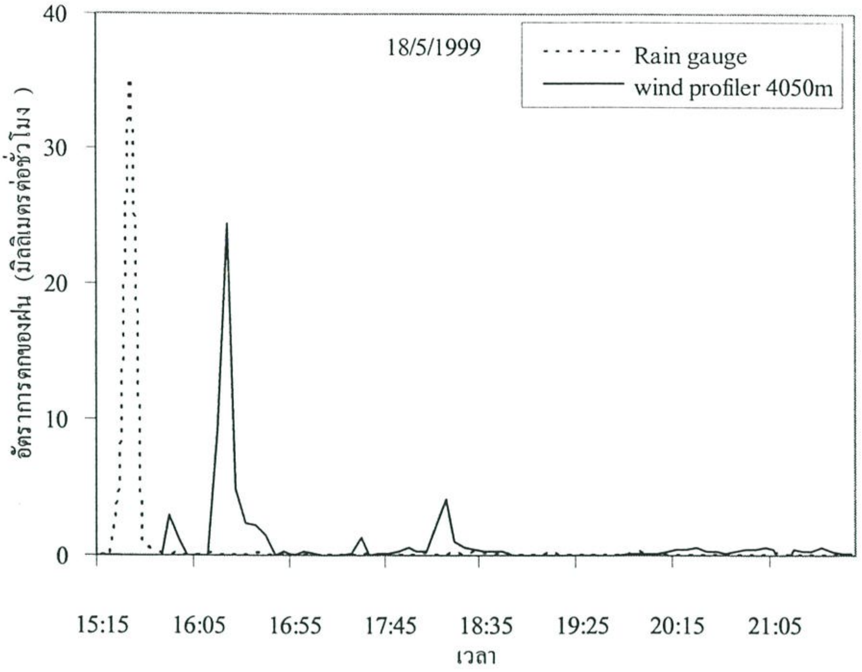
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 1050 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2542



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 2025 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2542

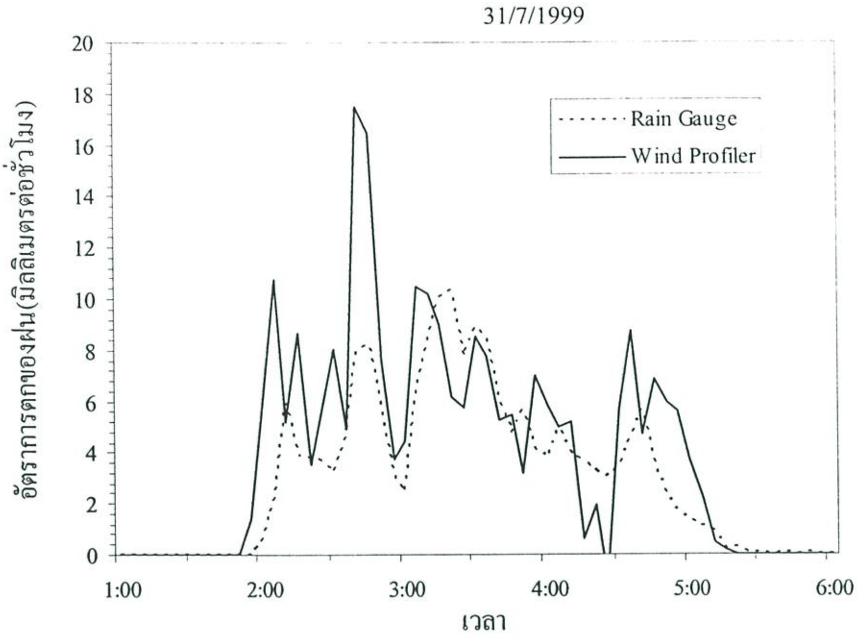


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 3000 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2542

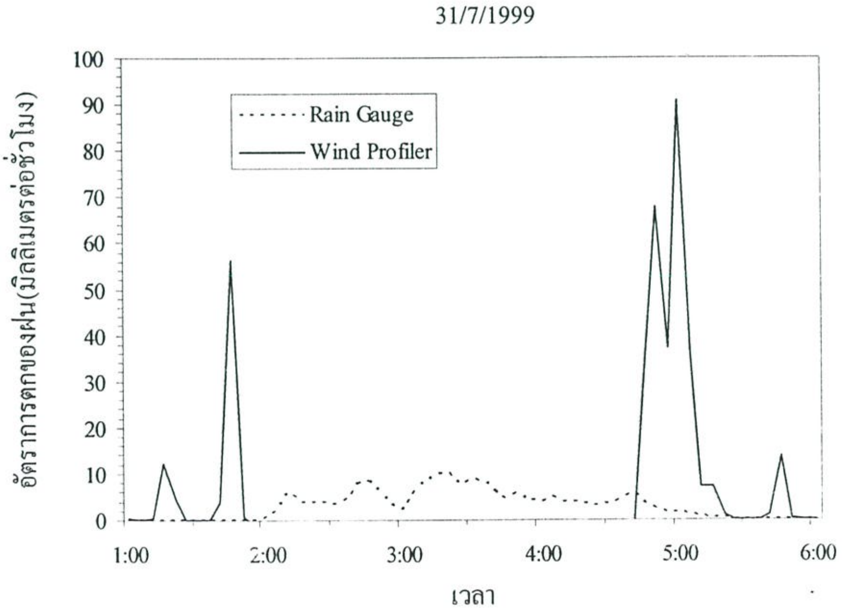


รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 4050 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2542

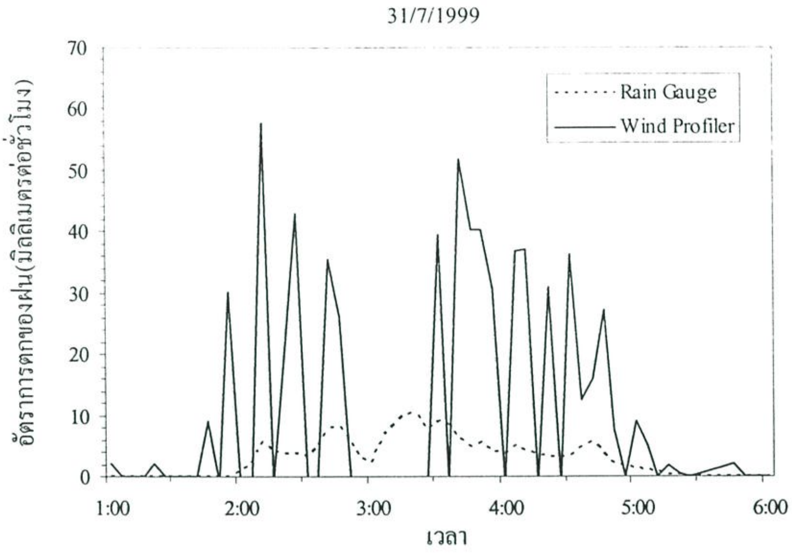
รูปที่ 4.11 ถึง 4.15 เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการตกของฝนในวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2542 โดยการใช้ข้อมูลเฉลี่ย 5 นาทีที่ได้จากการสำรวจของระบบเรดาร์ที่ระดับความสูง 300, 1050, 2025, 3000 และ 4050 เมตร ตามลำดับ ที่ระดับความสูง 300 เมตร ช่วงเวลาที่มีฝนตกและอัตราการตกของฝนที่ได้จากการคำนวณจะสอดคล้องและใกล้เคียงกับค่าอัตราการตกของฝนที่ได้จากเครื่องวัดณ.ระดับพื้นดินชัดเจนมากกว่าที่ระดับความสูงอื่น ในขณะเดียวกันที่เวลาก่อน 2:00 ในรูปที่ 4.11 จะสังเกตเห็นว่าเครื่องวัดยังไม่มีค่าอัตราการตกของฝน แต่ระบบเรดาร์นั้นสามารถตรวจหาค่าอัตราการตกของฝนได้ ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวนี้เกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับที่ความสูง 1050, 2025, 3000 และ4050 เมตร ที่เวลา 2:00 น. ถึง 4:40 น. ณ.ความสูง 1050 เมตร ไม่สามารถที่จะคำนวณหาค่าได้ เนื่องจากไม่สามารถตรวจหาตำแหน่งสูงสุดซึ่งสัมพันธ์กับการสะท้อนกลับเนื่องจากฝนและบรรยากาศที่ชัดเจนบนดอปเปลอร์สเปกตรัมได้ ที่เวลา 1:35-1:50 เป็นช่วงที่ระบบเรดาร์ตรวจหากลุ่มเมฆฝนได้ก่อนที่จะตกลงสู่พื้นดินและช่วงเวลา 4:40-5:20 ค่าที่ได้จากการคำนวณต่างจากค่าที่วัดได้มากเนื่องจากระดับความสูงที่นำข้อมูลมาวิเคราะห์ต่างกัน ที่ 2025, 3000 และ4050 เมตรค่าที่ได้แตกต่างจากที่วัดได้เช่นกัน แต่จะสังเกตเห็นได้ว่าทุกความสูงมีช่วงเวลาที่ฝนตกสอดคล้องกัน



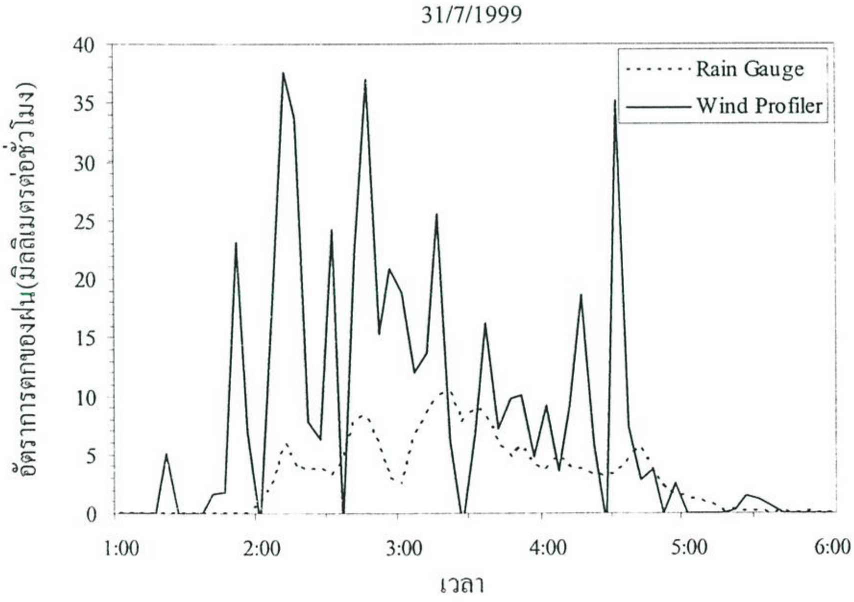
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 300 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2542



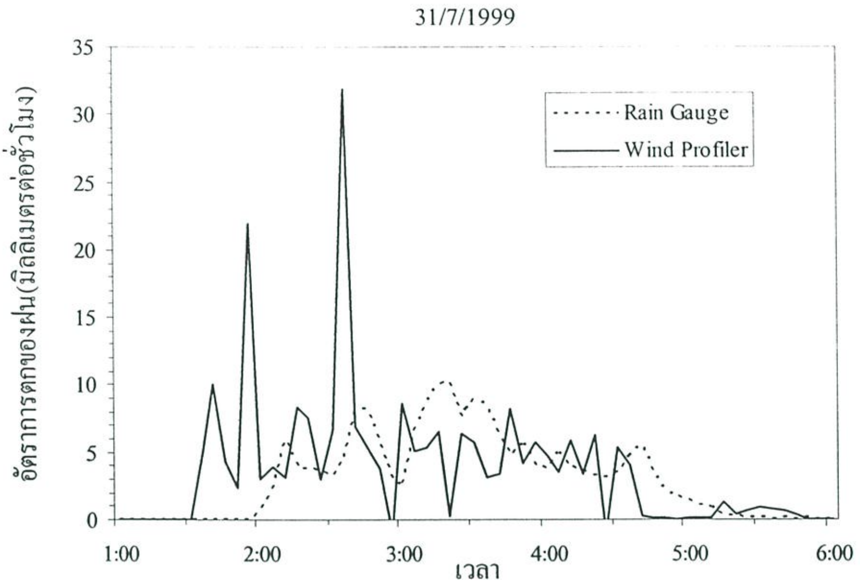
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 1050 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2542



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 2025 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2542

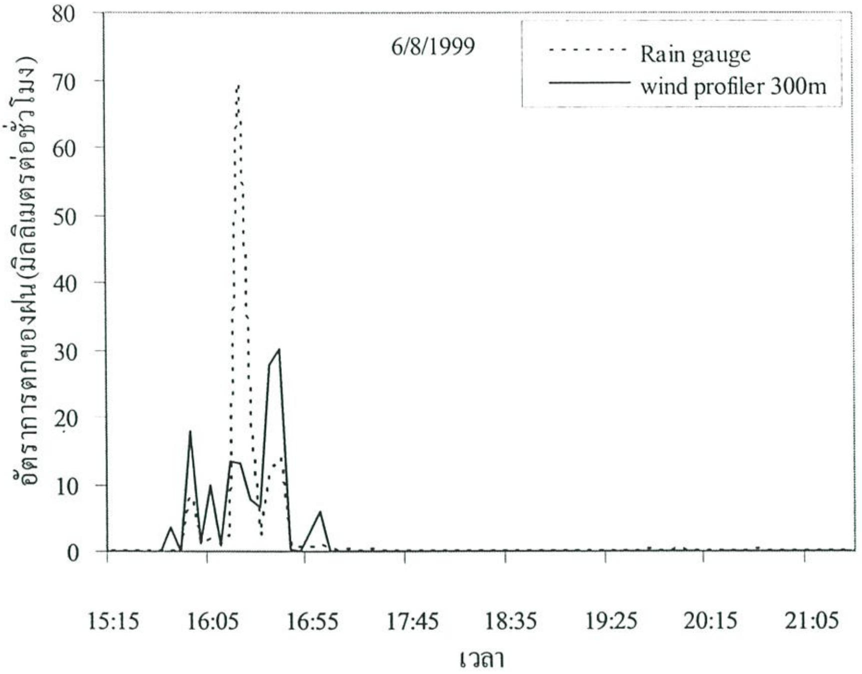


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 3000 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2542

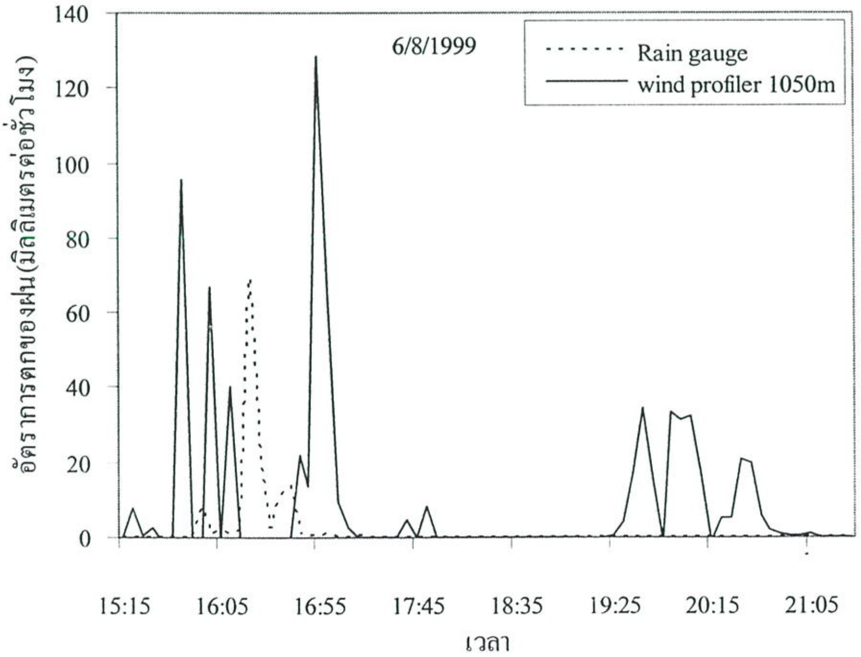


รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 4050 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2542

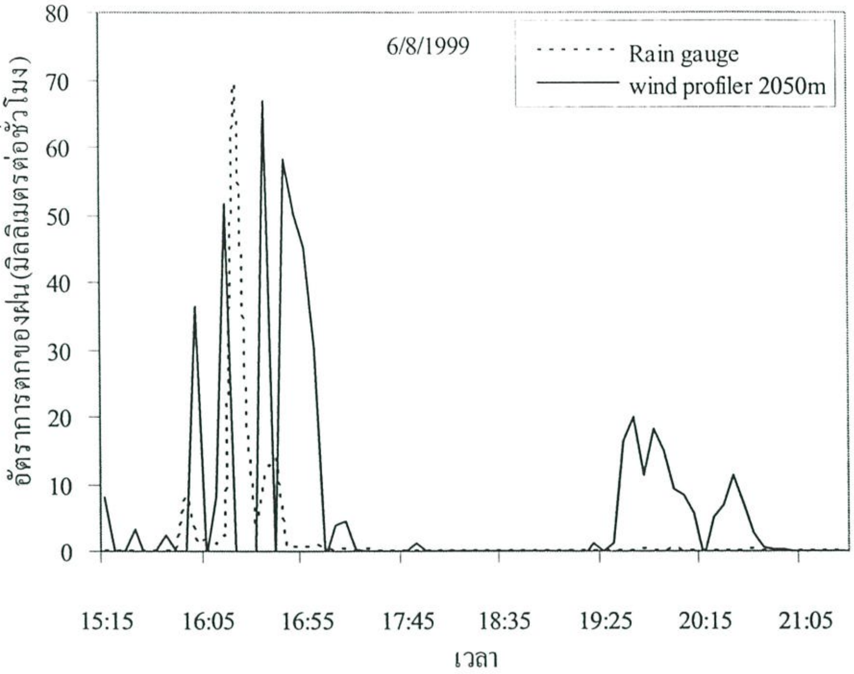
รูปที่ 4.16 ถึง 4.20 เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการตกของฝนในวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2542 โดยการใช้ข้อมูลเฉลี่ย 5 นาทีที่ได้จากการสำรวจของระบบเรดาร์ที่ระดับความสูง 300, 1050, 2025, 3000 และ 4050 เมตร ตามลำดับ ช่ วงเวลาในการตกของฝนจากเครื่องวัดกับที่คำนวณนั้นใกล้เคียงกับค่าที่ 300 เมตรมากที่สุด ช่วง 19:25-20:50 นั้นค่าที่คำนวณได้ที่ความสูงตั้งแต่ 1050 เมตรเป็นต้นไปจะต่างจากค่าที่วัดณ.พื้นดินเนื่องจากความสูงที่ทำการสำรวจ



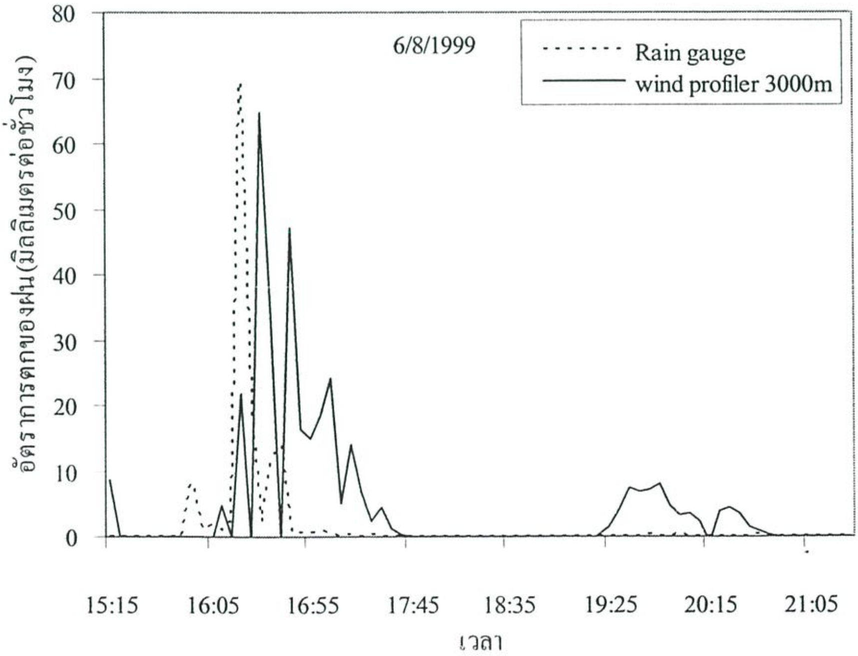
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 300 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2542



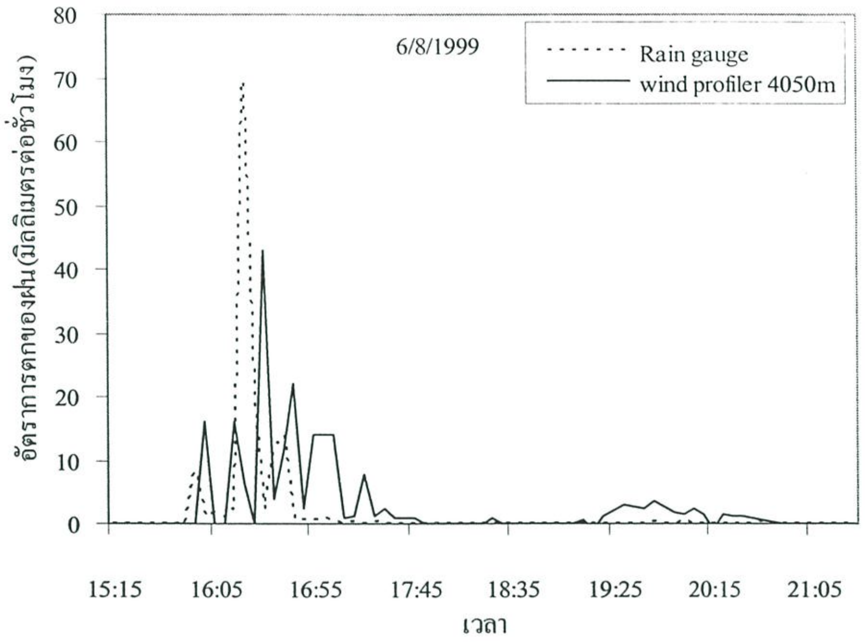
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 1050 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2542



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 2025 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2542



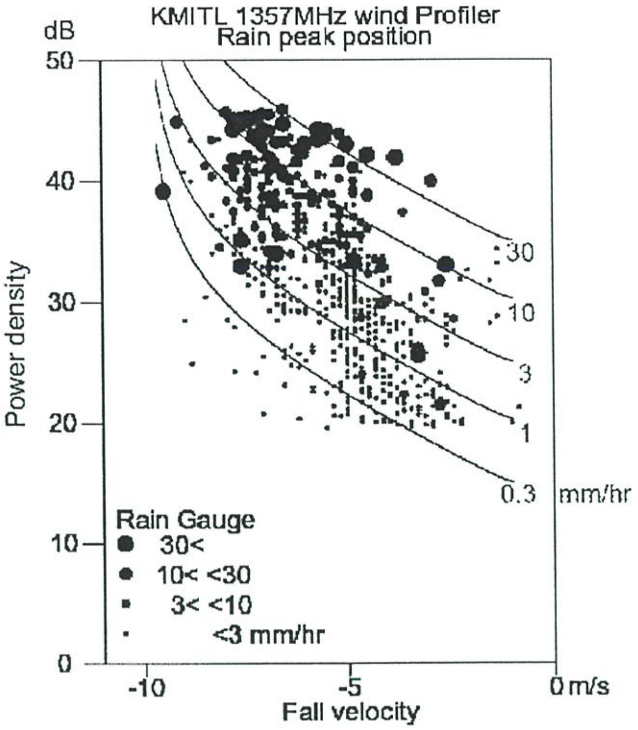
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 3000 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2542



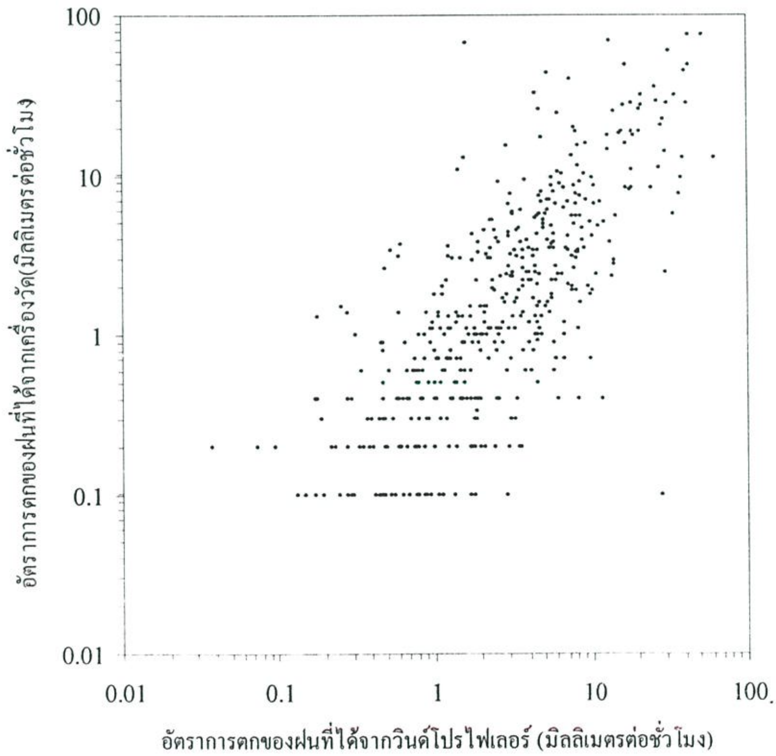
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบค่าอัตราการตกของฝนระหว่างเครื่องวัดอัตราการตกของฝน (Rain Gauge) กับค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Wind Profiler) ที่ระดับความสูง 4050 เมตร จากพื้นดิน ในวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2542

4.4.1.2 เปรียบเทียบค่าที่คำนวณกับค่าที่วัดได้ในช่วง 3 เดือน

รูปที่ 4.21 ถึง 4.25 (ก) เป็นการแสดงการกระจายของตำแหน่งพีคที่เกิดจากการสะท้อนกลับเนื่องจากฝนในดอปเปลอร์สเปกตรัมของช่วงเวลาทั้งหมดของข้อมูลที่นำมาใช้ที่ความสูง 300, 1050, 2025, 3000 และ4050 เมตรตามลำดับ เส้นโค้งแต่ละเส้นแสดงค่าอัตราการตกของฝนที่ 0.3, 1, 3, 10 และ 30 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงซึ่งได้จากการคำนวณหาค่าอัตราการตกของฝนจากสมการข้างต้น ขนาดของจุดวงกลมในรูปแสดงถึงค่าเฉลี่ย 5 นาทีของอัตราการตกของฝนที่วัดได้จากเครื่องวัดที่ติดตั้ง ณ พื้นดิน และรูปที่ 4.21 ถึง 4.25 (ข) เป็นการเปรียบเทียบข้อมูลเพื่อหาค่าสหสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการวัดอัตราการตกของฝนด้วย rain gauge กับข้อมูลที่ได้มาจากการคำนวณที่ความสูง 300, 1050, 2025, 3000 และ4050 เมตรตามลำดับ ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้นั้นเป็นการหาค่าสหสัมพันธ์แบบ cross correlation โดยค่าสหสัมพันธ์นั้นจะเปลี่ยนแปลงค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 ซึ่งค่า 1 แสดงถึงข้อมูลทั้งสองสอดคล้องกันในทิศทางเดียวกันสูงสุด และ ค่า -1 แสดงถึงข้อมูลทั้งสองสอดคล้องกันในทิศทางตรงกันข้ามสูงสุด ที่ระดับความสูง 300,1050,2025,3000 และ4050 เมตร ใช้ข้อมูลจำนวน 1177, 2076, 2136, 2151 และ 2165ชุด มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.62, -0.014, 0.152, 0.152 และ 0.092 ตามลำดับ จากค่าสหสัมพันธ์ที่ได้ในแต่ละระดับความสูง จะเห็นว่า ค่าที่คำนวณจากข้อมูลของระบบเรดาร์ ณ.ระดับความสูง 300 เมตร มีค่าสอดคล้องในทิศทางเดียวกันและใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดอัตราการตกของฝนมากที่สุด



(ก)

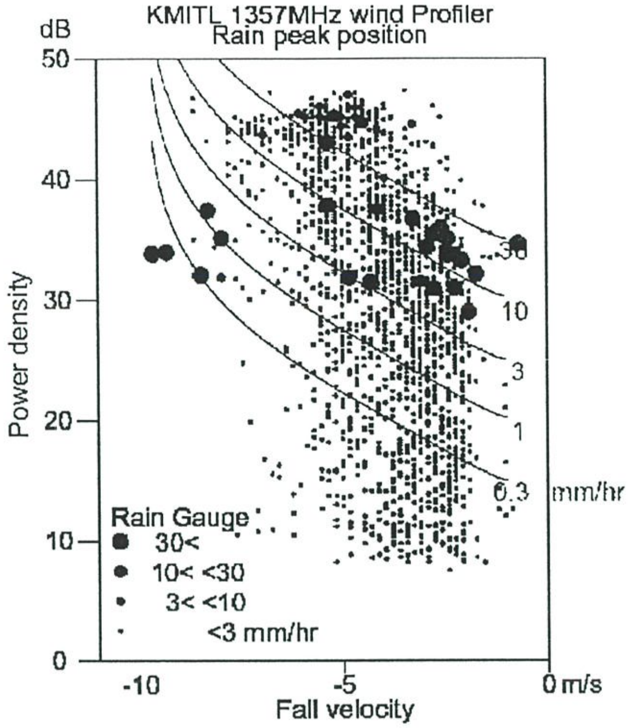


(ข)

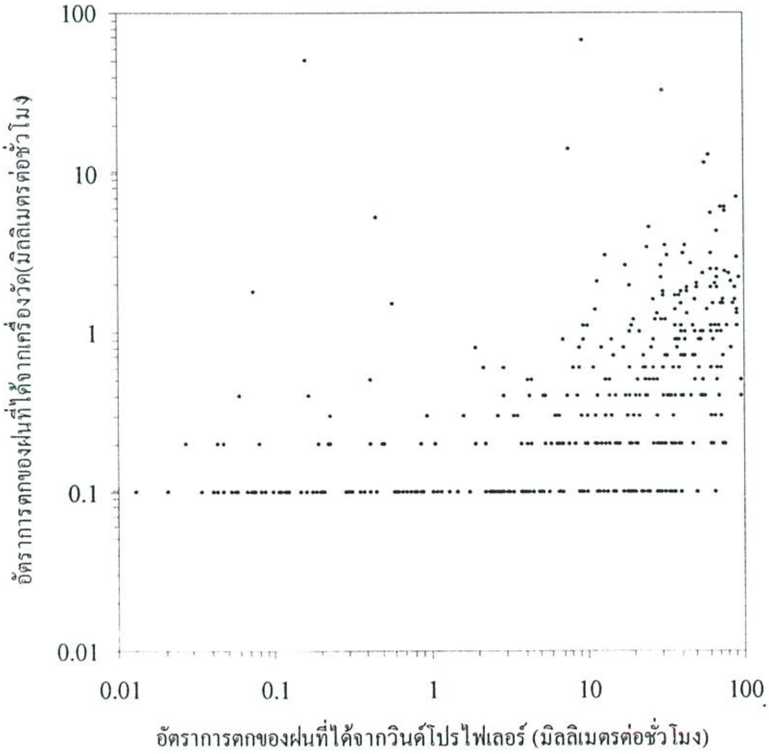
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนกับเครื่องวัดอัตราการตกของฝนที่ความสูง 300 เมตร

(ก) เปรียบเทียบค่าจากการประมาณกับค่าที่บันทึกได้จากเครื่องวัดน้ำฝน

(ข) สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างข้อมูลทั้งสองเท่ากับ 0.62



(ก)

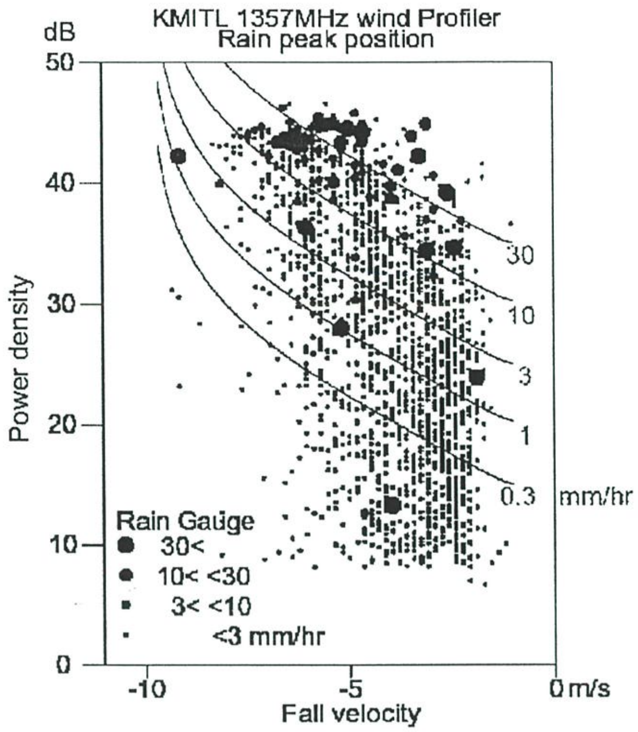


(ข)

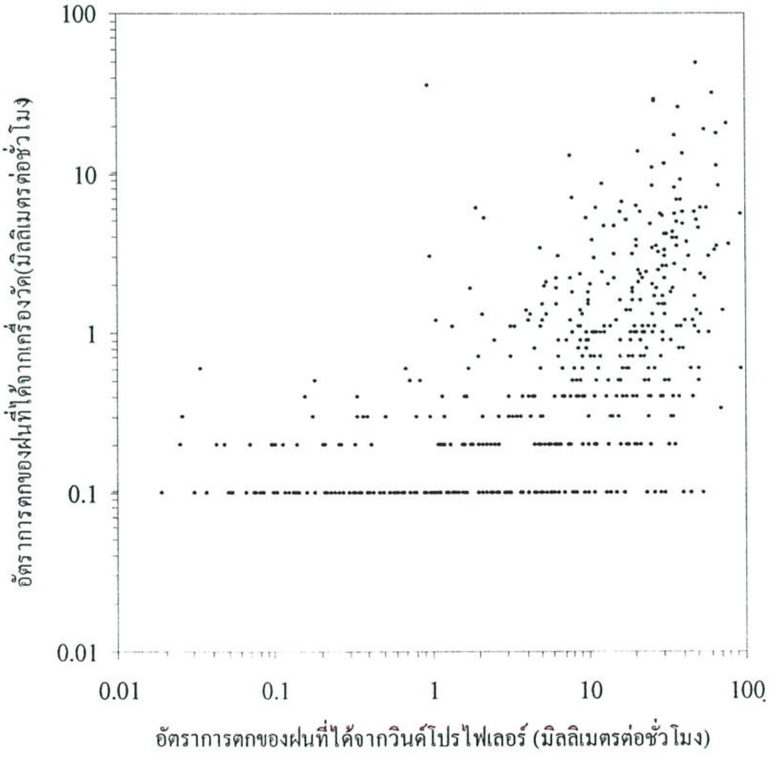
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนกับเครื่องวัดอัตราการตกของฝนที่ความสูง 1050 เมตร

(ก) เปรียบเทียบค่าจากการประมาณกับค่าที่บันทึกได้จากเครื่องวัดน้ำฝน

(ข) สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างข้อมูลทั้งสองเท่ากับ-0.014



(ก)

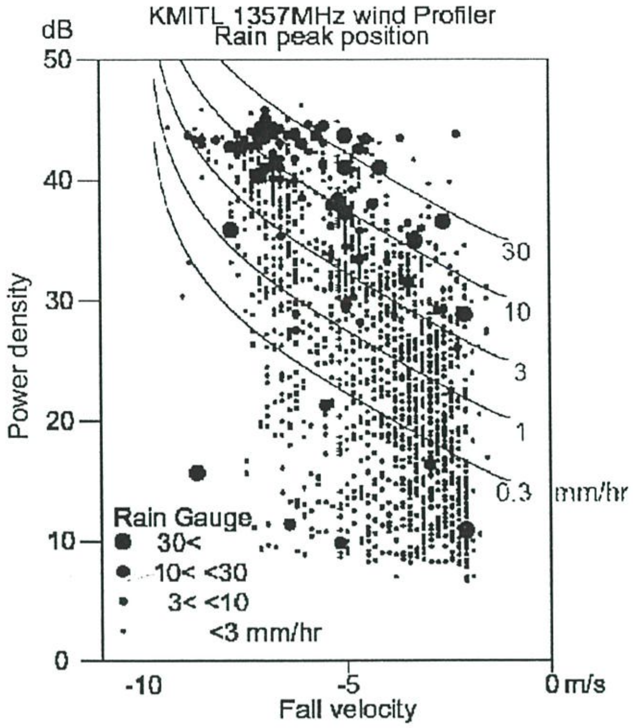


(ข)

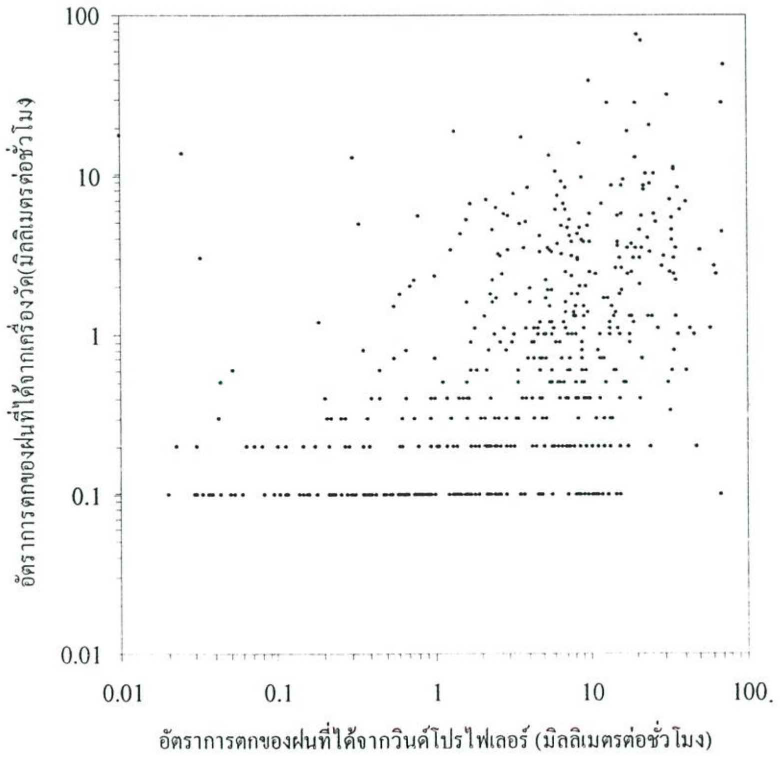
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนกับเครื่องวัดอัตราการตกของฝนที่ความสูง 2025 เมตร

(ก) เปรียบเทียบค่าจากการประมาณกับค่าที่บันทึกได้จากเครื่องวัดน้ำฝน

(ข) สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างข้อมูลทั้งสองเท่ากับ 0.152



(ก)

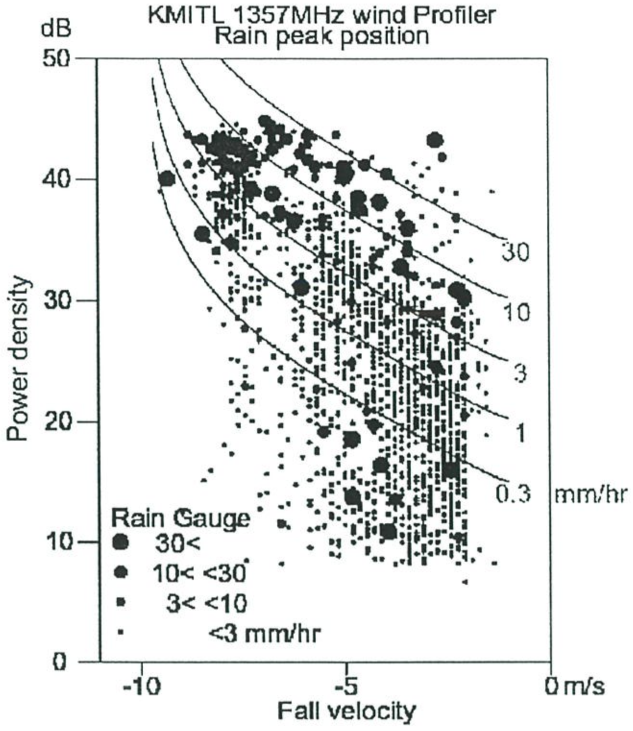


(ข)

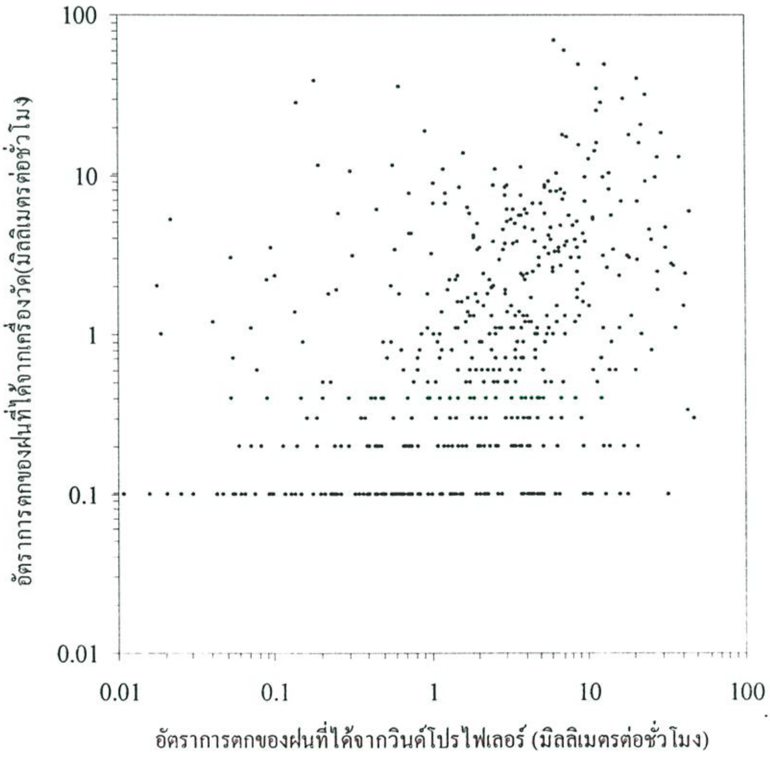
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนกับเครื่องวัดอัตราการตกของฝนที่ความสูง 3000 เมตร

(ก) เปรียบเทียบค่าจากการประมาณกับค่าที่บันทึกได้จากเครื่องวัดน้ำฝน

(ข) สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างข้อมูลทั้งสองเท่ากับ 0.152



(ก)



(ข)

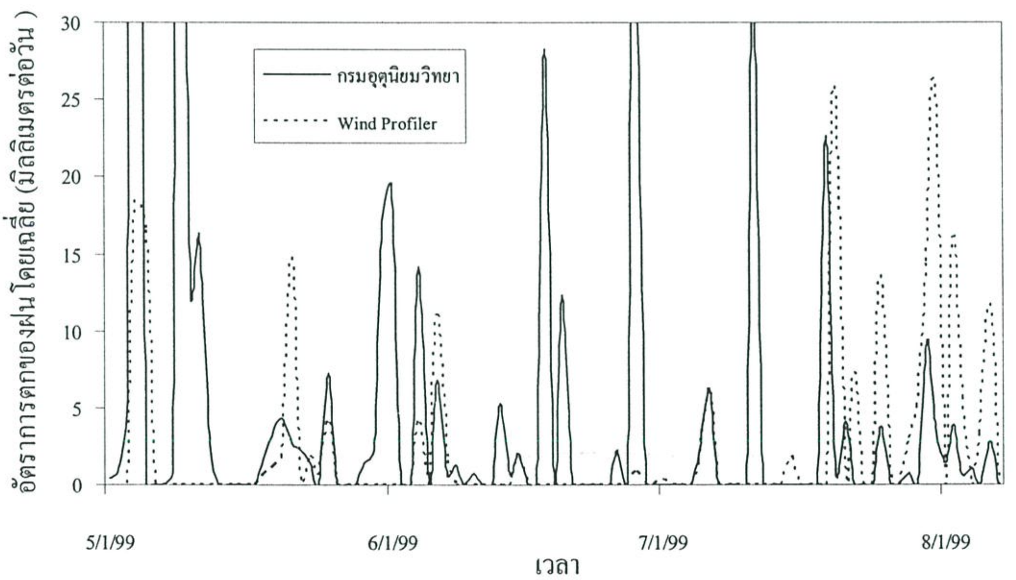
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบอัตราการตกของฝนกับเครื่องวัดอัตราการตกของฝนที่ความสูง 4050 เมตร

(ก) เปรียบเทียบค่าจากการประมาณกับค่าที่บันทึกได้จากเครื่องวัดน้ำฝน

(ข) สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างข้อมูลทั้งสองเท่ากับ 0.092

4.4.1.3 เปรียบเทียบค่าที่คำนวณกับค่าที่วัดได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยาลาดกระบัง

ค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลของระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ เป็นค่าเฉลี่ย 5 นาที และมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงค่าให้อยู่ในรูปมิลลิเมตร และรวมแต่ละช่วงจนครบ 1 วัน เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่บันทึกได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยาลาดกระบัง ซึ่งทำการวัดที่สำนักงานเขตลาดกระบัง อุปกรณ์เป็นถังรับน้ำขนาดปากถัง 20 เซนติเมตรโดยทำการวัดด้วยการใช้ถ้วยตวง 1 ครั้งต่อวัน ค่าที่ได้จึงเป็นมิลลิเมตรต่อวัน ช่วงวันที่ 15-25 พฤษภาคม, 3-9 มิถุนายน, และ 23 กรกฎาคม ถึง 7 สิงหาคม ผลการเปรียบเทียบที่ได้นั้นสอดคล้องและใกล้เคียงกัน ส่วนบางช่วงเช่น 26-28 มิถุนายน นั้นค่าที่ได้แตกต่างกันมากเป็นผลเนื่องมาจากบางช่วงเวลาไม่สามารถคำนวณค่าออกมาได้เนื่องจากดอปเปลอร์สเปกตรัมไม่สามารถแยกแยะพีคที่สะท้อนกลับจากฝนและบรรยากาศได้ชัดเจน ทำให้ค่าที่ได้ไม่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยา



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณโดยwind profiler กับค่าที่วัดได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยาลาดกระบัง

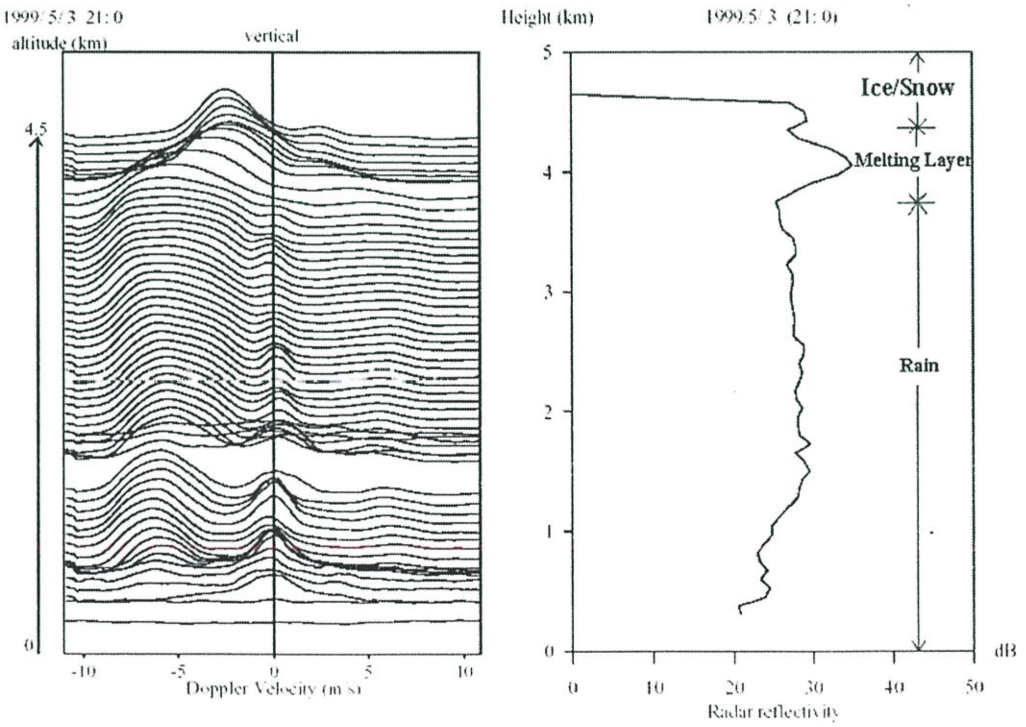
4.4.2 การหาชั้นการหลอมละลายของเมฆฝน

ชั้นการหลอมละลายของเมฆฝน เกิดจากการที่เกล็ดน้ำแข็งและเกล็ดหิมะที่ระดับความสูงเหนือชั้นการหลอมละลายแล้วมารวมตัวกัน ทำให้มีความหนาแน่นของอนุภาคเม็ดฝนเป็นจำนวนมากในบริเวณนี้ เกล็ดน้ำแข็งที่รวมตัวกัน ณ. บริเวณนี้ จะหลอมละลายกลายเป็นหยดน้ำฝนตกลงสู่พื้นดิน โดยในชั้นการหลอมละลายนี้ จะมีผลต่อการสะท้อนของเรดาร์ และมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการตกของฝนด้วย ค่าการสะท้อนของเรดาร์ (Reflectivity factor) สามารถกำหนดได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Z = \int_0^\infty N(D)D^6 dD \tag{4.24}$$

จากสมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาอัตราการตกของฝนข้างต้น สามารถนำมาคำนวณหาค่าการสะท้อนของเรดาร์ได้ ดังสมการ

$$Z = \frac{N_0 \Gamma(\mu + 7)}{\Lambda^{\mu+7}} \tag{4.25}$$



รูปที่ 4.27 เส้นสเปกตรัมแต่ละความสูง (ซ้าย) และค่าการสะท้อนของเรดาร์ (Radar Reflectivity) ที่แต่ละความสูง (ขวา)

รูปที่ 4.27 เป็นการหาชั้นการหลอมละลายของเมฆฝน (Melting Layer) ในวันที่ 3 พฤษภาคม 2542 เวลา 21:00 โดยการคำนวณหาค่าการสะท้อนของเรดาร์ (Radar Reflectivity) ที่ความสูงเหนือ 4 กิโลเมตรขึ้นไปค่าการสะท้อนของเรดาร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสัมพันธ์กับเกล็ดน้ำแข็งที่กำลังตกลงมารวมกลุ่มกันและหลอมละลาย กลายเป็นฝนตกลงสู่พื้นดิน ในช่วงที่กลุ่มฝนหลอมละลายจะสัมพันธ์กับช่วงที่ค่าการสะท้อนนั้นมีค่าสูงสุด ด้านความเร็วดอปเปลอร์ที่ในช่วงที่อยู่สูงกว่า 4 กิโลเมตร นั้นจะมีค่าน้อย แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่เกล็ดน้ำแข็งรวมตัวกันและหลอมละลาย เนื่องจากความเร็วดอปเปลอร์มีความสัมพันธ์กับอนุภาคของฝน

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลของระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศเพื่อประมาณค่าอัตราการตกของฝน ณ.ระดับความสูงต่างๆ และเปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าอัตราการตกของฝนที่วัดได้จากเครื่องวัดอัตราการตกของฝนที่ติดตั้งไว้ ณ.บริเวณพื้นดิน

เดิมทีระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศนั้น ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้สำรวจหาทิศทางและความเร็วของลมที่ระดับความสูงเหนือพื้นโลกตั้งแต่ 150 เมตร จนถึง 4500 เมตร โดยอาศัยหลักการของดอปเปลอร์เรดาร์ ทำการสำรวจในทิศแนวดิ่ง ทิศแนวเหนือและทิศแนวตะวันออก จากนั้นทำการคำนวณหาทิศทางและความเร็วลมในแนวระนาบที่แต่ละความสูง สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลที่สำรวจได้ในแนวดิ่ง มาประยุกต์ใช้งานโดยทำการวิเคราะห์และประมาณค่าอัตราการตกของฝน

ในการประมาณอัตราการตกของฝนนั้น จะทำการวิเคราะห์ดอปเปลอร์สเปกตรัมที่ได้จากการสำรวจ โดยทำการตรวจหาจุดพีคสูงสุดที่สอดคล้องกับการสะท้อนกลับจากฝนและบรรยากาศหรือลมนั่นเอง ซึ่งโดยปกติแล้วในสภาพบรรยากาศที่ไม่มีฝน จะมีเพียงเฉพาะบรรยากาศปกติ ดอปเปลอร์สเปกตรัมที่สำรวจได้จะเกิดพีคที่ชัดเจนเพียงพีคเดียว แต่ในขณะที่มีฝนตกพีคที่เกิดขึ้นบนสเปกตรัมจะมี 2 พีค จากผลการทดลองพบว่า ดอปเปลอร์สเปกตรัมที่สามารถแยกแยะหาพีคทั้ง 2 ได้ชัดเจนแล้วสามารถคำนวณหาค่าอัตราการตกของฝนได้ใกล้เคียงกับค่าที่เครื่องวัดอัตราการตกของฝนที่ติดตั้งอยู่ณ.บริเวณพื้นดินวัดได้ ทั้งนี้ย่อมขึ้นอยู่กับระดับความสูงที่ทำการวิเคราะห์ด้วย สำหรับดอปเปลอร์สเปกตรัมที่ไม่สามารถคำนวณค่าอัตราการตกของฝนได้นั้นจะทำให้ค่าที่ได้ไม่ใกล้เคียงกับเครื่องวัด

ผลการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าที่คำนวณในช่วงเวลา 1 วัน บ่งชี้ให้เห็นว่าระบบเรดาร์นั้นสามารถตรวจหากลุ่มฝนในช่วงเวลาก่อนที่ฝนจะตกลงสู่พื้นดิน โดยสังเกตได้จากผลที่ได้ในช่วงเวลาก่อนที่เครื่องวัดอัตราการตกของฝนณ.พื้นดินจะเริ่มวัดได้ ระบบเรดาร์จะสามารถคำนวณค่าอัตราการตกของฝนออกมาได้ในแต่ละความสูง เนื่องจากระบบเรดาร์สามารถตรวจสอบสภาพบรรยากาศเหนือพื้นผิวโลกได้ ซึ่งนับได้ว่าเป็นข้อดีอย่างหนึ่ง

สำหรับบางช่วงเวลาที่ฝนตกหนักมาก ไม่สามารถคำนวณค่าอัตราการตกของฝนที่ถูกต้องออกมาได้ ทำให้ค่าการเปรียบเทียบแตกต่างกัน เนื่องจากข้อจำกัดของระบบเรดาร์ที่ไม่สามารถแปลงข้อมูลให้ดอปเปลอร์สเปกตรัมมีข้อมูลที่แสดงพีคที่เกิดจากการสะท้อนกลับจากฝนและบรรยากาศที่ชัดเจนได้

สำหรับช่วงเวลาที่ฝนตกลงมานั้น ค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการวัดจะเกิดขึ้นสอดคล้องกัน และจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 300 เมตร จะใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ ณ พื้นดินมากที่สุด เนื่องจากเป็นระดับความสูงที่ใกล้กับพื้นดินมากที่สุด ส่วนที่ความสูงอื่นนั้น ค่าที่ได้มักจะสูงกว่าที่วัดได้ เนื่องจากระดับความสูงที่แตกต่างกัน ย่อมมีสภาพบรรยากาศที่ไม่เหมือนกัน

เมื่อนำข้อมูลที่ทำการคำนวณมาใช้มากขึ้น นั่นคือ จำนวนวันมากขึ้นเป็น 3 เดือน เพื่อดูความสอดคล้องของข้อมูลทั้งสอง โดยใช้การหาค่าสหสัมพันธ์ จากผลที่ได้ปรากฏว่า ค่าที่คำนวณได้ที่ระดับความสูง 300 เมตรนั้นสอดคล้องกับค่าที่วัดได้มากที่สุด โดยได้ค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.62 ซึ่งมากกว่าที่ระดับความสูงอื่น

ในการเปรียบเทียบข้อมูลกับสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ลาดกระบัง ซึ่งทางสถานีทำการวัดเป็นค่าอัตราการตกของฝนเป็นมิลลิเมตรต่อวัน แต่ค่าที่ได้จากการคำนวณเป็นมิลลิเมตรต่อชั่วโมงในทุกๆ 5 นาที ดังนั้นต้องทำการแปลงให้เป็นมิลลิเมตรต่อวันเช่นกัน ดังนั้นบางช่วงที่ดอปเปลอร์สเปกตรัมสามารถแยกแยะพีคได้ชัดเจน ค่าที่ได้จะสอดคล้องกับค่าที่วัดได้ สำหรับบางช่วงที่ดอปเปลอร์สเปกตรัมไม่ชัดเจนจะมีผลทำให้ค่าที่ได้ต่างกันมาก

จากข้อมูลของระบบเรดาร์ สามารถตรวจหาชั้นการหลอมละลายของเมฆฝนได้ โดยอาศัยความเร็วดอปเปลอร์ที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงก่อนหน้าชั้นการหลอมละลาย ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนของเรดาร์(Radar Reflectivity) โดยชั้นการหลอมละลายของเมฆฝนจะมีผลต่อค่าการสะท้อนของเรดาร์เป็นอย่างมาก ดังในผลการทดลอง ชั้นการหลอมละลายอยู่ที่ประมาณ 4 กิโลเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

ค่าอัตราการตกของฝนที่คำนวณได้จากข้อมูลสเปกตรัมของระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ ณ.ความสูงต่างๆ และชั้นการหลอมละลายของเมฆฝนที่สามารถหาได้จากข้อมูลชุดเดียวกัน สามารถนำไปวิเคราะห์ร่วมกับการศึกษาในเรื่องของผลกระทบของระบบสื่อสารดาวเทียมเนื่องจากฝน ซึ่งปัจจุบันใช้ข้อมูลอัตราการตกของฝนที่บันทึกได้จากเครื่องวัดอัตราการตกของฝนที่ติดตั้ง ณ.ระดับพื้นดินเพียงอย่างเดียว

ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการวิเคราะห์ข้อมูลของระบบเรดาร์เพื่อประมาณอัตราการตกของฝนแล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดอัตราการตกของฝนที่ติดตั้งณ.พื้นดิน สำหรับแนวทางในการพัฒนาต่อไป สามารถนำไปวิเคราะห์ร่วมกับทิศทางและความเร็วของลมเพื่อศึกษาถึงการเคลื่อนตัวของกลุ่มเมฆฝน

เอกสารอ้างอิง

[1] J.S. Marshall and W.M. Palmer, “The distributions of raindrop”, J.Meteor., vol.5, pp.165-166, 1948.

[2] M.I. Skolnik, “Introduction to Radar Systems”, McGraw – Hill, 2001.

[3] B. Edde, “RADAR Principle, Technology, Applications”, Prentice – Hall, 1993.

[4] S. Kingsley and Q. Shaun, “Understanding Radar Systems”, Singapore, McGraw – Hill, 1993.

[5] S.F. Clifford, J.C. Kaimal, R.J. Lataitis and R.G. Strauch, “Ground – based remote profiling in Atmospheric Studies: An overview”, Proc. IEEE, vol.82, no.3, pp.313 – 355, 1994.

[6] ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี ปัญญา ฐิติมัชฌิมา และพรพรรณ์ ดุลยกาญจน์, “ การใช้วิธีพีคเพาเวอร์ประมาณความเร็วลมในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ”,การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20, หน้า 649-652, 13 – 14 พฤศจิกายน 2540.

[7] K. Wakasugi, A. Mizutani, M. Matauo, S. Fukao and S. Kato, “A direct method for deriving drop-size distribution and vertical air velocities from VHF Doppler radar spectra”, J. Atmos. Oceanic, Technol., vol.3, pp. 623-639, 1986.

[8] D. Atlas, R.C. Srivastara and R.S. Sekhon, “Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence”, Rev. Geophys. Space Phys., vol.11, pp. 1-35, 1973.

[9] Y. Ohno, C. Williams, K. Gage and T. Kozu, “Rain Rate Estimation using Wind Profiler Measurement”, Proc. URSI, Commission F, Sym. on Climate Parameters on Radio wave Propagation Prediction, Ottawa, Canada, pp. 140-143, 27-29 April 1998.

[10] R.J. Doviak and D.S. Zrnic, “Doppler Radar and Weather Observations”, Academic Press, 1984.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การคำนวณหาค่า ความหนาแน่น $\left(\dfrac{\rho}{\rho_0}\right)$

จาก สมการของสภาวะ (Equation of state)

$$P = \rho RT \qquad (ก.1)$$

และ สมการ ไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Equation)

$$-\rho g = \frac{dP}{dZ} = \frac{d\rho RT}{dZ} \qquad (ก.2)$$

จากสมการ ก.1 และ ก.2 สามารถหาค่าความหนาแน่นได้โดยทำการอินทีเกรตทั้งสองข้าง จะได้

$$e^{\frac{-g}{RT}Z_1} = \frac{\rho}{\rho_0} \qquad (ก.3)$$

ภาคผนวก ข.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. **C. Somboonlarp**, N. Leelaruji, N.Hemmakorn, A.Manyanon, Y.Ohno, "Lower Atmospheric Observation using Wind profiler at KMITL", Proceeding of Thailand – Japan Joint Symposium on Microwaves 1999, Pattaya, Thailand, September 21 – 22, pp. 145-151,1998.
2. **C. Somboonlarp**, N. Leelaruji, N.Hemmakorn, A.Manyanon, Y.Ohno, "Rain rate estimation by simplified method using UHF wind profiler measurement at KMITL", SPIE's Second International Asia – Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmospheric, Environment, and Space, Sendai, Japan, October 9-12, pp. 73 – 80, 2000.
3. N. Leelaruji, **C. Somboonlarp**, P. Sangonchart, N.Hemmakorn, A.Manyanon, Y.Ohno, "Lower Atmospheric wind observation by L – band Doppler radar in Thailand", SPIE's Second International Asia – Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space, Sendai, Japan, October 9-12, pp. 81 – 88, 2000.
4. กิตติชัย วิเศษศิริ, **ชัยวัฒน์ สมบูรณ์ลาภ**, นิภา ลีลารุจิ, ณรงค์ เหมกรณ์, "การประมาณอัตราการตกของฝนด้วย Wind Profiler ในย่านความถี่ UHF", วิศวสารลาดกระบัง, หน้า 47 – 52, มีนาคม 2545.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นาย ชัยวัฒน์ สมบูรณ์ลาภ
วัน เดือน ปี เกิด	18 กันยายน 2518
ที่อยู่ที่ติดต่อได้	1532 ม.3 ซ. กม.30 ถ.สุขุมวิท ต.ท้ายบ้านใหม่ อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10280
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2540
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์