การวิเคราะห์ข้อมูลของระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ

DATA ANALYSIS OF LOWER ATMOSPHERE OBSERVATION RADAR

T030950

พรพรรณ์ ดุลยกาญจน์

PORNPHAN DULYAKARN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2541

ISBN 974-622-149-3

เลขหมู่.....................

เลขทะเบียน 30950

วัน, เดือน, ปี 4 ก.ย. 2541

...สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DATA ANALYSIS OF LOWER ATMOSPHERE OBSERVATION RADAR

PORNPHAN DULYAKARN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY
LADKRABANG
1998

ISBN 974-622-149-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 1998

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ข้อมูลของระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ
นักศึกษา	นางสาวพรพรรณ์ ดุลยกาญจน์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2541

บทคัดย่อ

ระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศที่ติดตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-ลาดกระบัง ถูกออกแบบมาเพื่อใช้วัดความเร็วและทิศทางของลมในระดับล่าง เรียกว่า วินด์-โปรไฟล์เลอร์ ประกอบด้วยบีมของดอปเปลอร์เรดาร์จำนวน 3 บีม สามารถวัดความถี่ดอปเปลอร์จากสัญญาณสะท้อนของอนุภาคในบรรยากาศได้จนถึงที่ระยะความสูงประมาณ 4 กิโลเมตร โดยเพิ่มระยะในการวัดสัญญาณทุกๆ 75 เมตร ด้วยระยะเวลาในการวัดอย่างต่อเนื่องทุก 5 นาที ซึ่งข้อมูลแต่ละชุดประกอบด้วยข้อมูลย่อยจำนวน 3 ชุดที่ระดับความสูงในการวัด 60 ระดับ และแต่ละระดับจะประกอบด้วยจำนวนค่าของการแปลงฟาสท์ฟูเรียร์จำนวน 128 จุด

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมเพื่อใช้ในการคำนวณข้อมูลของลมที่บันทึกได้ในแต่ละวันจากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศที่ติดตั้งในบริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อัลกอริทึมประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการตรวจหาสัญญาณสะท้อนของอนุภาคในบรรยากาศ และ ขั้นตอนการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้ ขั้นตอนแรกจะทำการแสดงข้อมูลทุก 5 นาที เทคนิคที่ใช้เรียกว่าวิธีพีคเพาเวอร์ซึ่งสัญญาณสะท้อนในบรรยากาศจะถูกพิจารณาจากค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณที่สะท้อนกลับในแต่ละเส้นสเปคตรัมของสัญญาณจำนวน 128 จุด จะเลือกเอาจุดที่ให้ขนาดสูงที่สุดซึ่งสอดคล้องกับความถี่ดอปเปลอร์ และทำการเก็บข้อมูลไว้ ซึ่งในแต่ละครั้งที่ทำการสังเกตจะได้ข้อมูลจำนวน 3 x 60 ค่า ในขั้นตอนที่สองจะหาค่าเฉลี่ยข้อมูลลมทุก 1 ชั่วโมง โดยนำข้อมูลที่เลือกในขั้นตอนแรกมาหาค่าเฉลี่ยจุดต่อจุดเทียบกับเวลา บางครั้งข้อมูลที่สังเกตก็เกิดความผิดพลาดในบางค่า จึงใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัสเพื่อเลือกข้อมูลเฉพาะที่จัดอยู่ในกลุ่มเดียวกันมาหาค่าเฉลี่ยของความถี่ดอปเปลอร์จากสัญญาณสะท้อนในแนวบีมเรดาร์ทั้ง 3 บีม ที่ระดับความสูงเดียวกันเทียบกับเวลาที่พิจารณาจะได้เวกเตอร์ของลมในสามมิติ สุดท้ายจะแสดงโปรไฟล์ของลมในแนวระนาบของข้อมูลลมใน 1 เดือน โดยหาค่าเฉลี่ยใน 1 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Data Analysis of Lower Atmosphere Observation Radar
Student	Miss Pornphan Dulyakarn
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Yuttapong Rangsanseri
Degree	Master of Engineering in Electrical Engineering
Year	1998

ABSTRACT

The Lower Atmosphere Observation Radar (LAOR) installed at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) is a 3-beam Doppler radar, designed for wind measurements. The system, also called Windprofiler, can measure Doppler shifts of atmospheric echoes up to about 4 km above the site, with the resolution of 75 meters in height. The measurement is performed on a continuous basis every 5 minutes. Each raw data set consists of 3 sets of 60 range-gated spectra each of which comprises 128 FFT-points.

This research presents the algorithm used in KMITL's Windprofiler for calculating daily wind profile from such data. This algorithm consists of two stages : atmospheric echo detection and data averaging. The first stage is performed every 5 minutes, immediately after data received. The used technique is called Peak-Power method where the atmospheric echo is represented by the peak power in returned signal. For each 128-point spectrum, the point with the highest magnitude is located and the corresponding Doppler shift frequency is then selected and stored. The resulting data contains 3 x 60 numbers from each observation. The second stage will be averaged once at the end of every hour. The previous selected data are read back and averaged point by point across the time. Some noticeable error can be found occasionally on few values. The consensus average technique is used where only those data having small error are taken into account. The result of this stage represents in desirable averaged time Doppler shift frequencies of atmospheric echoes from equal-spacing altitudes, observed by 3-beam radar. From this, 3-dimensional wind vectors can be directly derived. Finally, a plotted profile of horizontal wind in month by averaging data in one day is illustrated.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี เพราะได้รับการช่วยเหลือ ให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และข้อมูลในการทำวิจัย ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิด จาก ผศ.ดร.ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้ความรัก ความเข้าใจ ความเอาใจใส่ และให้โอกาสแก่ผู้เขียนตลอดมา ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อบุญชู คุณแม่อัมพรรณ์ ดุลยกาญจน์ ที่ให้ความรักที่บริสุทธิ์ ความอบอุ่น ความห่วงใย ให้โอกาสและให้ทุกสิ่งทุกอย่างที่ดีที่สุดแก่ลูก ทำให้ผู้เขียนมีกำลังใจสามารถต่อสู้กับปัญหาและอุปสรรคต่างๆ จนมีทุกวันนี้ ขอบคุณพี่สมบูรณ์ ดุลยกาญจน์ ที่ให้ความรัก กำลังใจ ความห่วงใยและคอยใส่ใจให้คำปรึกษาและช่วยเหลือน้องคนนี้ตลอดมา

กราบขอบพระคุณ รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ ดร.ปัญญา ฐิติมัชฌิมา รศ.สมยศ จุณณะปิยะ รศ.ดร.ฟูศักดิ์ ชีวสุวิทย์ ผศ.อภินันท์ มัณยานนท์ ที่ให้ความเมตตากรุณาช่วยเหลือทางการศึกษา และทุกๆ ด้าน ตลอดจนอาจารย์ทุกๆ ท่านในภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม และครู อาจารย์ทุกท่าน ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้เขียน

กราบขอบพระคุณท่านคณะกรรมการทุกท่าน

กราบขอบพระคุณ คุณป้าชื่นจิต คุณลุงสุนทร เอกญาติ ตลอดจนญาติพี่น้องคนอื่นๆ ที่มิได้กล่าวนาม ที่ให้กำลังใจ ความห่วงใย และเมตตา

กราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์ อ.วิภา แสงพิสิทธิ์ อ.อนุวัฒน์ จางวณิชเลิศ ประธานและที่ปรึกษาชมรมพุทธศาสตร์และประเพณี และ อ.ประสาร ตังติสานนท์ รุ่นพี่ที่ให้คำแนะนำที่ดี

ขอขอบพระคุณสมาคมคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร ที่มองเห็นความสำคัญทางการศึกษา และให้ทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัยเป็นระยะเวลา 2 ปีเต็ม ขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์ และอำนวยความสะดวกในการติดต่อทางด้านการศึกษา

สุดท้าย ขอขอบคุณ คุณ William H. Luker พี่อาโมทย์ พี่สักรียา เอ พี่นัทที พี่อัมพล พี่พจศักดิ์ พี่พิพัฒน์ พี่อู๊ด วริมา พี่จุก พี่เอก (ศุภชัย) รุ่นที่ 27 พี่หนิง พี่ปู วรรณ พี่แดน พี่แฟรงค์ พี่จ้อน คุณพันธมิตร คุณบรรจง และพี่ๆ เพื่อนๆ อีกหลายคนที่มิอาจจะกล่าวชื่อได้หมด ที่คอยให้คำแนะนำช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ ด้วยความเข้าใจ และจริงใจ

พรพรรณ์ ดุลยกาญจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 หลักการทั่วไปของระบบเรดาร์	4
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของเรดาร์	4
2.1.1 หลักการทำงาน	4
2.1.2 การนำเอาเรดาร์ไปประยุกต์ใช้งาน	6
2.1.3 การจำแนกชนิดของเรดาร์	6
2.1.4 ย่านความถี่ของเรดาร์	9
2.1.5 สมการเรดาร์	11
2.1.6 การเข้ารหัสส่งคลื่น	15
2.2 การใช้เรดาร์วัดข้อมูลในบรรยากาศ	19
2.2.1 การจำแนกชั้นบรรยากาศ	20
2.2.2 ระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ	22
2.2.3 การประมวลผลสัญญาณ	23
2.3 สรุป	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การใช้เรดาร์วัดความเร็วและทิศทางของลมในบรรยากาศ 27

3.1 หลักการของวินด์โปรไฟเลอร์ 27

3.2 ตัวอย่างของวินด์โปรไฟเลอร์ 30

3.2.1 MU radar 30

3.2.2 RASC Boundary Layer Radar 32

3.2.3 NOAA Profiler Network (NPN) 33

3.2.4 MST radar 34

3.3 วินด์โปรไฟเลอร์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 35

3.3.1 คุณลักษณะทั่วไป 35

3.3.2 รายละเอียดทางเทคนิค 37

3.3.3 ข้อมูลที่บันทึกโดยระบบ 39

3.4 สรุป 41

บทที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง 42

4.1 การคำนวณหาเวกเตอร์ของลม 42

4.1.1 การคำนวณความเร็วในแนวบีมโดยวิธีพีคเพาเวอร์ 45

4.1.2 ผลการทดลอง 48

4.2 การเฉลี่ยข้อมูลภายในคาบเวลา 50

4.2.1 การคำนวณค่าเฉลี่ยเลขคณิต 51

4.2.2 การคำนวณค่าเฉลี่ยแบบคอนเซนซัส 51

4.2.3 ผลการทดลอง 56

4.3 สรุป 62

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 63

บรรณานุกรม 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	67
ภาคผนวก ก. ฟอร์แมตของไฟล์ข้อมูลที่บันทึกได้จากระบบเรดาร์	68
ภาคผนวก ข. ฟอร์แมตของไฟล์ข้อมูลที่ทำการบันทึกใหม่จากไฟล์ข้อมูลของระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศใน 1 วัน	69
ภาคผนวก ค. ฟอร์แมตของไฟล์ข้อมูลที่ทำการบันทึกใหม่จากไฟล์ข้อมูลของระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศใน 1 เดือน	70
ประวัติผู้เขียน	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ชื่อและช่วงความถี่ที่เรดาร์ใช้งานและช่วงความถี่ที่ ITU (International Telecommunication Union) กำหนดให้ใช้กับเรดาร์ 10

2.2 ข้อแตกต่างของเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศและเรดาร์สำรวจอากาศ 19

3.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของวินด์โปรไฟเลอร์ 29

3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบ MU radar 30

3.3 คุณลักษณะที่ใช้ใน RASC Boundary Layer Radar ที่ติดตั้งที่อินโดนีเซีย 33

3.4 คุณลักษณะที่ใช้ในวินด์โปรไฟเลอร์ของ NOAA Profiler Network (NPN) 34

3.5 คุณสมบัติของ MST radar 35

3.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวินด์โปรไฟเลอร์ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 39

4.1 ผลการทดลองของข้อมูลที่บันทึกจากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2541 เวลา 00.00-00.05 น. 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

1.1 ระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศที่ติดตั้ง ณ บริเวณอาคารสมเด็จพระเทพฯ ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2

2.1 Primary radar และ secondary radar 7

2.2 Monostatic radar 8

2.3 Bistatic radar 8

2.4 ความถี่ที่เรดาร์ใช้งานและสเปคตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 9

2.5 ระยะทางและบีมที่ใช้หาค่า Power density 12

2.6 ค่า RCS ของวัตถุขึ้นอยู่กับรูปร่างและทิศทาง 14

2.7 แผนภาพการส่งพัลส์เรดาร์เทียบเวลากับความสูง 16

2.8 (ก) วัตถุเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับบีมของเรดาร์ 18

(ข) วัตถุเคลื่อนที่ต่างทิศทางกับบีมของเรดาร์ 18

2.9 ชั้นบรรยากาศจำแนกตามระดับความสูงที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ 21

2.10 บล๊อคไดอะแกรมขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลของเรดาร์สำรวจบรรยากาศ .. 23

2.11 การวัดระยะทางของเรดาร์ 24

2.12 พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาการประมวลผลสัญญาณเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ 26

3.1 ตัวอย่างของวินด์โปรไฟเลอร์ที่ใช้บีม 3 บีม 29

3.2 แผนภาพการประมวลผลสัญญาณสะท้อนที่เข้ามายังสายอากาศรับสัญญาณ 30

3.3 สายอากาศของ MU radar 32

3.4 RASC Boundary Layer Radar ที่ติดตั้งที่ประเทศอินโดนีเซีย 33

3.5 MST radar ที่ประเทศอินเดีย 35

3.6 การวัดความเร็วลมด้วยบีมเรดาร์จำนวน 3 บีม 36

3.7 ตัวอย่างของข้อมูลที่บันทึกจากวินด์โปรไฟเลอร์จำนวน 1 ชุด 40

4.1 องค์ประกอบที่ใช้พิจารณาความเร็วลมโดยใช้วิธี Velocity-Azimuth Display (VAD) 44

4.2 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานโดยใช้วิธีพีคเพาเวอร์ 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานโดยใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัส 55

4.4 โปรไฟล์ของลมในระนาบทิศเหนือ-ตะวันออกของข้อมูลที่บันทึกด้วย
ระบบเรดาร์สำรวจบรรยากาศของเดือน เมษายน 2540
ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัส ทุก 1 ชั่วโมง แล้วแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของลม
โดยหาค่าเฉลี่ยของลมใน 1 วัน 57

4.5 โปรไฟล์ของลมในระนาบทิศเหนือ-ตะวันออกของข้อมูลที่บันทึกด้วย
ระบบเรดาร์สำรวจบรรยากาศของเดือน พฤษภาคม 2540
ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัส ทุก 1 ชั่วโมง แล้วแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของลม
โดยหาค่าเฉลี่ยของลมใน 1 วัน 58

4.6 โปรไฟล์ของลมในระนาบทิศเหนือ-ตะวันออกของข้อมูลที่บันทึกด้วย
ระบบเรดาร์สำรวจบรรยากาศของเดือน มิถุนายน 2540
ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัส ทุก 1 ชั่วโมง แล้วแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของลม
โดยหาค่าเฉลี่ยของลมใน 1 วัน 59

4.7 โปรไฟล์ของลมในระนาบทิศเหนือ-ตะวันออกของข้อมูลที่บันทึกด้วย
ระบบเรดาร์สำรวจบรรยากาศของวันที่ 21 มิถุนายน 2540 โดยแสดงผล
การเปลี่ยนแปลงของลมทุกๆ ครึ่งชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 12.00-14.30 น.
ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต 60

4.8 โปรไฟล์ของลมในระนาบทิศเหนือ-ตะวันออกของข้อมูลที่บันทึกด้วย
ระบบเรดาร์สำรวจบรรยากาศของวันที่ 21 มิถุนายน 2540 โดยแสดงผล
การเปลี่ยนแปลงของลมทุกๆ ครึ่งชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 12.00-14.30 น.
ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัส 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

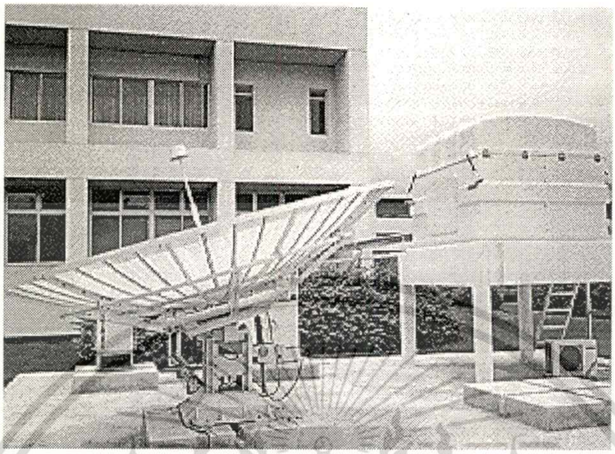
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การศึกษาสภาพแวดล้อมในชั้นบรรยากาศ จำเป็นจะต้องทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาศึกษาและวิเคราะห์ ซึ่งโดยทั่วไปเรามักทำการศึกษาเกี่ยวกับ อุณหภูมิ ความชื้น ฝุ่นละออง ความเร็วและทิศทางของลม เป็นต้น ข้อมูลดังกล่าวจำเป็นจะต้องทำการเก็บบันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงๆ โดยต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องที่สุด ในงานวิจัยนี้เราทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของลมโดยใช้ข้อมูลที่บันทึกได้จากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศที่ติดตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้รับความช่วยเหลือจากรัฐบาลญี่ปุ่น โดย CRL (Communication Research Laboratory) ของกระทรวงไปรษณีย์และโทรคมนาคม (Ministry of Posts and Telecommunications) ได้ทำการติดตั้งระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ หรือเรียกว่า LAOR (Lower Atmosphere Observation Radar) ไว้ที่บริเวณอาคารสมเด็จพระเทพฯ ของสถาบันฯ ตั้งแต่เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2537 ทั้งนี้เพื่อประโยชน์สำหรับการศึกษาและวิจัย ระบบดังกล่าวแสดงในรูปที่ 1.1 ประกอบด้วยจานรับ-ส่งสัญญาณแบบพาราโบลาร์ทำการวัดสัญญาณดอปเปอร์จากอนุภาคในบรรยากาศ อุปกรณ์ RASS (Radio Acoustic Sounding System) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิโดยใช้เครื่องกำเนิดเสียงทำงานควบคู่ไปกับการส่งสัญญาณไมโครเวฟของระบบเรดาร์จะใช้ในกรณีที่ต้องการศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิ และเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของระบบ บันทึกข้อมูลจากสัญญาณสะท้อนในบรรยากาศ และทำการประมวลผลของข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1.1 ระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศที่ติดตั้ง ณ บริเวณอาคารสมเด็จพระเทพฯ ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ระบบเรดาร์นี้ได้ถูกออกแบบสำหรับการวัดความเร็วและทิศทางของลมเป็นหลัก จึงนิยมเรียกระบบนี้ว่า วินด์โปรไฟเลอร์ (Windprofiler)

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การวัดข้อมูลในชั้นบรรยากาศแต่เดิมนิยมใช้วิธี Radiosonde ซึ่งเป็นการปล่อยบอลลูนให้ลอยไปในท้องฟ้า โดยมีอุปกรณ์เซนเซอร์ชนิดต่างๆ ผูกติดไปกับบอลลูนด้วย เซนเซอร์จะวัดข้อมูลที่ต้องการแล้วส่งข้อมูลดังกล่าวกลับมายังเครื่องรับ แต่ในการเก็บข้อมูลด้วยวิธีนี้จะสามารถวัดและเก็บข้อมูลได้เฉพาะช่วงเวลาที่บอลลูนลอยอยู่เท่านั้น และถ้าหากพิจารณาเรื่องการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายส่วนหนึ่งในการส่งบอลลูน คือ ต้องใช้คนจำนวนมากเพื่อทำการปล่อยบอลลูน ในอีกกรณีหนึ่ง คือ ไม่สามารถควบคุมหรือบังคับให้บอลลูนตกในสถานที่ที่ต้องการ หรือกำหนดไว้ได้

สำหรับระบบเรดาร์ สามารถทำการวัดข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องโดยอัตโนมัติ ดังนั้นเราจึงได้นำเอาข้อมูลที่บันทึกได้จากวินด์โปรไฟเลอร์มาทำการวิเคราะห์ และประมวลผล เนื่องจากข้อมูลที่ได้ยังไม่สามารถใช้สังเกตการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความเร็วลมได้ในทันที หากแต่ต้องหาวิธีที่เหมาะสมมาคำนวณข้อมูลก่อนแล้วจึงสามารถนำไปแสดงเป็นโปรไฟล์ของลม เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความเร็วของลมที่ต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยข้อมูลที่บันทึกด้วยระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ เราทำการประมวลผลข้อมูลเรดาร์เพื่อคำนวณหาค่าความเร็ว และทิศทางของลม แล้วนำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยใน ครึ่งชั่วโมง และ 1 ชั่วโมง เพื่อใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลลม แล้วแสดงการเปลี่ยนแปลงของลม โดยพล๊อตเป็นโปรไฟล์ของลม (Wind profile) ในทุกๆ ครึ่งชั่วโมง หรือ 1 ชั่วโมง ภายใน 1 วัน และ 1 เดือน โดยใช้วิธีการประมาณค่าความเร็วลมด้วยวิธีพีคเพาเวอร์ และวิธีคอนเซนซัส เปรียบเทียบผลการประมาณค่าความเร็วลมและทิศทางของลมด้วยวิธีพีคเพาเวอร์กับวิธีคอนเซนซัส

1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

สำหรับในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมดจำนวน 5 บท โดยกล่าวถึงรายละเอียดในเรื่องดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงหัวข้อ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เรดาร์กับการวัดข้อมูลในบรรยากาศ กล่าวถึงหัวข้อเกี่ยวกับ ทฤษฎีเบื้องต้นของเรดาร์ การใช้เรดาร์วัดข้อมูลในบรรยากาศ และสรุป

บทที่ 3 การใช้เรดาร์วัดความเร็วและทิศทางของลมในบรรยากาศ กล่าวถึงหัวข้อเกี่ยวกับหลักการของวินด์โปรไฟเลอร์ ตัวอย่างของวินด์โปรไฟเลอร์ วินด์โปรไฟเลอร์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสรุป

บทที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง กล่าวถึงหัวข้อเกี่ยวกับ การคำนวณเวคเตอร์ของลม การเฉลี่ยข้อมูลภายในคาบเวลา และสรุป

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เรดาร์กับการวัดข้อมูลในบรรยากาศ

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

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของเรดาร์

ระบบเรดาร์จะทำงานด้วยหลักการเบื้องต้นที่คล้ายคลึงกันตามหลักการทำงานที่จะได้กล่าวไว้ในรายละเอียดต่อไปสำหรับในการเลือกใช้งานเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เฉพาะด้านจะต้องเลือกคุณสมบัติที่ต้องการให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ และชนิดของเรดาร์เป็นหลักเพื่อให้ได้ผลการตรวจจับและวัดข้อมูลที่ต้องการได้ดีที่สุดให้ความถูกต้องแม่นยำ และน่าเชื่อถือที่สุด จะเห็นว่าการพิจารณาเลือกระบบที่เหมาะสมเป็นประเด็นแรกที่ต้องคำนึงถึงและนำมาพิจารณาก่อนอื่น

2.1.1 หลักการทำงาน

เรดาร์ทำการส่งสัญญาณโดยอาศัยการส่งคลื่นวิทยุในช่วงความถี่ไมโครเวฟซึ่งถือว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแพร่กระจายสู่บรรยากาศด้วยความเร็วแสง ($3x10^8$ เมตรต่อวินาที) และมีผลกระทบต่อวัตถุที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ตามแนวเส้นทางเดินของมัน โดยเมื่อมันตกกระทบวัตถุใดๆ จะมีผลทำให้เกิดการกระจาย การเบี่ยงเบน และการหักเหของคลื่น นำเอาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ในการตรวจหาระยะทางและความเร็วของวัตถุ นอกจากนี้ยังใช้ระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ต้องการวัดซึ่งสัมพันธ์กับจุดอ้างอิงที่เรารู้ โดยการนำเอาคลื่นดังกล่าวมารวมกันเป็นบีมแล้วส่งผ่านสายอากาศของเรดาร์ ระบบเรดาร์มีจุดเด่นตรงที่สามารถวัดระยะทางได้อย่างรวดเร็วซึ่งไม่มีเทคนิควิธีการอื่นสามารถทำได้ดีเท่า และเรดาร์สมัยใหม่ยังสามารถดึงเอาข้อมูลอย่างอื่นจากสัญญาณสะท้อนของวัตถุได้อีกด้วย

ชนิดของวัตถุที่เรดาร์สามารถตรวจจับได้สามารถจำแนกได้เป็น 2 จำพวกคือ

1. Soft target วัตถุประเภทนี้จะเป็นองค์ประกอบของชั้นบรรยากาศ เช่น เมฆ ไอน้ำ ฝุ่นละออง ฝน ก๊าซ และอนุภาคอื่นๆ ในอากาศ
2. Hard target วัตถุชนิดนี้จะให้ค่าการสะท้อนที่สูงกว่า soft target เช่น นก แมลง ตึก เรือ เครื่องบิน ฯลฯ

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 เพื่อให้คลื่นกระจายออกไปโดยรอบเพื่อวัตถุประสงค์ในการตรวจหาวัตถุที่ต้องการวัดโดยคลื่นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง (ในกรณีที่ส่งผ่านอากาศ) เมื่อคลื่นตกกระทบวัตถุจะเกิดการสะท้อนสัญญาณและมีสัญญาณบางส่วนสะท้อนกลับมายังจานรับสัญญาณเรดาร์แล้วส่งต่อไปยังอุปกรณ์เครื่องรับสัญญาณเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนซึ่งอาจมีปนมาออกก่อนที่จะทำการขยายสัญญาณเนื่องจากสัญญาณที่สะท้อนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ส่ง เพื่อให้ได้ระดับของสัญญาณที่เหมาะสมก่อนนำไปวิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การนำเอาเรดาร์ไปประยุกต์ใช้งาน

ระบบเรดาร์ในระยะแรกๆ เข้ามามีบทบาทเกี่ยวกับทางด้านการทหาร แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาเรดาร์มาใช้ประโยชน์ทางด้านอื่นๆ อีกมากมาย เช่น ใช้กับเรือนำร่องเพื่อให้ถึงฝั่งได้อย่างปลอดภัย ใช้กับเครื่องบินเพื่อควบคุมการจราจรทางอากาศที่สนามบิน ใช้ตรวจจับความเร็ว ตรวจสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศ ซึ่งแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้ [Merril I. Skolnik (1988 : 12-13)]

- Ground-base radar ใช้ในการตรวจหาตำแหน่ง การเคลื่อนไหว ความเร็ว (ใช้กับพวกเรดาร์ของกรมตำรวจ) ตรวจดูเส้นทางการบินของเครื่องบิน หรือวัตถุในอากาศ
- Shipboard radar ใช้ในการเดินเรือเพื่อช่วยนำร่องในการเดินเรือได้อย่างปลอดภัย เช่น ตรวจหาตำแหน่งของทุ่นลอยในทะเล ตรวจหาแนวชายฝั่ง และป้องกันการชนกันของเรือหรือชนภูเขาน้ำแข็งในกรณีที่มีเมฆหมอกปกคลุมจนยากแก่การสังเกตได้ด้วยตาเปล่า
- Airborne radar ใช้ในการตรวจจับเครื่องบินลำอื่น ตรวจหาเรือที่แล่นในทะเล หรือใช้ในการลงจอดของเครื่องบิน นอกจากนี้ยังใช้เป็นแผนที่บอกตำแหน่งของเกาะหรือแผ่นดิน ตรวจหาสภาพภูมิอากาศเพื่อใช้ในการพยากรณ์อากาศ
- Spaceborne radar ใช้ในการนำทางอากาศยาน รวมทั้งการสำรวจข้อมูลระยะไกล (Remote sensing) ใช้สำรวจสภาพภูมิอากาศและมลภาวะ สำรวจพื้นผิวโลกเพื่อตรวจดูทรัพยากรธรรมชาติ สำรวจพื้นที่ทางการเกษตร ป่าไม้ และสภาพภูมิประเทศ

พระจอมเกล้าเจ้าคุณ

2.1.3 การจำแนกชนิดของเรดาร์

การจำแนกชนิดของเรดาร์สามารถพิจารณาอย่างกว้างๆ ได้ดังนี้ [Byron Edde (1993 : 44-46)]

2.1.3.1 จำแนกเป็น Primary radar หรือ secondary radar

- Primary radar แสดงในรูปที่ 2.1 (ก) สัญญาณที่สะท้อนจากวัตถุไปยังเครื่องรับเป็นสัญญาณที่สะท้อนจากตัววัตถุนั้นโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Secondary radar แสดงในรูปที่ 2.1 (ข) สัญญาณที่สะท้อนไม่ใช่สัญญาณสะท้อนจากตัววัตถุโดยตรงแต่จะเกิดจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในวัตถุซึ่งเป็นอุปกรณ์จำพวกเครื่องส่งรีเลย์ (Relay transmitter) หรือ ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณไปยังสายอากาศทางด้านรับของเรดาร์ ในบางกรณีการส่งคลื่นไปในบรรยากาศจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากสาเหตุต่างๆ ซึ่งเมื่อคลื่นไปกระทบวัตถุทำให้สัญญาณการสะท้อนกลับไม่แรงพอ จึงต้องใช้ตัวทวนสัญญาณ (Repeater) ติดไปกับวัตถุเพื่อให้คลื่นนั้นแรงพอ

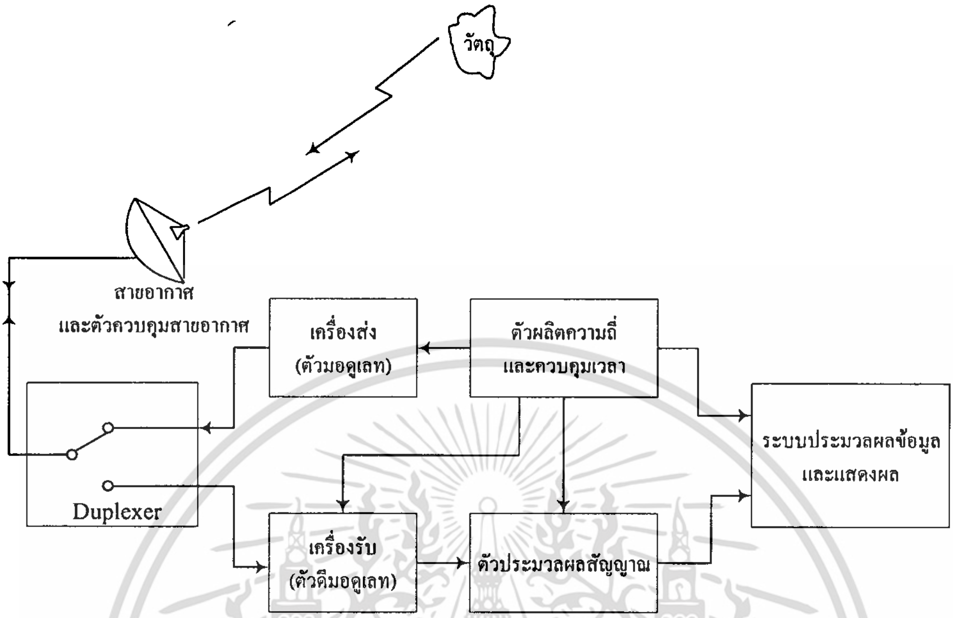
รูปที่ 2.1 Primary radar และ secondary radar

2.1.3.2 จำแนกเป็น Monostatic radar หรือ bistatic radar

- Monostatic radar แสดงในรูปที่ 2.2 เรดาร์ชนิดนี้ใช้สายอากาศรับ-ส่งร่วมกัน โดยมีสวิตซ์อัตโนมัติ เรียกว่า ดูเพล็กเซอร์ (Duplexer) หรือ TR-Switch ทำหน้าที่เป็นตัวแยกสัญญาณรับ-ส่ง ไม่ให้ปนกัน เรดาร์ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ระบบนี้เพื่อเป็นการประหยัดสายอากาศ

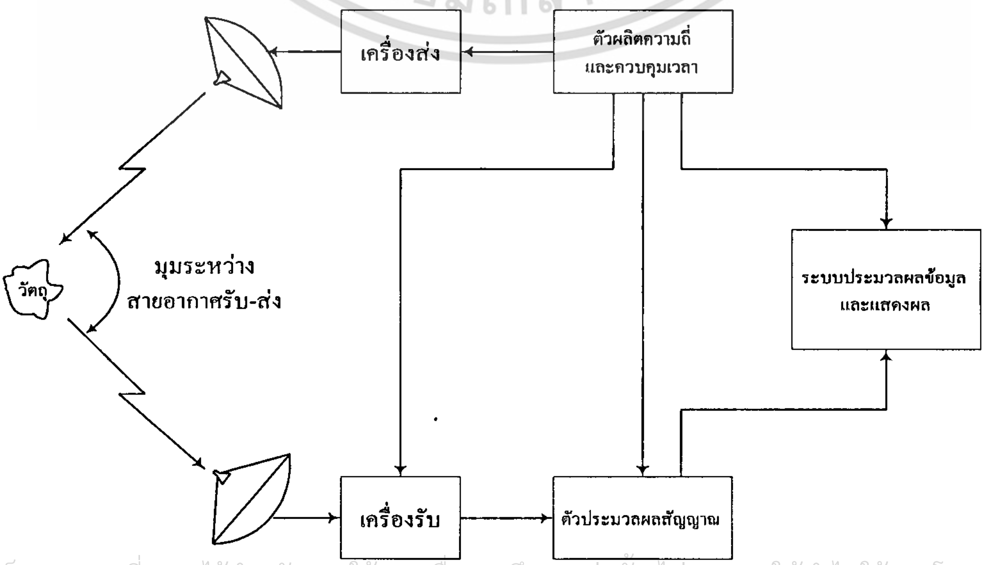
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.2 Monostatic radar



- Bistatic radar ระบบนี้ใช้สายอากาศรับ-ส่งแยกกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ปกติเรดาร์ชนิดนี้มักจะใช้กับคลื่นต่อเนื่อง (CW : Continuous wave) หรือคลื่นต่อเนื่องที่มีการมอดูเลตทางความถี่ (FMCW : Frequency-modulated continuous wave)

รูปที่ 2.3 Bistatic radar



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.3 จำแนกตามลักษณะการส่งสัญญาณเรดาร์

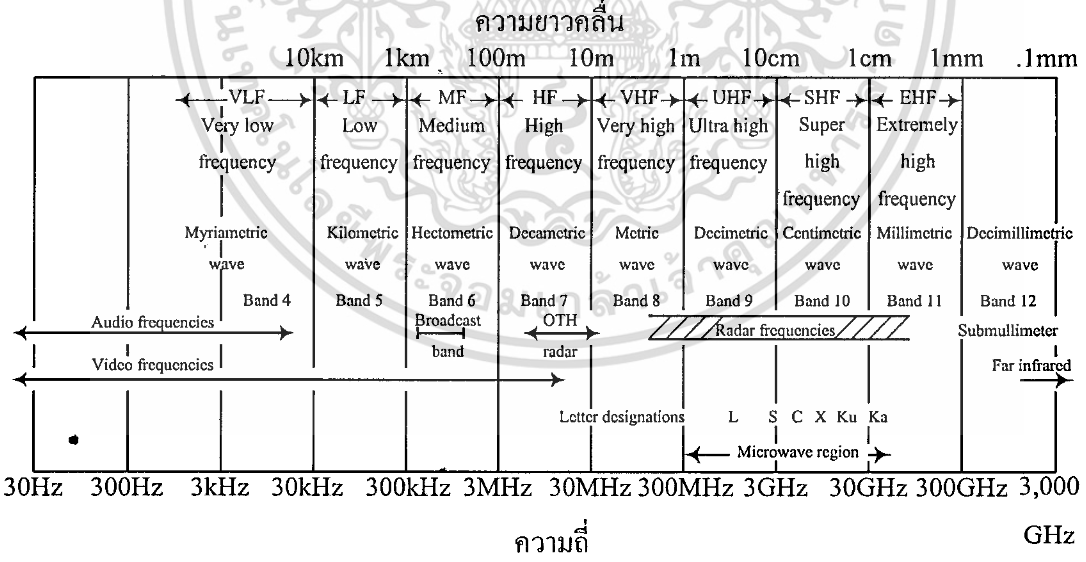
- Pulse radar
- CW radar
- FM-CW radar
- Pulse doppler radar

2.1.3.4 จำแนกตามลักษณะการใช้งาน

2.1.4 ย่านความถี่ของเรดาร์

ระบบเรดาร์จะใช้ช่วงความถี่ประมาณ 220 MHz ถึง 35 GHz ดังแสดงแถบความถี่ที่เรดาร์ใช้งานในรูปที่ 2.4 แต่ยังมีช่วงความถี่อื่นที่เรดาร์ใช้งานได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

รูปที่ 2.4 ความถี่ที่เรดาร์ใช้งานและสเปคตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 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 – 225 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานระบบเรดาร์ในแต่ละช่วงความถี่ โดยทั่วไปสามารถสรุปได้ดังนี้ [Merrill I. Skolnik (1988 : 7)]

HF	ใช้กับเรดาร์จับวัตถุที่เคลื่อนที่ตามแนวเส้นขอบฟ้า เช่น เครื่องบิน ขีปนาวุธ และเรือ รวมไปถึงการวัดในระยะไกลแต่ให้ความชัดเจนทางรายละเอียดน้อย เรียกว่า over-the-horizon (OTH) radar มักจะใช้วัดในมหาสมุทร
VHF และ UHF	ใช้วัดระยะไกล หรือจับการเคลื่อนที่ในระดับแนวเส้นสายตา (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)

2.1.5 สมการเรดาร์

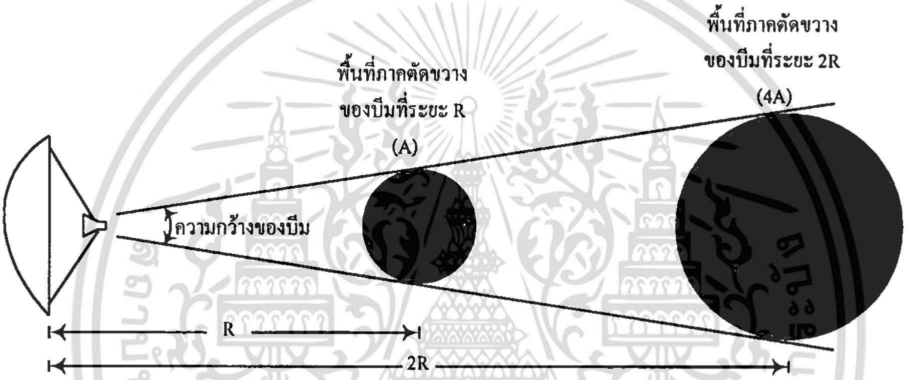
สมการเรดาร์เกี่ยวข้องกับระยะทางของเรดาร์ คุณลักษณะของเครื่องส่ง เครื่องรับ สายอากาศ วัตถุที่ต้องการวัด และสภาวะแวดล้อมอื่นๆ ซึ่งสมการเรดาร์ไม่เพียงแต่มีประโยชน์ในการกำหนดระยะทางที่ไกลที่สุดที่เรดาร์สามารถวัดได้ แต่ยังเป็นตัวช่วยให้เข้าใจระบบการทำงานของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรดาร์และยังเป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบเรดาร์อีกด้วย สมการเรดาร์ที่สามารถพิจารณาในรูปอย่างง่ายๆ ประกอบด้วย [Byron Edde (1993 : 32-35)]

- ค่า Power density คือ ค่ากำลังงานที่ตกกระทบวัตถุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนระนาบ มีค่าเท่ากับค่ากำลังงานที่เรดาร์ใช้ส่งคลื่นหารด้วยพื้นที่ของบีมในระยะทางตรงตำแหน่งที่วัตถุที่วัดอยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.5 ระยะทางและบีมที่ใช้หาค่า Power density



พื้นที่ของบีมที่ระยะทางใดๆ เป็นพื้นที่ของทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะทางหารด้วยอัตราขยายของสายอากาศ ค่า Power density เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P / A_F = \frac{P_T}{4\pi R_T^2 / G_T} \qquad \text{……… (1)}$$

เมื่อ P/A_F เป็น Power density (W/m^2)

(P แทน กำลังงาน (W), A_F แทน พื้นที่บนระนาบ (Effective area) (m^2))

P_T แทน กำลังของเครื่องส่ง (W)

R_T แทน ระยะทางจากเครื่องส่งไปยังเป้าหมาย (m)

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

G_T แทน อัตราขยายของเครื่องส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่ากำลังงานที่สะท้อนจากวัตถุ (Target reflection) ในการแพร่กระจายพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางใดๆ (ถ้าตัวกลางเป็นบรรยากาศ ค่าอิมพีแดนซ์ในบรรยากาศกรณี Free space มีค่าเท่ากับ 120π Ω) ค่าพลังงานที่สะท้อนกลับโดยการเดินทางผ่านตัวกลางใดๆ จะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นที่ส่งไปกระทบกับพื้นผิววัตถุ โดยลักษณะและทิศทางของคลื่นที่สะท้อนกลับจะขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุนั้นๆ เช่น ถ้าพื้นผิววัตถุเป็นทรงกลมจะเกิดการสะท้อนในทุกทิศทาง ถ้าพื้นผิวเป็นระนาบจะมีการสะท้อนกลับในด้านเดียวกับคลื่นตกกระทบ ทั้งนี้ทิศทางการสะท้อนกลับจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งและทิศทางในการวางตัวของระนาบด้วย ดังแสดงภาพตัวอย่างในรูปที่ 2.6 และจะเรียกส่วนของพลังงานที่คลื่นสะท้อนกลับในทิศทางของสายอากาศรับของเรดาร์ว่า การกระจายย้อนกลับ (Backscatter)

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

$$P_{Tgt} = \frac{P}{A_F}\sigma$$

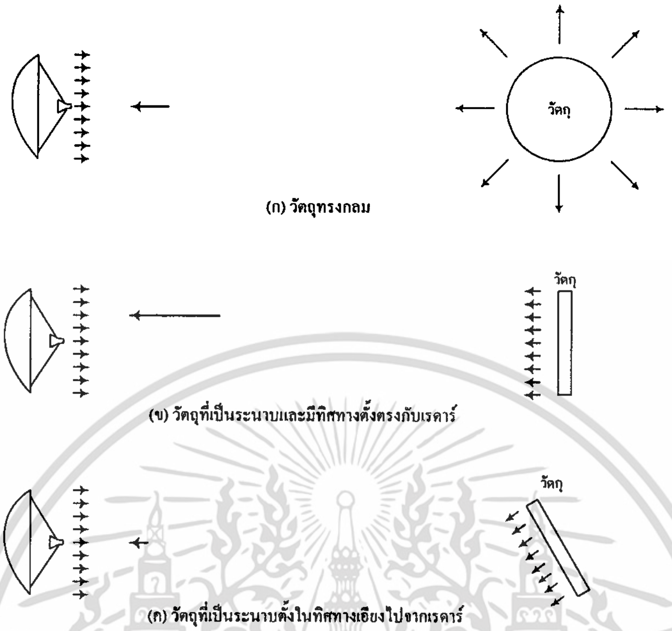
$$= \frac{P_T G_T}{4\pi R_T^2}\sigma \qquad \text{.........} (2)$$

เมื่อ P_{Tgt} เป็น ประสิทธิภาพกำลังงานที่สะท้อนของวัตถุในทิศทางของเรดาร์ (W)

σ ค่า Radar cross-section (RCS) ของวัตถุ (m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 ค่า RCS ของวัตถุขึ้นอยู่กับรูปร่างและทิศทาง



จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าในกรณีที่วัตถุเป็นทรงกลมซึ่งกระจายกำลังงานในทุกทิศทางทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับไปยังเรดาร์มีเป็นส่วนน้อย ทำให้ค่า RCS น้อย ถ้าวัตถุเป็นระนาบและทิศทางตั้งตรงกับเรดาร์ค่ากำลังงานในการสะท้อนกลับจะสะท้อนได้หมด ทำให้ค่า RCS มาก ในกรณีที่วัตถุเป็นระนาบแต่วางเอียงไปจากเรดาร์ทำให้ค่ากำลังงานที่สะท้อนกลับสะท้อนไปไกลจากเรดาร์จึงทำให้ค่า RCS น้อยที่สุด

- Backscatter propagation เป็นค่าพลังงานที่สะท้อนกลับอันเนื่องมาจากการแพร่กระจายคลื่นของวัตถุด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่น

  ค่า Power density ของคลื่นที่มีการสะท้อนคลื่นกลับไปยังเรดาร์ หาได้จากอัตราส่วนของค่ากำลังงานที่สะท้อนจากวัตถุกับพื้นที่ผิวทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะทางจากวัตถุไปยังเรดาร์ (พิจารณากรณีที่ใช้สายอากาศรับ-ส่งร่วมกัน เพราะระยะทางจากสายอากาศส่งไปยังวัตถุมีค่าเท่ากับระยะทางจากวัตถุไปยังสายอากาศรับ) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P / A_B = \frac{P_T G_T}{4\pi R_T^2} \sigma \frac{1}{4\pi R_R^2} \qquad \text{.........} (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ P/A_B เป็น ความหนาแน่นของกำลังงานที่สะท้อนกลับจากวัตถุไปยังสายอากาศทางด้านรับ (Backscatter power density) (W/m^2)

R_R เป็น ระยะทางจากวัตถุไปยังสายอากาศทางด้านรับของเรดาร์ (m)

- ค่าอัตราขยายของสายอากาศ (Antenna gain) อัตราขยายของสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญทางด้านส่ง ส่วนลักษณะพื้นที่ของวัตถุที่สามารถให้ค่าการสะท้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Effective area) จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญทางด้านรับ ดังนั้น สำหรับสายอากาศทุกชนิดต้องพิจารณาค่าทั้ง 2 นี้ไปพร้อมๆ กัน เพื่อให้การส่งและรับมีประสิทธิภาพมากที่สุด อัตราขยายของสายอากาศเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G = \frac{4\pi A_E}{\lambda^2} \quad \text{......... (4)}$$

เมื่อ G แทน อัตราขยายของสายอากาศ

A_E แทน Effective area (m^2)

λ แทน ความยาวคลื่น (m)

2.1.6 การผสมสัญญาณมอดูเลชั่น

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

การเข้ารหัสในการส่งคลื่นมี 2 วิธี คือ

1. ส่งคลื่นความถี่สูงในลักษณะเป็นพัลส์และจับเวลาระหว่างที่ส่งพัลส์กับสัญญาณสะท้อนกลับ วิธีนี้เรียกว่า พัลส์เรดาร์ (Pulsed radar)
2. เปลี่ยนค่าความถี่ของคลื่นความถี่สูงทางด้านส่งด้วยอัตราที่แน่นอน และเปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณที่สะท้อนกลับเปรียบเทียบกับความถี่ของสัญญาณที่ส่ง เรียกว่า การ

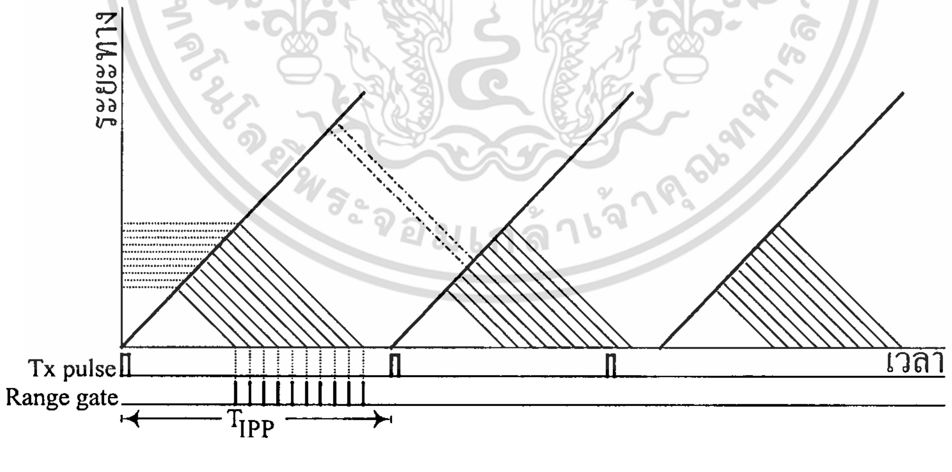
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดูเลทคลื่นความถี่ต่อเนื่องในระบบเรดาร์ (FM-CW radar : Frequency-modulated continuous wave)

การส่งคลื่นเรดาร์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. Pulsed radar ทำการส่งและรับคลื่นเป็นพัลส์โดยมีการกำหนดช่วงเวลาในการส่งคลื่นแต่ละลูก (IPP : Inter-pulse period) ให้สัมพันธ์กับอัตราการแซมปลิ้งสัญญาณตามจำนวนแซมเปิ้ลที่ต้องการ ในที่นี้การแซมปลิ้งสัญญาณจะต้องถูกกำหนดให้อยู่ในขอบเขตของช่วงเวลาระหว่างพัลส์แต่ละลูกเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาด ซึ่งถ้าอัตราการแซมปลิ้งสัญญาณมีมากกว่าช่วงเวลาในการส่งพัลส์ ข้อมูลที่ได้จะไม่ถูกต้อง เรียกว่า Alaising effect ทำให้ระยะทางของวัตถุที่คำนวณได้ผิดพลาด เรียกว่า Ambiguity range ซึ่งเป็นระยะที่แสดงเป็นเส้นประในรูปที่ 2.7 คือ ระยะทางของวัตถุจะมีค่ามากกว่า $ct_{IPP}/2$ แต่จะพบว่าระยะที่คำนวณได้เป็นระยะที่น้อยกว่า $ct_{IPP}/2$ เพราะเกิดหลังพัลส์ลูกถัดไป ดังนั้นในการหาระยะทางจึงเทียบกับพัลส์ลูกหลังแทนจึงได้ระยะทางที่ผิดไปจากความเป็นจริง

รูปที่ 2.7 แผนภาพการส่งพัลส์เรดาร์เทียบเวลากับความสูง



จากรูปที่ 2.7 ช่วงเวลาในการส่งพัลส์แต่ละลูกเพื่อไม่ให้เกิด ambiguity range เรียกว่า inter-pulse-period (IPP) ส่วนความถี่ในการเกิดพัลส์แต่ละลูก เรียกว่า pulse-repetition-frequency (PRF)

2. CW radar (Continuous wave) หรือ Doppler radar เป็นการส่งคลื่นวิทยุอย่างต่อเนื่องกันไปเป็นสายยาวโดยไม่มีการมอดูเลทคลื่นสัญญาณ ในการส่งคลื่นดังกล่าวออกไปนั้นจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ข้อมูลจากสัญญาณของวัตถุใดๆ ที่อยู่ในแนวบีมเรดาร์สะท้อนกลับไปยังสายอากาศรับคลื่น ค่ามุมแบริ่ง และมุมเงยของวัตถุหาได้จากตำแหน่งและทิศทางของสายอากาศที่ทำมุมกับวัตถุในขณะที่สัญญาณสะท้อนมีค่ามากที่สุด แต่ CW radar ไม่สามารถวัดระยะทางได้เนื่องจากส่งคลื่นอย่างต่อเนื่องไปโดยไม่มีการเว้นช่วงเวลาในการส่งคลื่นลูกถัดไป ดังนั้น จึงไม่สามารถจับเวลาที่คลื่นแต่ละลูกส่งออกไปกระทบวัตถุแล้วสะท้อนกลับได้

ระบบ CW radar จะใช้กับการตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่ หรือติดตั้งเรดาร์ไปกับวัตถุที่เคลื่อนที่โดยอาศัยหลักการของดอปเปลอร์ (Doppler effect) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความถี่ไปตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ คือ ถ้าวัตถุเคลื่อนที่เข้าหาจุดที่ทำการสังเกตความถี่ของคลื่น ณ จุดสังเกตจะมากขึ้น และที่ระยะห่างออกไปความถี่จะลดลง หรือถ้าวัตถุเคลื่อนที่ออกจากจุดสังเกต ความถี่ของคลื่นสะท้อน ณ จุดสังเกตจะลดลง

โดยทั่วไปถ้ารู้ความเร็วที่วัตถุเคลื่อนที่และความถี่ที่ใช้ในการส่งคลื่นเทียบกับความเร็วที่คลื่นวิทยุเดินทาง (เท่ากับความเร็วแสงในกรณีที่คลื่นเดินทางในอากาศ) จะสามารถหาความถี่ที่เปลี่ยนแปลงของวัตถุเมื่อสะท้อนไปยังเรดาร์ เรียกว่า ความถี่ดอปเปลอร์ (Doppler shift frequency) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$f_d = \frac{2v}{c} f_0 \qquad \text{......... (5)}$$

เมื่อ f_d เป็นความถี่ดอปเปลอร์

f_0 เป็นความถี่ที่ใช้ส่งคลื่น

v เป็นความเร็วของวัตถุ

c เป็นความเร็วของคลื่นวิทยุ

โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ดอปเปลอร์สามารถหาความถี่ของคลื่นสะท้อนเมื่อวัตถุเคลื่อนที่เข้าหาสายอากาศรับของเรดาร์ได้จาก $f_0 + f_d$ และความถี่ของคลื่นสะท้อนเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ออกจากสายอากาศรับของเรดาร์ได้จาก $f_0 - f_d$ ในความเป็นจริงความถี่ดอปเปลอร์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วที่แท้จริงของวัตถุ แต่ขึ้นอยู่กับความเร็วของวัตถุในทิศทางของสายอากาศเรดาร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) จะเห็นว่าวัตถุเคลื่อนที่ในทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกับสายอากาศเรดาร์สามารถคำนวณหาได้โดยตรงจากค่าความเร็วในแนวรัศมี (Radial velocity) มีค่าเป็น 1 เนื่องจากวัตถุเคลื่อนที่ในทิศทางทำมุม θ = 0 กับสายอากาศเรดาร์ ส่วนในรูปที่ 2.8 (ข) วัตถุเคลื่อนที่ในทิศทางทำมุม θ กับสายอากาศเรดาร์ ดังนั้นความเร็วที่ใช้ในการพิจารณาความถี่ดอปเปลอร์จะเป็นองค์ประกอบทางความเร็วของวัตถุในทิศทางของสายอากาศ (คือ ความเร็วในแนวรัศมี x cosθ) ไม่ใช่ความเร็วที่แท้จริงของวัตถุ

. รูปที่ 2.8 (ก) วัตถุเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับบีมของเรดาร์ (ข) วัตถุเคลื่อนที่ต่างทิศทางกับบีมของเรดาร์

3. FM-CW radar เป็นการปรับปรุง CW radar ในเรื่องการวัดระยะทาง โดยนำสัญญาณคลื่นพาหะ (Carrier) ของคลื่นต่อเนื่องมาทำ Timing mark เพื่อระบุเวลาในการส่งและเวลาของสัญญาณสะท้อน โดยปกติใช้ Timing mark เป็นสเปคตรัม ซึ่งสเปคตรัมของคลื่นต่อเนื่องสามารถนำมามอดูเลททางแอมปลิจูด ความถี่ หรือเฟสได้ ตัวอย่างของการมอดูเลททางแอมปลิจูด คือ Pulsed radar ซึ่งเมื่อพัลส์ยิ่งแคบพบว่าสเปคตรัมที่ส่งจะกว้างทำให้การวัดระยะทางถูกต้องยิ่งขึ้น ในกรณีของ CW radar วิธีที่นิยมทำให้สเปคตรัมที่ส่งกว้างโดยการมอดูเลททางความถี่ของคลื่นพาหะ โดย Timing mark จะเปลี่ยนตามความถี่และเวลาที่ได้จะเกิดจากผลต่างทางความถี่ของสัญญาณสะท้อนกับสัญญาณที่ส่ง

4. Pulse doppler radar หรือ MTI radar เป็นการนำหลักการของความถี่ดอปเปลอร์มาประยุกต์ใช้กับ Pulsed radar เพื่อทำการตรวจวัดวัตถุที่เคลื่อนที่ซึ่งมีสัญญาณที่ไม่ต้องการปนมากับคลื่นสะท้อน เรียกว่า Clutter ดังนั้นสามารถเรียก Pulse doppler radar ได้อีกอย่างหนึ่งว่า MTI (Moving target indication) radar หลักการคล้าย CW radar ซึ่งจำกัดในเรื่องของการวัดระยะทางแต่จะดีกว่าตรงที่ส่งสัญญาณเป็นพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การใช้เรดาร์วัดข้อมูลในบรรยากาศ

ระบบเรดาร์ที่ใช้วัดข้อมูลในบรรยากาศ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ เรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Atmospheric radar) และเรดาร์สำรวจอากาศ (Weather radar) ซึ่งเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศจะวัดสัญญาณสะท้อนของอนุภาคในบรรยากาศในสภาวะที่อากาศปกติ คือ ท้องฟ้าแจ่มใส (Clear air echoes) แต่เรดาร์สำรวจอากาศมักจะใช้วัดฝนเป็นหลัก สำหรับข้อแตกต่างของเรดาร์ทั้ง 2 ระบบนี้สามารถพิจารณาได้ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 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 ทำการวัดโดยใช้มุมแคบๆเทียบกับมุมในแนวดิ่ง (Zenith)	ครอบคลุมพื้นที่ในแนวระนาบมากถึงหลายร้อยกิโลเมตร วัดด้วยการสแกนสายอากาศด้วยมุมเงย (Elevation angle) ค่าน้อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การจำแนกชั้นบรรยากาศ

ชั้นบรรยากาศสามารถแบ่งตามระดับความสูงและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้หลายชนิดซึ่งจำแนกตามอนุภาคที่ห่อหุ้มโลกที่มีจำนวนมากที่สุดในแต่ละระดับความสูงจึงใช้คำลงท้ายว่า "สเฟียร์" (sphere) และที่ระดับสูงสุดในแต่ละชั้นจะใช้คำลงท้ายว่า "พอส" (pause)โดยมีรายละเอียดดังนี้

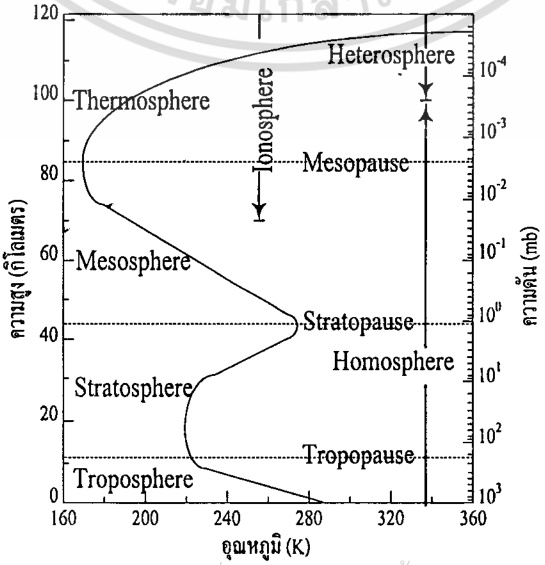
1. *โทรโพสเฟียร์ (Troposphere)* ระดับบนสุดของชั้นนี้เรียกว่า โทรโพพอส (Tropopause) ชั้นนี้ระดับความสูงจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ รูปที่ 2.9 ความร้อนที่ชั้นนี้จะเกิดจากการดูดกลืนรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก มีการถ่ายเทความร้อนจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคในบรรยากาศซึ่งความร้อนจะสูงมากในบริเวณแถบเส้นศูนย์สูตร มีการระเหยเป็นไอของน้ำก่อให้เกิดเมฆและฝน เกิดลม ลมมรสุม ตลอดจนพายุฝนฟ้าคะนอง ระดับความสูงเริ่มจากระดับพื้นดินจนถึงที่ระดับความสูงประมาณ 15 กิโลเมตร
2. *สตาร์โตสเฟียร์ (Stratosphere)* ระดับบนสุดของชั้นนี้เรียกว่า สตาร์โตพอส (Startopause) ชั้นนี้ระดับความสูงจะแปรผันตามอุณหภูมิ รูปที่ 2.9 โดยมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 270 K ที่ระดับความสูงประมาณ 50 กิโลเมตร ชั้นนี้ประกอบด้วยโอโซนจำนวนมากทำหน้าที่ดูดรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 290 - 300 นาโนเมตร เป็นสาเหตุให้ชั้นนี้มีอุณหภูมิสูง (250 - 290 K)
3. *เมโซสเฟียร์ (Mesosphere)* ระดับบนสุดของชั้นนี้เรียกว่า เมโซพอส (Mesopause) ชั้นนี้ระดับความสูงจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ รูปที่ 2.9 โดยมีอุณหภูมิต่ำสุดในช่วงฤดูร้อนประมาณ 180 - 190 K ที่ระดับความสูงประมาณ 80 - 90 กิโลเมตร และอุณหภูมิในช่วงฤดูหนาวประมาณ 220 K ชั้นนี้จะมีสมดุลทางความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนจากโมเลกุลของออกซิเจนและความเย็นจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีการดูดรังสีอุลตราไวโอเลตเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ชั้นนี้มีระดับความสูงประมาณ 55 - 80 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. *เทอร์โมสเฟียร์ (Thermosphere)* ชั้นนี้ระดับความสูงจะแปรผันตามอุณหภูมิ รูปที่ 2.9 อุณหภูมิสูงสุด 1,000 - 2,000 K เนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนของออกซิเจนและอนุภาคอื่นๆ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์โดยตรง ซึ่งทำให้สามารถสังเกตความแตกต่างระหว่างกลางวันกับกลางคืนได้อย่างชัดเจน ชั้นนี้เป็นชั้นที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดและมีระดับความสูงตั้งแต่ 80 - 90 กิโลเมตรขึ้นไป

นอกจากนี้ยังเรียกชั้นโทรโพสเฟียร์จนถึงชั้นสตาร์โตสเฟียร์ที่ระดับความสูงประมาณ 100 กิโลเมตรว่า โฮโมสเฟียร์ (homosphere) เพราะมีไอน้ำและโอโซนรวมตัวกันใน 2 ชั้นนี้ และที่ระดับความสูงประมาณ 300 กิโลเมตร ซึ่งมี ออกซิเจนมากที่สุด ระดับความสูงประมาณ 800 กิโลเมตร ก๊าซฮีเลียมและไฮโดรเจนมีมากที่สุด ชั้นดังกล่าวจะมีความแตกต่างขององค์ประกอบของอนุภาคมากจึงเรียกว่า เฮทเตอโรสเฟียร์ (heteorosphere) ส่วนที่ระดับความสูงตั้งแต่ 60 กิโลเมตรขึ้นไปจะมีการดูดกลืนรังสีอุลตราไวโอเลทจากดวงอาทิตย์มากที่สุด เรียกว่า ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) ซึ่งเป็นชั้นที่มีความสำคัญต่อการติดต่อสื่อสารเป็นอย่างมาก ที่ระดับความสูงประมาณ 600-800 กิโลเมตร อนุภาคในบรรยากาศจะชนกันน้อยลงทำให้การเดินทางออกนอกบรรยากาศเป็นไปได้ดี เรียกว่า เอกซ์โซสเฟียร์ (exosphere)

รูปที่ 2.9 ชั้นบรรยากาศจำแนกตามระดับความสูงที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ

ชั้นบรรยากาศประกอบด้วยก๊าซต่างๆ จำนวนมาก ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิและป้องกันการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์อันอาจก่อให้เกิดอันตราย การเปลี่ยนแปลงในบรรยากาศมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุณหภูมิ ลม ความชื้น เมฆ และการเกิดฝน รวมไปถึงสภาพดินฟ้าอากาศ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศซึ่งจัดว่าเป็น soft target เพราะไม่สามารถระบุรูปร่างของวัตถุได้อย่างแน่นอนจึงจำเป็นต้องกำหนดระยะและทิศทางในการวัดให้ชัดเจน

เรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ [Simon Kingsley (1992 : 190-204)]

1. ป้องกันและหลีกเลี่ยงจากภัยธรรมชาติ โดยเฉพาะใช้กับทางด้านการบินและการเดินเรือ
2. พยากรณ์อากาศ โดยปกติแหล่งข้อมูลในการพยากรณ์อากาศมักจะได้จาก ภาพถ่ายดาวเทียม เครื่องมือวัดจากเครื่องบิน และ radiosonde ซึ่งเป็นการปล่อยบอลลูนโดยมีเครื่องมือวัดหรือตัวเซนเซอร์ติดไปด้วย แต่สามารถใช้เรดาร์มาพยากรณ์อากาศได้ด้วย
3. การวิจัย เรดาร์สามารถใช้วัดชั้นบรรยากาศระดับล่างและระดับที่สูงขึ้นไปได้

การเปลี่ยนแปลงของอนุภาคในชั้นบรรยากาศระดับล่างและระดับกลางเรียกว่า coherent scattering เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห (Refraction index) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคในอากาศที่รวมตัวกันเป็นโมเลกุลหรืออิเลกตรอนทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ระบบเรดาร์ที่ใช้มักจะเรียกว่า MST (Mesosphere Stratosphere Troposphere) radar ในชั้นไอโอโนสเฟียร์จะมีการกระจายของอนุภาคเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนและอิออนที่อยู่กันอย่างหนาแน่นทำให้เกิดความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอนุภาค เรียกว่า incoherent scattering [Toru Sato (6-8)]

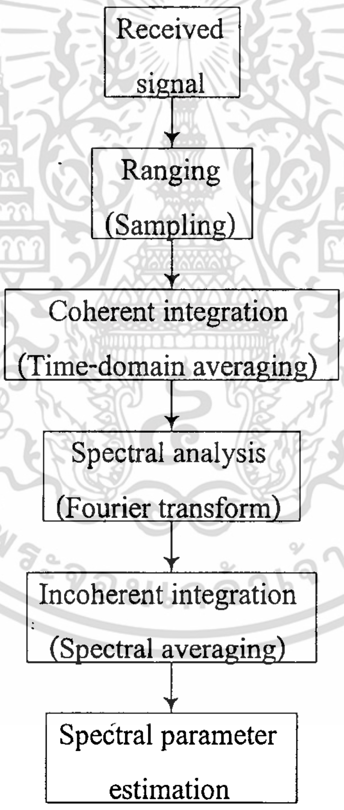
การวัดการเคลื่อนที่ของอนุภาคในบรรยากาศซึ่งก็คือลม สามารถวัดได้จากค่าดอปเปลอร์ของอนุภาคที่สะท้อนกลับ (Doppler shift) โดยหาค่าความถี่ดอปเปลอร์ได้จากสมการที่ 5 เมื่อ V เป็นองค์ประกอบความเร็วของเวกเตอร์ของอนุภาคในระดับแนวเส้นสายตา (line-of-sight) ที่สัมพันธ์กับเรดาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การประมวลผลสัญญาณ

เมื่อสายอากาศทางด้านรับ รับสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคในบรรยากาศจะผ่านขั้นตอนต่างๆ ที่เครื่องรับดังกล่าวไปแล้วในขั้นตอนการรับสัญญาณพัลส์เรดาร์ และ CW radar ในการประมวลผลสัญญาณเรดาร์มักจะใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 2.10 ซึ่งการคำนวณในการประมวลผลจะเป็นแบบ real-time หรือ off-line ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบเรดาร์ที่ใช้

รูปที่ 2.10 บล๊อคไดอะแกรมขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลของเรดาร์สำรวจบรรยากาศ



แต่ละขั้นตอนอธิบายการทำงานได้ดังนี้ [Toshitaka Tsuda (7-36)]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Ranging (Sampling) ทำการหาระยะทางได้จากสมการที่ 6 โดยการวัดระยะทางของวัตถุ อาศัยหลักการในการหาความเร็วจาก อัตราส่วนของระยะทางเทียบกับเวลา ซึ่งระบบเรดาร์จะส่งคลื่นวิทยุเพื่อตรวจหาสัญญาณสะท้อนกลับของวัตถุดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ด้วยหลักการของการกระจายคลื่นผ่านอากาศ พบว่าความเร็วของคลื่นที่ส่งจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง (3 x 10^8 เมตรต่อวินาที) ดังนั้นสามารถคำนวณระยะทางของเรดาร์ได้จาก

$$R = c\frac{t}{2} \qquad \text{.........} (6)$$

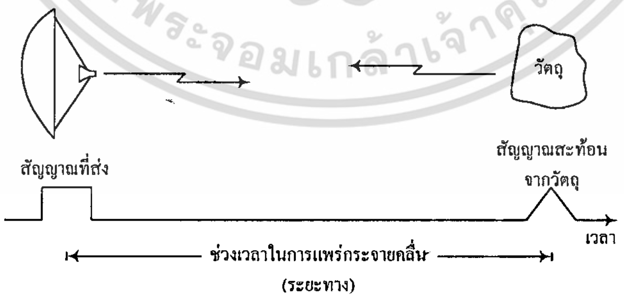
เมื่อ R แทน ระยะทาง (เมตร)

c เป็นค่าความเร็วของวัตถุในตัวกลาง (กรณีเดินทางผ่านอากาศจะเป็นค่าความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3 x 10^8 เมตรต่อวินาที)

t เป็นเวลาเดินทาง ไป - กลับ ของพัลส์ที่ส่ง (วินาที)

ดังนั้น ถ้าคิดเวลาในหน่วยไมโครวินาที และแทนค่า c = 3 x 10^8 เมตรต่อวินาทีลงไปในสมการที่ 6 แล้วจะได้ว่า R = 150t (เมตร) หรือ R = 0.15t (กิโลเมตร)

รูปที่ 2.11 การวัดระยะทางของเรดาร์



ส่วนอัตราการแซมปลิ้งสัญญาณเป็นไปตามรูปที่ 2.7 ดังได้อธิบายไปแล้ว โดยปกติ MST radar ที่ใช้สำรวจบรรยากาศจะวัดใช้วัดระยะความสูงน้อยกว่า 100 กิโลเมตร ที่มีค่า IPP น้อยกว่า 1 มิลลิวินาที ในกรณีที่สายอากาศมีการปรับบีม 3 ทิศทาง คือ แกนตั้ง ทิศเหนือ และทิศตะวันออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Coherent integration (Time-domain averaging) เป็นการรวมสัญญาณจาก quadrature detector กับสัญญาณพัลส์หลายๆ สัญญาณเพื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ซึ่งต้องให้เฟสของสัญญาณที่รับได้คงที่เมื่อเทียบกับสัญญาณอ้างอิง
- Spectral analysis (Fourier transform) ทำการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณที่รับในแต่ละช่วงที่ทำการแซมปลิ้งสัญญาณ (range gate) ในอนุกรมของเวลา ในกรณีของสัญญาณดิจิตอลต้องทำการแปลงฟูเรียร์แบบดีสครีท (Discrete Fourier transform) หรือฟาสท์ฟูเรียร์ โดยทำการแซมปลิ้งสัญญาณ ซึ่งความถี่ในการแซมปลิ้งไม่เกินความถี่ไนควิซท์ (Nyquist frequency) ดังในสมการที่ 7

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \qquad \text{......... (7)}$$

เมื่อ f_N เป็นความถี่ไนควิซท์

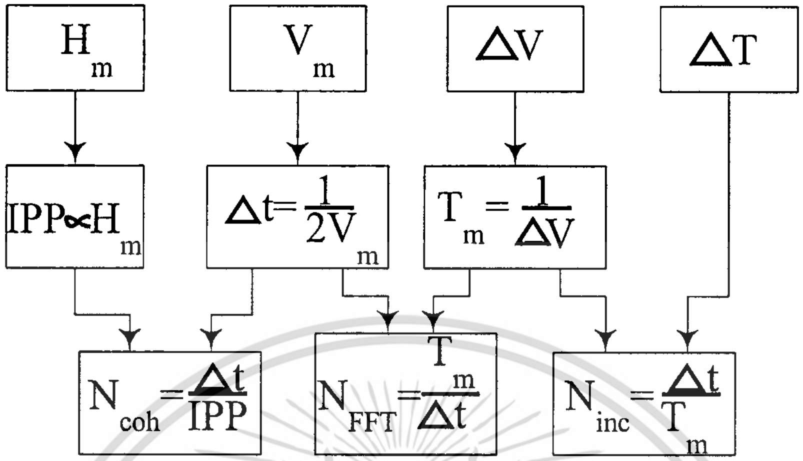
Δt เป็นช่วงเวลาที่ทำการแซมปลิ้ง

- Incoherent integration (Spectral averaging) ทำการหาค่าเฉลี่ยสเปคตรัมของสัญญาณเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงของดอปเปลอร์สเปคตรัม ซึ่งในการหาค่าเฉลี่ยสเปคตรัมจำนวน N_i พบว่าประสิทธิภาพในการตรวจวัดสัญญาณดอปเปลอร์สเปคตรัมในบรรยากาศจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน $N_i^{1/2}$
- Spectral parameter estimation เป็นการประมาณค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ค่าความเร็วเฉลี่ยของดอปเปลอร์ และความกว้างของสเปคตรัม จากดอปเปลอร์สเปคตรัมที่มีค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและประสิทธิภาพในการตรวจวัดสัญญาณดอปเปลอร์สเปคตรัมมาก เพื่อนำไปเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาหาระยะทางหรือความถี่ที่ผิดพลาดอันอาจจะเกิดขึ้นได้

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาระบบประมวลผลสัญญาณแสดงในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.12 พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาการประมวลผลสัญญาณเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ



H_m เป็นระยะทางที่มากที่สุด, V_m เป็น radial velocity, Δt เป็นช่วงเวลาในการแซมปลิ้งข้อมูล, ΔV เป็นสเปคตรัมความเร็วดอปเปลอร์ค่าน้อยที่สุด, T_m เป็นเวลามากที่สุดในการแซมปลิ้งข้อมูล, ΔT เป็นเวลาในการสังเกตดอปเปลอร์สเปคตรัม, N_{coh} เป็นจำนวนของการทำ coherent integration, N_{FFT} เป็นจำนวนจุด FFT, N_{inc} เป็นจำนวนของการทำ incoherent integration

2.3 สรุป

ระบบเรดาร์จำแนกได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปใช้งาน ซึ่งการจะตัดสินใจเลือกชนิดของเรดาร์ และช่วงความถี่ที่เลือกใช้ในการทำงานของระบบ จำเป็นต้องพิจารณาให้เหมาะสมที่สุดโดยดูจากคุณสมบัติของเรดาร์ชนิดต่างๆ ตัวอย่างของระบบเรดาร์ชนิดหนึ่งที่ได้นำเสนอคือ ระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ เป็นการตรวจหาสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคในบรรยากาศโดยอาศัยหลักการของความถี่ดอปเปลอร์ สัญญาณสะท้อนจะถูกนำไปประมวลผลและทำการวิเคราะห์ค่าของสัญญาณต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การใช้เรดาร์วัดความเร็วและทิศทางของลมในบรรยากาศ

ระบบเรดาร์ที่ใช้วัดความเร็วและทิศทางของลมในบรรยากาศซึ่งเรียกว่า วินด์โปรไฟเลอร์ เป็นดอปเปลอร์เรดาร์ชนิดหนึ่งที่ใช้วัดลมโดยติดตั้งระบบเรดาร์ที่ภาคพื้นดินทำการวัดเวกเตอร์ของลมที่อยู่เหนือจากเรดาร์ขึ้นไปโดยใช้หลักการสะท้อนสัญญาณจากอนุภาคในบรรยากาศในลักษณะของสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคของอากาศ (clear-air echo) สัญญาณสะท้อนของอนุภาคดังกล่าวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหในแต่ละระดับซึ่งมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นของเรดาร์ (Brag scattering) ความเร็วในแนวระนาบของลมตามบีมของเรดาร์สามารถวัดได้จากสัญญาณดอปเปลอร์ตามทิศทางของบีม ส่วนระยะสูงสุดที่สามารถวัดได้จะขึ้นอยู่กับกำลังของเครื่องส่ง ขนาดของสายอากาศ และความถี่ที่เรดาร์ใช้งาน

3.1 หลักการของวินด์โปรไฟเลอร์

วินด์โปรไฟเลอร์เป็นพัลส์ดอปเปลอร์เรดาร์มีวัตถุประสงค์หลักคือ ใช้ทำการวัดเวกเตอร์ของลมใน 3 มิติ ทำงานได้ในสภาพอากาศเกือบทุกสภาวะ ประกอบด้วยสายอากาศชนิดเฟสอาร์เรย์ที่กำหนดตำแหน่งคงที่ไว้แล้ว หรือใช้จานสายอากาศชนิดจานพาราโบลาร์ อุปกรณ์เครื่องส่งและรับสัญญาณเรดาร์ และหน่วยประมวลผลสัญญาณ สำหรับบีมที่ใช้วัดสัญญาณดอปเปลอร์จะต้องใช้สายอากาศที่ชี้ไปยังทิศทางที่ต้องการวัดเวกเตอร์ของลมอย่างน้อย 3 ทิศทาง เช่น ทิศเหนือ ทิศตะวันออก และทิศในแนวดิ่ง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.1 ถ้าในกรณีที่กำหนดบีม 5 ทิศทาง จะประกอบด้วย ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก ทิศตะวันตก และทิศในแนวดิ่ง เรดาร์จะทำการส่งสัญญาณพัลส์ไปตามแนวทุกทิศทางของบีมเรดาร์ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะกระทบกับโมเลกุลหรืออนุภาคของอากาศแล้วมีพลังงานของสัญญาณจำนวนหนึ่งสะท้อนกลับมายังสายอากาศที่รับสัญญาณ จากนั้นจะนำสัญญาณสะท้อนซึ่งมีค่าน้อยนี้ไปทำการขยายสัญญาณและลดสัญญาณรบกวนในวงจรของอุปกรณ์ Low noise amplifier จากนั้นจะลดความถี่ของสัญญาณให้เป็นความถี่ปานกลาง (IF : Intermediate frequency) ได้ผลลัพธ์เป็นองค์ประกอบของสัญญาณ in-phase และสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

quadrature-phase ทางด้าน quadratuer-phase จะทำงานเฉพาะที่เฟสมีค่าเท่ากับ 90° เท่านั้น (สามารถพิจารณาเป็นองค์ประกอบคาร์ทีเชียนของเวกเตอร์ 2 มิติในระนาบเชิงซ้อน ซึ่งเรียกว่า แผนภาพเฟสเซอร์ (phasor diagram)) ค่าของเฟส (สัมพันธ์กับสัญญาณที่ส่ง) และแอมปลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับจะถูกกำหนดในส่วนของ quadrature detector จากนั้นจะทำการรวมพัลส์จำนวนหลายร้อยพัลส์เพื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนหลังจากผ่านกระบวนการแปลงสัญญาณจากอะนาลอกเป็นดิจิตอลเรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนนี้เรียกว่า การรวมแบบ coherent องค์ประกอบของสัญญาณ in-phase และ quadrature-phase จะใช้เป็นตัวหาค่าของการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (DFT : Discrete Fourier Transform) ซึ่งนิยมใช้การแปลงแบบฟาสท์ฟูเรียร์ (FFT : Fast Fourier Transform) มากกว่าเนื่องจากให้ผลการคำนวณที่ใช้เวลาน้อยกว่ามาก โดยทั่วไปแล้วการแปลงแบบ FFT มักจะใช้กับจุดข้อมูลจำนวน 64 หรือ 128 (จำนวนเชิงซ้อน) จุดข้อมูล จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยแบบ incoherent ช่วงเวลาที่ได้ใน 1 เส้นสเปคตรัมสำหรับทุกๆ ช่วงการแซมปลิ้งสัญญาณจะมีค่าประมาณ 20 – 30 วินาที เรียกว่า dwell time แผนภาพการประมวลผลสัญญาณสะท้อนแสดงในรูปที่ 3.2

ข้อมูลของสัญญาณสะท้อนจะประกอบด้วย สเปคตรัมของสัญญาณดอปเปลอร์ ข้อมูลที่มีสเปคตรัมของสัญญาณอยู่ครบจะเป็นข้อมูลดิบ เราทำการคำนวณโมเมนต์ 3 ตัวแรก (first 3 moment) ด้วยอัลกอริทึมในการประมาณค่าโมเมนต์ครั้งแรก คือโมเมนต์ 0 จะได้ค่าความเข้มของสัญญาณ (แอมปลิจูด) โมเมนต์ที่ 1 เป็นสัญญาณดอปเปลอร์ (หรือ ความเร็วของวัตถุ) และโมเมนต์ที่ 2 เป็นความกว้างของสเปคตรัมของสัญญาณ (variance) วินด์โปรไฟเลอร์ใช้การประมาณค่าความเร็วของอนุภาค (radial velocity) สำหรับทุกๆ ช่วงการแซมปลิ้งสัญญาณในแต่ละบีม สมมติว่าลมในแนวระนาบมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันในแนวบีมของเรดาร์ จะกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า การวัดความเร็วของอนุภาค คือ องค์ประกอบของเวกเตอร์ของลมใน 3 มิติไปตามทิศทางของสายอากาศที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นจะได้เวกเตอร์ความเร็วของลมในพิกัดคาร์ทีเซียน 3 ตัวคือ (u, v, w)

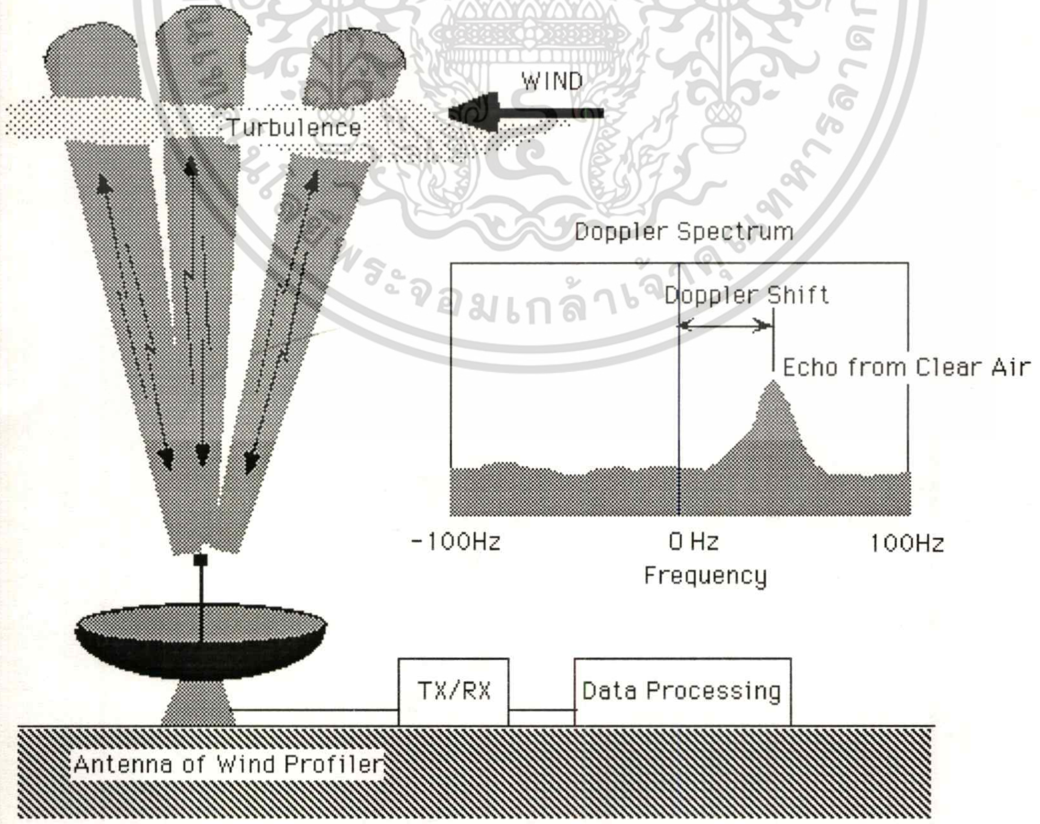
คุณสมบัติโดยทั่วไปของวินด์โปรไฟเลอร์ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของวินด์โปรไฟเลอร์

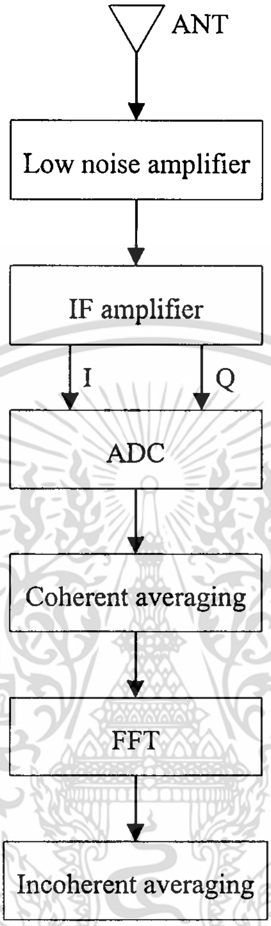
Radar Frequency	VHF Radar (50MHz)	UHF Radar (400MHz)	UHF Radar (1GHz)
Observable Range	2-20 km	0.5-17 km	0.2-3 km
Antenna Size	100 x 100 m	10 x 10 m	1 x 1 m
Transmit Peak Power	1000-100 kW	10 kW	1 kW
Example	MU Radar	NOAA Profiler Network MRI Wind Profiler	CRL Wind Profiler RASC BLR RADIAN Co. LAP-3000

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของวินด์โปรไฟเลอร์ที่ใช้บีม 3 บีม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2 แผนภาพการประมวลผลของสัญญาณสะท้อนที่เข้ามายังสายอากาศรับสัญญาณ



3.2 ตัวอย่างของวินด์โปรไฟเลอร์

วินด์โปรไฟเลอร์ที่มีใช้กันอยู่โดยทั่วไปมีหลายชนิดซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติโดยทั่วๆไป ที่แตกต่างกันดังแสดงให้เห็นในตัวอย่างที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

3.2.1 MU radar

MU radar เป็นระบบเรดาร์ขนาดใหญ่ใช้วัดและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศ ในระดับกลางและระดับบน (Middle and upper atmosphere) ใช้สำหรับงานวิจัยทั้งภายในและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

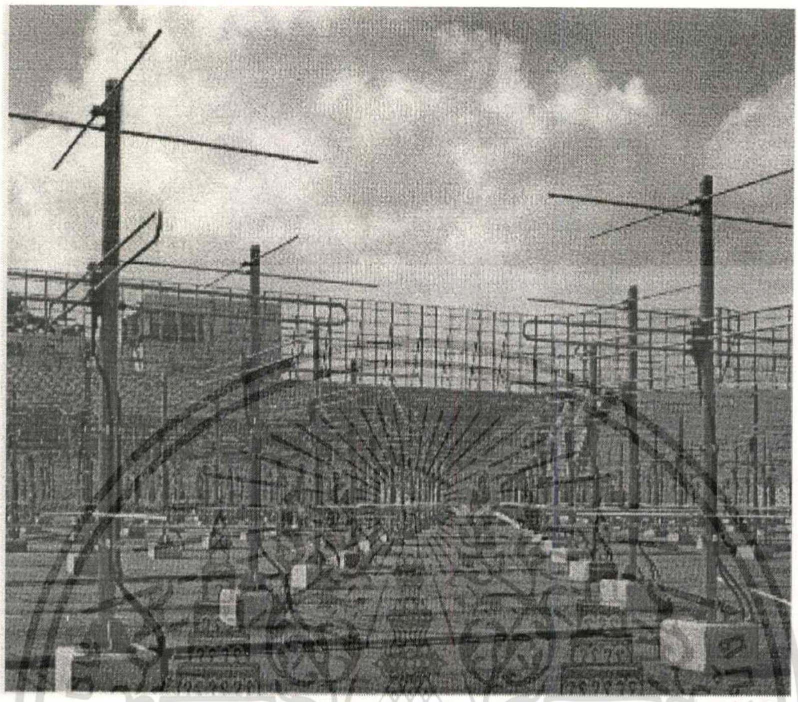
ระหว่างประเทศโดยการร่วมมือกันกับกลุ่มผู้วิจัย ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วๆ ไปของระบบ MU radar ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และแสดงรูปตัวอย่างของสายอากาศที่ใช้ในรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบ MU radar

สถานที่ที่ทำการติดตั้ง	Shigaraki, Shiga, Japan (34°51'N, 136°06'E)
ระบบเรดาร์	monostatic pulse radar active phased array system
ความถี่ที่ใช้งาน	46.5MHz
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	50 kW
Pulse repetition frequency (PRF)	2.5 kHz maximum
ความกว้างของพัลส์ (Pulse width)	1-500 micro sec
Receiver dynamic range	1.65MHz
Polarization	linear and circular

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 สายอากาศของ MU radar



3.2.2 RASC Boundary Layer Radar

RASC Boundary Layer Radar (RASC BLR) เป็นระบบเรดาร์ที่ใช้สังเกตการเปลี่ยนแปลงในการเคลื่อนไหวของอนุภาคในอากาศในชั้นบรรยากาศระดับล่าง (Boundary layer) ในระยะตั้งแต่ 10 เมตร ไปจนถึง 2 หรือ 3 กิโลเมตร เมื่อวัดในระดับที่อยู่เหนือจากพื้นผิวโลกขึ้นไป

ปัจจุบันนี้มีการติดตั้ง RASC BLR ไว้ที่ PUSPIPTEK (National Center for Research, Science and Technology) ในเมือง Serpong , West Java ที่ประเทศอินโดนีเซีย (Indonesia) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของบรรยากาศในเขตร้อน ดังแสดงสายอากาศที่ใช้ในรูปที่ 3.4 และแสดงคุณสมบัติโดยทั่วไปที่ใช้ในตารางที่ 3.4 ระบบ RASC BLR นี้จะทำงานโดยอัตโนมัติและทำการประมวลผลของข้อมูลทั้งหมดด้วยการแปลงฟูเรียร์จากนั้นเก็บข้อมูลไว้ในวีดีโอเทปขนาด 8 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 RASC Boundary Layer Radar ที่ติดตั้งที่ประเทศอินโดนีเซีย

ตารางที่ 3.3 คุณลักษณะที่ใช้ใน RASC Boundary Layer Radar ที่ติดตั้งที่อินโดนีเซีย

ความถี่ที่ใช้ส่ง	L-band; UHF ที่ความถี่ 1,397.5 MHz
สายอากาศที่ใช้	จานพาราโบลาร์ 3 ตัว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เมตร
มุมของสายอากาศ	0^{o} (Vertical) 15^{o} (Northward) 15^{o} (Eastward) ทำการคำนวณองค์ประกอบความเร็วลม 3 ค่าตามจำนวนบีม

3.2.3 NOAA Profiler Network (NPN)

ระบบวินด์โปรไฟเลอร์ที่ติดตั้งใน NOAA Profiler Network (NPN) ทำงานอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการแซมปลิ้งทุกๆ 1 นาทีระหว่าง low และ high mode ซึ่งข้อแตกต่างของ low mode และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

high mode คือ low mode จะทำการแซมเปิ้ลสัญญาณในชั้นบรรยากาศระดับล่าง (Lower atmosphere) โดยวัดระยะความสูงเริ่มแรกที่ 500 เมตร เมื่อวัดจากพื้นดิน จนถึงระยะความสูง 9.25 กิโลเมตร ส่วน high mode จะวัดระยะความสูงเริ่มแรกที่ 7.5 กิโลเมตร เทียบกับระดับพื้นดิน จนถึงระยะความสูงประมาณ 16.25 กิโลเมตร สามารถพิจารณาคุณลักษณะโดยทั่วๆ ไปของระบบวินด์โปรไฟเลอร์ชนิดนี้ได้ดังแสดงในตารางที่ 3.4

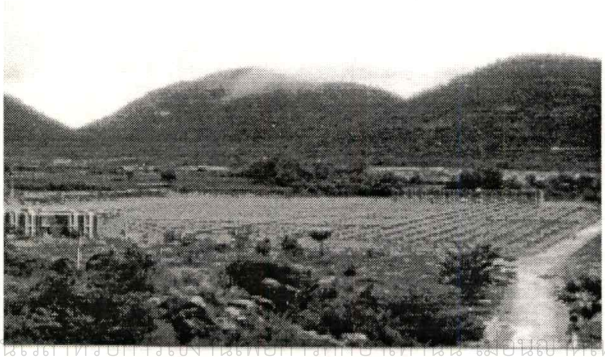
ตารางที่ 3.4 คุณลักษณะที่ใช้ในวินด์โปรไฟเลอร์ของ NOAA Profiler Network (NPN)

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

3.2.4 MST radar

MST radar ย่อมาจาก Mesosphere, Stratosphere, Troposphere radar ใช้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของลม คลื่น การเปลี่ยนแปลงในบรรยากาศ ตลอดจนการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ สำหรับ MST radar ติดตั้งอยู่ที่ประเทศอินเดียโดยมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 MST radar ที่ประเทศอินเดีย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของ MST radar

ความถี่ที่ใช้งาน	53 MHz
Peak power aperture product	3 x 10^{10} W.m^2
ระยะทางที่วัดได้	5 – 10 กิโลเมตร
Spatial resolution Range Angle	 150 เมตร (pulse width) 3^{O} (Beam width)
Velocity resolution	0.1 เมตรต่อวินาที
Time resolution	0.5 นาที

3.3 วินด์โปรไฟเลอร์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วินด์โปรไฟเลอร์ที่ติดตั้ง ณ บริเวณอาคารสมเด็จพระเทพฯ ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทำการศึกษาและวัดข้อมูลของลมด้วยการควบคุมของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่สัมพันธ์กับการทำงานของระบบเรดาร์แล้วได้ผลการวัดข้อมูลในชั้นบรรยากาศอย่างต่อเนื่อง

3.3.1 คุณลักษณะทั่วไป

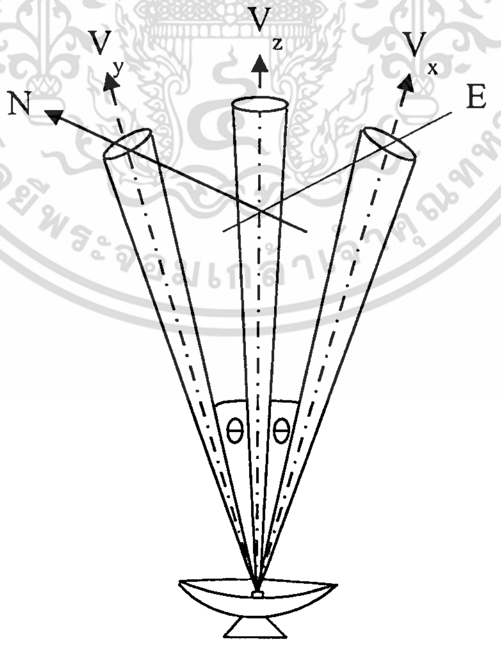
วินด์โปรไฟเลอร์ที่ติดตั้งที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประกอบด้วยจานสายอากาศชนิดจานพาราโบลาร์ที่มีแกนปรับหมุนได้รอบทิศทางทำการควบคุมด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ทำการส่งและรับสัญญาณในจานเดียวกัน ทำงานในย่านความถี่ชนิด L แบนด์ ประกอบด้วยบีมของเรดาร์จำนวน 3 บีม คือ บีมในแนวดิ่ง (Zenith) บีมในแนวทิศเหนือ และบีมในแนวทิศตะวันออก โดยบีมในแนวทิศเหนือ และบีมในแนวทิศตะวันออกจะทำมุมกับบีมในแนวดิ่ง (θ) เป็นค่าน้อยๆ เพราะถือว่าข้อมูลลมที่วัดได้ในแต่ละแนวบีมที่ระดับความสูงเดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน (Homogeneous) วินด์โปรไฟเลอร์นี้ทำการวัดข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องโดยทำการวัดสัญญาณสะท้อนของอนุภาคในบรรยากาศในแต่ละบีม โดยทำการวัดและบันทึกสัญญาณทีละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บีมของเรดาร์จากนั้นทำการสแกนไปยังบีมถัดไปจนครบ 3 บีม แล้วเริ่มทำการวัดใหม่ต่อไปจนกว่าเครื่องคอมพิวเตอร์จะเกิดการหยุดชงักการทำงาน อาจจะเนื่องมาจากอาการ hang ของเครื่อง หรือแผ่นบันทึกข้อมูลที่ใช้เก็บเต็ม หรือ สาเหตุอื่นๆ เป็นต้น

วิธีดังกล่าวนี้ เรียกว่า วิธี Doppler–Beam–Swing (DBS) โดยทั่วไปนิยมใช้จานสายอากาศเพียงจานเดียวทำหน้าที่ทั้งส่ง และรับสัญญาณ (Monostatic radar) โดยติดตั้งระบบเรดาร์บนพื้นดินวัดความเร็วลมโดยอาศัยหลักการของดอปเปลอร์เรดาร์ โดยทางด้านส่งทำการส่งสัญญาณพัลส์คลื่นความถี่ไมโครเวฟต่ามแนวบีมของเรดาร์จำนวน 3 บีม คือ บีมในแนวดิ่ง และบีมในแนวที่ทำมุม θ เมื่อเทียบกับแนวดิ่งไปทางทิศเหนือ และทิศตะวันออก ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เมื่อสัญญาณที่ส่งออกไปกระทบกับอนุภาคต่างๆ ในบรรยากาศในแต่ละระดับความสูงจะสะท้อนและมีสัญญาณสะท้อนส่วนหนึ่งสะท้อนกลับมายังจานสายอากาศ ซึ่งเป็นสัญญาณที่รับได้ในเวลาต่างๆ แสดงให้เห็นถึงลักษณะของอากาศในแต่ละระดับความสูงที่ทำการวัดสัญญาณ

รูปที่ 3.6 การวัดความเร็วลมด้วยบีมเรดาร์จำนวน 3 บีม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 รายละเอียดทางเทคนิค

วินด์โปรไฟเลอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ไมโครเวฟทำงานที่ความถี่ 1,357.5 MHz ใช้จานสายอากาศแบบจานพาราโบลาร์ที่มีแกนปรับหมุนได้รอบทิศทางทำการควบคุมด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ทำการส่ง และรับสัญญาณในจานเดียวกัน โดยทำการวัดข้อมูลใน 3 ทิศทางตามแนวบีมของเรดาร์จำนวน 3 บีม อย่างต่อเนื่องในทุกๆ 5 นาที มุมระหว่างบีมที่ใช้ (θ) เท่ากับ 15 องศาเทียบกับบีมในแนวดิ่ง

การวัดความเร็วลมในที่นี้ใช้บีมของสายอากาศจำนวน 3 บีม ทำการวัดความเร็วของลมใน 3 ทิศทาง ที่แต่ละระดับความสูง โดยทำการวัดระดับความสูงเริ่มต้นตามการหาระยะทางของเรดาร์ในสมการที่ 6 และระยะถัดไปจะเพิ่มระดับความสูงในการวัดความเร็วของอนุภาคในบรรยากาศ ซึ่งก็คือ ลม ทุกๆ ระยะที่คำนวณได้ตามสมการที่ 8 จนถึงระดับความสูงที่มากที่สุดที่ระบบสามารถวัดได้ดังแสดงไว้ในสมการที่ 9

$$R_{inc} = \frac{c \times (sampling\ rate)}{2} \qquad \text{.........} (8)$$

เมื่อ R_{inc} เป็นระยะทางในแต่ละระดับที่ทำการสังเกต (Height spacing)

c เป็นความเร็วแสง (3×10^8 เมตรต่อวินาที)

$$R_{max} = \frac{c \times IPP}{2} \qquad \text{.........} (9)$$

เมื่อ R_{max} เป็นระยะทางสูงสุดที่สามารถวัดข้อมูลได้

c เป็นความเร็วแสง (3×10^8 เมตรต่อวินาที)

IPP เป็นคาบเวลาในการส่งพัลส์แต่ละลูก (Inter-pulse period)

ค่าความเร็วตามแนวบีม (V_0) (Velocity resolution) อาศัยหลักการของปรากฏการณ์ดอปเปลอร์หาค่าความเร็วจากสมการที่ 5 คือ

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

ดังนั้นหาค่า V_0 ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_0 = \frac{\Delta f}{f} \cdot \frac{c}{2} \qquad \text{......... (10)}$$

เมื่อ V เป็นความเร็วของอนุภาคในบรรยากาศอันเป็นผลเนื่องจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์

V_0 เป็นความเร็วตามแนวบีม (Velocity resolution)

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

f เป็นความถี่ที่เรดาร์ใช้ส่งคลื่น

Δf เป็นความถี่ที่เปลี่ยนไป (Doppler frequency shiftหรือ Frequency change) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 11

$$\Delta f = \frac{1}{(IPP)(\#COH)(\#FFT)} \qquad \text{......... (11)}$$

เมื่อ IPP เป็นคาบเวลาในการส่งพัลส์แต่ละลูก

#COH เป็นจำนวนครั้งในการทำ Coherent integration

#FFT เป็นจำนวนในการแปลงฟาสท์ฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform)

ดังนั้นจะได้ว่า ประสิทธิภาพในการวัดสามารถวัดข้อมูลของวินด์โปรไฟเลอร์นี้สามารถทำการวัดที่ระดับความสูงเริ่มต้นเมื่อเทียบระดับความสูงจากพื้นดินที่ระยะ 150 เมตร ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 6 เมื่อเวลาที่คลื่นเดินทางไปยังอนุภาคในอากาศแล้วสะท้อนสัญญาณกลับมายังจานรับสัญญาณเรดาร์ ซึ่งก็คือ ความกว้างของพัลส์ (Pulse width) มีค่าเท่ากับ 1 ไมโครวินาที และระยะความสูงถัดไปสามารถวัดได้เพิ่มขึ้นทุกๆ ระยะ 75 เมตร ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 8 และค่าของ sampling rate ในตารางที่ 3.6 ได้ระยะทางสูงสุดที่ระบบสามารถวัดได้อยู่ที่ระยะประมาณ 7.5 กิโลเมตร ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 9 และค่าของ IPP ในตารางที่ 3.6 แต่ในที่นี้ได้ทำการแซมปลิ้งสัญญาณจำนวน 60 ระดับ จึงวัดได้จนถึงระยะความสูงประมาณ 4.575 กิโลเมตร ค่าความละเอียดของความเร็วตามแนวบีม (Velocity resolution) ในระบบนี้เท่ากับ 0.17236 เมตร/วินาที ต่อหนึ่งจุด FFT ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 10 และค่าของ IPP, #COH และ #FFT ในตารางที่ 3.6 เช่นกัน

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กับ Wind profiler ที่ติดตั้งที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แสดงไว้ในตารางที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวินด์โปรไฟเลอร์ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความถี่ของเรดาร์ที่ใช้	1,357.5 MHz
Peak power ที่ส่ง	1 kW
IPP (Inter-pulse period)	50 μs
ความกว้างของพัลส์ (Pulse width)	1 μs
(ความสูงเริ่มต้นที่วัดได้	150 m)
อัตราการแซมปลิ้งสัญญาณ	0.5 μs
(ความสูงในการวัดระยะถัดไปเพิ่มขึ้นทุกๆ	75 m)
จำนวนครั้งในการทำ Coherent integration (Coherent number)	100
จำนวนจุดในการแปลงฟาสท์ฟูเรียร์ (number of FFT)	128
ช่วงเวลาที่ทำการวัดข้อมูลแต่ละครั้ง	5 min.
ชนิดของสายอากาศ	จานสายอากาศแบบพาราโบลาร์
ความกว้างของบีมสายอากาศ	3.9 degree
ทิศทางของบีม (Azimuth, Elevation)	แนวดิ่ง (0, 0), ทิศตะวันออก (90, 15), ทิศเหนือ (0, 15)

3.3.3 ข้อมูลที่บันทึกโดยระบบ

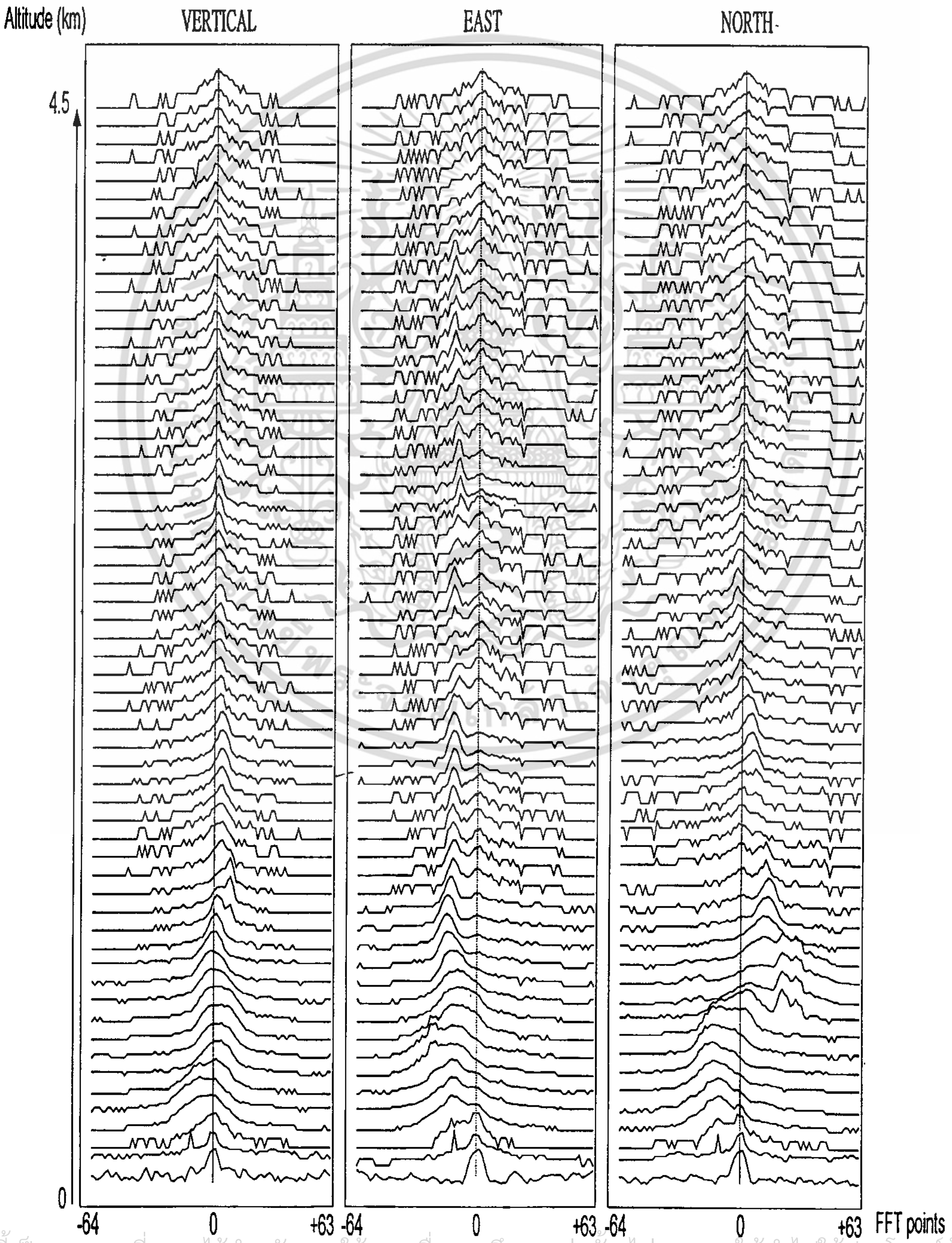
ข้อมูลที่บันทึกด้วยระบบนี้ในทุกๆ 5 นาที ประกอบด้วยค่าสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคในบรรยากาศที่ระดับความสูงจำนวน 60 ระดับ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวประกอบด้วยสเปคตรัมซึ่งได้จากการคำนวณฟาสท์ฟูเรียร์ (FFT : Fast Fourier Transform) ของสัญญาณเรดาร์ที่สะท้อนกลับจำนวน 3 ชุด อันเนื่องมาจากการยิงบีมเรดาร์จำนวน 3 บีม ในแต่ละชุดประกอบด้วยสเปคตรัมของข้อมูลจากการคำนวณฟาสท์ฟูเรียร์ 128 จุด จำนวน 60 เส้นสเปคตรัมของสัญญาณ ดังแสดงตัวอย่างของข้อมูลดังกล่าวในรูปที่ 3.7 เมื่อพิจารณาข้อมูลในแต่ละระดับ หรือ สเปคตรัม 128 จุดเพียงเส้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า ค่ากึ่งกลางของข้อมูลอยู่ที่ความถี่ศูนย์ โดยมีช่วงความถี่อยู่ระหว่าง –64 ถึง 63 จุด FFT ช่วงดังกล่าวมีความหมายในการตีความทิศทางการพัดของลม คือ

- แถบความถี่ทางด้านบวกจะแสดงถึงทิศทางลมพัดเข้าหาจานรับสัญญาณ
- แถบความถี่ทางด้านลบจะแสดงถึงทิศทางลมพัดออกจากจานรับสัญญาณ

รูปที่ 3.7 ตัวอย่างของข้อมูลที่บันทึกจาก Wind profiler จำนวน 1 ชุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 สรุป

วินด์โปรไฟเลอร์เป็นชื่อเรียกเฉพาะที่รู้จักกันในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศที่ใช้สำหรับวัดอนุภาคในบรรยากาศเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความเร็วของลม ในระบบที่ใช้กันอยู่จริงนั้นมีติดตั้งอยู่หลายแห่งกระจายไปตามพื้นที่ต่างๆ สำหรับวินด์โปรไฟเลอร์ที่ติดตั้งในประเทศไทยที่ตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนี้ทำการวัดได้ในชั้นบรรยากาศระดับล่างที่เรียกว่า Boundary layer การทำงานของวินด์โปรไฟเลอร์อาศัยเป็นลักษณะของพัลส์ดอปเปลอร์เรดาร์โดยทำการวัดสัญญาณความถี่ดอปเปลอร์ของอนุภาคในบรรยากาศขณะที่ทำการวัดสัญญาณแล้วนำสัญญาณสะท้อนดังกล่าวมาประมวลผลสัญญาณก่อนจะนำไปคำนวณหาค่าความเร็วของลมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง

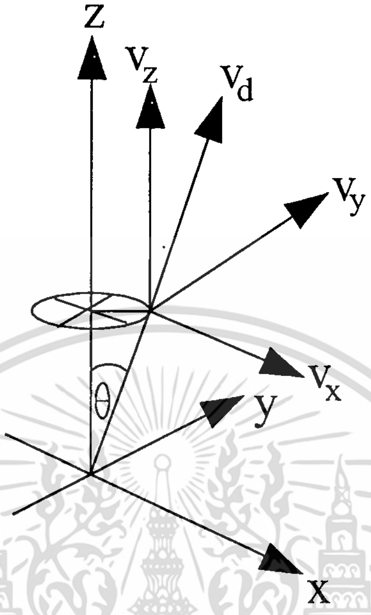
ข้อมูลที่บันทึกได้จากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศไม่สามารถนำมาสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของลมได้ในทันที หากแต่ต้องนำเอาข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์และหาวิธีการคำนวณที่เหมาะสมเพื่อพิจารณาค่าความเร็วและทิศทางของลมก่อน โดยทำการคำนวณหาเวกเตอร์ของลมใน 3 มิติ $(u \quad v \quad w)^T$ ตามแนวบีมของเรดาร์ซึ่งในแต่ละบีมจะมีค่าของสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคในบรรยากาศที่ 60 ระดับความสูง โดยเก็บบันทึกไว้ในไฟล์ข้อมูล เราได้นำเอาข้อมูลดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีพีคเพาเวอร์ เพื่อคำนวณหาความเร็วลมในแนวบีมของเรดาร์ และทำการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต และค่าเฉลี่ยแบบคอนเซนซัสเพื่อแสดงเป็นโปรไฟล์ (Wind profile) ของลม

4.1 การคำนวณหาเวกเตอร์ของลม

การหาความเร็วลมพิจารณาจากค่าสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคในบรรยากาศ ในแต่ละระดับความสูง ซึ่งเป็นความถี่ที่สัมพันธ์กับความเร็วของอนุภาคในอากาศเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler effect) โดยสามารถพิจารณาค่าความเร็วของลมใน 3 ทิศทางจากบีมเรดาร์ 3 บีม เป็นเวกเตอร์องค์ประกอบความเร็วลมใน 3 ทิศทาง คือ ทิศทางในแนวดิ่ง แนวเหนือ – ใต้ และแนวตะวันออก – ตะวันตก ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จึงสามารถหาความเร็วลมในแนวดิ่ง (v_z) ได้จากการวัดด้วยบีมเรดาร์ในแนวดิ่ง ส่วนอีก 2 บีม ซึ่งทำมุม θ กับแนวดิ่งโดยที่ v_y และ v_x สามารถนำมาหาค่าความเร็วในแนวทิศเหนือ และทิศตะวันออกได้ พิจารณาองค์ประกอบความเร็วลมในแนวระดับเส้นสายตา หรือในแนวระนาบ (line–of–sight) ในแต่ละระดับความสูง หรือความเร็วดอปเปลอร์ เขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 องค์ประกอบที่ใช้พิจารณาความเร็วลมโดยใช้วิธี Velocity-Azimuth Display (VAD)



ค่าความเร็วตามแนวบีม (V_0) (Velocity resolution) จากสมการที่ 10 และค่า #FFT จากตารางที่ 3.1 จะสามารถคำนวณหาความเร็วสูงสุดที่ระบบเรดาร์สามารถวัดได้จาก

$$V_{max} = V_0 \cdot \frac{\#FFT}{2} \quad \text{.........} (14)$$

เมื่อ V_{max} เป็นความเร็วสูงสุดที่เรดาร์สามารถวัดได้

V_0 เป็นค่าความเร็วตามแนวบีม (Velocity resolution)

#FFT เป็นจำนวนในการแปลงฟาสท์ฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform)

จากสมการที่ 13 เวกเตอร์ความเร็วลม[2] คือ เวกเตอร์ความเร็วลมในสามมิติ $(u \ v \ w)^T$ ซึ่งสามารถหาค่า $(u \ v \ w)^T$ ได้จากโปรเจคชั่นของ v_x, v_y และ v_z ลงบนระนาบ และแกนตั้ง ดังแสดงเป็นสมการได้ดังนี้ [Steven F. Clifford (1994 : 314)]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u = v_x \csc\theta - v_z \cot\theta \quad \text{......... (15)}$$

$$v = v_y \csc\theta - v_z \cot\theta \quad \text{......... (16)}$$

$$w = v_z \quad \text{......... (17)}$$

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

4.1.1 การคำนวณความเร็วในแนวบีมโดยวิธีพีคเพาเวอร์

การประมาณความเร็วลมที่เกิดขึ้นในแนวบีมของเรดาร์ด้วยวิธีพีคเพาเวอร์ ทำได้โดยการค้นหาความถี่ของสัญญาณดอปเปลอร์สเปคตรัมที่มีระดับพลังงานสูงสุด นั่นคือ เป็นค่าพลังงานของสัญญาณตำแหน่งที่ให้ค่าความถี่ของสเปคตรัมในแต่ละระดับความสูงมีแอมปลิจูดของสัญญาณสูงที่สุด (พรพรรณ์ คุลยกาญจน์ 2540 : 650) ซึ่งรูปที่ 3.4 เป็นตัวอย่างของข้อมูลที่ได้จากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศหนึ่งชุด โดยนำมาพล๊อตเป็นสเปคตรัมของสัญญาณ และสามารถนำมาใช้คำนวณหาค่าความเร็วของลมในแต่ละบีมได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{bh} = P_{bh} \cdot V_0 \quad ; \; b = 1,2 \text{ and } 3, \;\; h = 1,2,...,60 \qquad .... (18)$$

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

P_{bh} เป็นตำแหน่งทางความถี่ที่ค้นหาได้โดยวิธีพีคเพาเวอร์ในแต่ละเส้นสเปคตรัม ซึ่งมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มอยู่ระหว่าง –64 ถึง 63

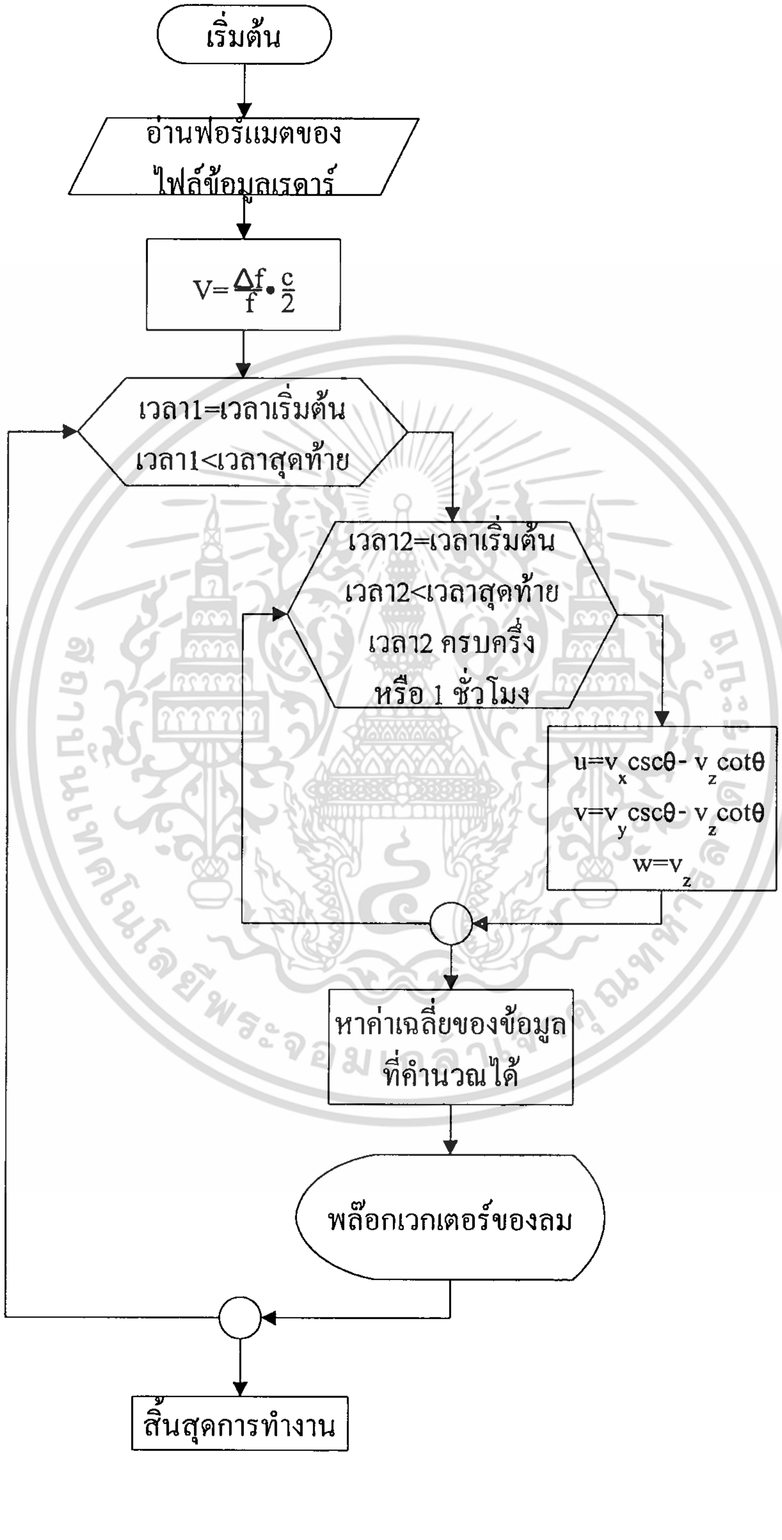
V_0 เป็นค่าความเร็วตามแนวบีม (Velocity resolution) ของระบบ

สำหรับขั้นตอนการทำงานในโปรแกรมด้วยวิธีพีคเพาเวอร์เขียนแสดงเป็นแผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงาน (Flow chart) ได้ดังในรูปที่ 4.2

\

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานโดยใช้วิธีพีคเพาเวอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการทดลอง

สำหรับการคำนวณความเร็วในแนวบีมทั้ง 3 บีมของเรดาร์ด้วยวิธีพีคเพาเวอร์นั้น เราสามารถนำเอาข้อมูลที่บันทึกจากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศที่บันทึกข้อมูลได้ในทุกๆ คาบเวลา 5 นาที มาทำการคำนวณได้ทันที ซึ่งในตารางที่ 4.1 เป็นการแสดงตัวอย่างการคำนวณค่าของข้อมูลที่บันทึกได้จากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2541 ของเวลา 00.00 – 00.05 น. โดยใช้สมการที่ 18, 15, 16 และ 17 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของข้อมูลที่บันทึกจากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศของวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2541 เวลา 00.00-00.05 น.

ลำดับความสูงที่	ความเร็วในแนวบีม (เมตร/วินาที)			เวคเตอร์ของลม		
	V_x	V_y	V_z	u	v	w
1	10.86982	10.86982	1.552832	-36.20251	-36.20251	-15.52832
2	1.552832	1.552832	11.21489	35.85487	35.85487	-112.1489
3	10.86982	10.86982	10.69728	-2.074955	-2.074955	-106.9728
4	4.658494	4.658494	11.38743	24.49943	24.49943	-113.8743
5	10.86982	10.86982	11.21489	-.1432064	-0.1432064	-112.1489
6	10.86982	10.86982	11.21489	-.1432064	-0.1432064	-112.1489
7	10.86982	11.21489	12.07758	3.076375	1.743113	-120.7758
8	11.21489	11.55997	12.07758	1.743113	0.4098502	-120.7758
9	11.7325	11.55997	11.7325	-1.544614	-0.8779824	-117.3251
10	11.7325	11.21489	11.38743	-2.832446	-0.8325526	-113.8743
11	11.7325	11.21489	11.55997	-2.18853	-0.1886363	-115.5997
12	12.25012	11.21489	11.55997	-4.188424	-0.1886363	-115.5997
13	12.25012	11.38743	11.55997	-4.188424	-0.8552675	-115.5997
14	12.59519	11.38743	11.55997	-5.521686	-0.8552675	-115.5997
15	12.76773	11.38743	11.38743	-6.832233	-1.499184	-113.8743

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ ความ สูงที่	ความเร็วในแนวบีม (เมตร/วินาที)			เวคเตอร์ของลม		
	V_x	V_y	V_z	U	V	W
16	13.45787	11.21489	11.21489	-10.14267	-1.476469	-112.1489
17	13.80295	11.21489	11.38743	-10.83202	-0.8325526	-113.8743
18	13.97548	11.21489	11.21489	-12.14257	-1.476469	-112.1489
19	13.1128	10.86982	11.21489	-8.809412	-0.1432064	-112.1489
20	13.1128	10.86982	11.21489	-8.809412	-0.1432064	-112.1489
21	12.76773	10.86982	11.21489	-7.47615	-0.1432064	-112.1489
22	12.76773	10.86982	11.21489	-7.47615	-0.1432064	-112.1489
23	12.94026	10.86982	11.21489	-8.142781	-0.1432064	-112.1489
24	12.94026	10.86982	11.21489	-8.142781	-0.1432064	-112.1489
25	10.86982	10.69728	11.21489	-0.1432064	0.5234247	-112.1489
26	12.59519	10.52475	11.21489	-6.809518	1.190056	-112.1489
27	12.59519	10.52475	11.21489	-6.809518	1.190056	-112.1489
28	12.42265	10.86982	11.21489	-6.142887	-0.1432064	-112.1489
29	12.42265	10.86982	11.21489	-6.142887	-0.1432064	-112.1489
30	12.42265	10.86982	11.21489	-6.142887	-0.1432064	-112.1489
31	10.86982	10.86982	10.86982	-1.431039	-1.431039	-108.6982
32	10.86982	10.86982	10.86982	-1.431039	-1.431039	-108.6982
33	10.86982	10.86982	10.86982	-1.431039	-1.431039	-108.6982
34	10.86982	10.86982	10.86982	-1.431039	-1.431039	-108.6982
35	11.21489	10.86982	10.86982	-2.764302	-1.431039	-108.6982
36	11.21489	10.86982	10.86982	-2.764302	-1.431039	-108.6982
37	11.21489	10.86982	10.86982	-2.764302	-1.431039	-10.86982
38	11.21489	10.69728	10.86982	-2.764302	-0.7644078	-108.6982
39	11.21489	10.86982	10.86982	-2.764302	-1.431039	-108.6982
40	12.07758	9.834599	10.86982	-6.097457	2.568748	-108.6982
41	11.21489	9.662063	10.86982	-2.764302	3.235379	-108.6982
42	11.21489	10.00714	10.86982	-2.764302	1.902117	-108.6982

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับความสูงที่	ความเร็วในแนวบีม (เมตร/วินาที)			เวคเตอร์ของลม		
	V_x	V_y	V_z	U	V	W
43	11.21489	10.86982	10.86982	-3.430933	-1.431039	-108.6982
44	11.38743	10.00714	10.86982	-3.430933	1.902117	-108.6982
45	11.38743	10.00714	10.86982	-1.431039	1.902117	-108.6982
46	10.86982	10.86982	10.86982	-2.764302	-1.431039	-108.6982
47	11.21489	10.86982	10.86982	-1.431039	-1.431039	-108.6982
48	10.86982	10.86982	10.86982	-1.431039	-1.431039	-108.6982
49	10.86982	10.86982	10.86982	-1.431039	-1.431039	-108.6982
50	10.86982	10.86982	10.86982	-1.431039	-1.431039	-108.6982
51	10.86982	10.86982	10.86982	-1.431039	-1.431039	-108.6982
52	10.86982	9.489526	10.86982	-1.431039	3.90201	-108.6982
53	10.86982	9.489526	10.86982	-1.431039	3.90201	-108.6982
54	10.86982	10.86982	10.86982	-1.431039	-1.431039	-108.6982
55	10.86982	10.86982	11.21489	-0.1432064	-.1432064	-112.1489
56	10.86982	10.86982	10.86982	-1.431039	-1.431039	-108.6982
57	10.17967	9.31989	10.86982	1.235486	4.568642	-108.6982
58	10.17967	9.144452	10.86982	1.235486	5.235273	-108.6982
59	10.86982	10.86982	10.86982	-1.431039	-1.431039	-108.6982
60	10.86982	10.86982	10.86982	-1.431039	-1.431039	-108.6982

4.2 การเฉลี่ยข้อมูลภายในคาบเวลา

การคำนวณหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลภายในคาบเวลาที่เราต้องการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของลม สามารถพิจารณาได้ 2 วิธี ดังจะได้กล่าวต่อไปคือ คำนวณค่าเฉลี่ยแบบเลขคณิต (Arithmatic Mean) และ การคำนวณค่าเฉลี่ยแบบคอนเซนซัส (Consensus Average) ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อย่อยต่อจากนี้ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mean) และ การคำนวณค่าเฉลี่ยแบบคอนเซนซัส (Consensus Average) ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อย่อยต่อจากนี้ไป

4.2.1 การคำนวณค่าเฉลี่ยเลขคณิต

ค่าเฉลี่ยเลขคณิตเป็นการรวมค่าของข้อมูลซึ่งก็คือ ความเร็วของลม ตามเครื่องหมายซึ่งก็คือทิศทางของลม เข้าด้วยกันตามจำนวนของคาบเวลาที่ต้องการหาค่าเฉลี่ย ซึ่งปกติแล้วข้อมูลหนึ่งชุดจะได้จากการวัดสัญญาณสะท้อนตามแนวบีมของเรดาร์ทั้ง 3 บีมใน 60 ระดับความสูงทุกๆ 5 นาที ซึ่งจะเห็นว่า บีมแต่ละบีมจะทำการวัดสัญญาณและรับสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคในบรรยากาศโดยใช้เวลาประมาณ นาทีเศษ ดังนั้นถ้าหากต้องการทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตของข้อมูลในทุกๆ ครึ่งชั่วโมง จะได้จากการนำเอาข้อมูลทั้งหมดใน ครึ่งชั่วโมง หารด้วยจำนวนชุดของข้อมูลทั้งหมดคือ 6 ชุดข้อมูลนั่นเอง ซึ่งสามารถเขียนเป็นแสดงได้ดังสมการที่ 19

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \qquad \text{.........} (19)$$

เมื่อ $\bar{x}$ เป็น ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของข้อมูลเรดาร์

$\sum_{i=1}^{n} x_i$ เป็นผลรวมของข้อมูลเรดาร์จำนวน n ข้อมูล

n เป็นจำนวนของข้อมูลเรดาร์ที่ใช้ในการหาค่าเฉลี่ย

4.2.2 การคำนวณค่าเฉลี่ยแบบคอนเซนซัส

ในการหาค่าเฉลี่ยของความเร็วลมที่คำนวณได้จากข้อมูลที่บันทึกด้วยระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ เพื่อนำมาใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลในช่วงเวลาที่ทำการสังเกต ต้องใช้ค่าที่จัดว่าเป็นข้อมูลกลุ่มเดียวกัน ซึ่งควรจะมีค่าที่ใกล้เคียงเกาะกลุ่มกัน โดยข้อมูลดังกล่าวได้มาจากสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคในบรรยากาศสะท้อนกลับมายังจานรับสัญญาณเรดาร์ โดยปกติแล้วค่าการสะท้อนสัญญาณของอนุภาคในบรรยากาศที่ระดับความสูงเดียวกันจะให้ค่าของข้อมูลที่ใกล้เคียงกัน เพราะถือว่าโดยทั่วไปแล้วอากาศในบริเวณเดียวกันมักจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันในสภาพอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น นก เครื่องบิน คลื่นแทรกจากคลื่นวิทยุอื่นๆ (Radio frequency interference) ตลอดจนสัญญาณอื่นๆ ที่ให้ค่าต่างไปจากค่าสัญญาณในกลุ่ม (inhomogeneities) ที่อยู่ภายในช่วงของการแซมปลิ้งสัญญาณในแนวบีมเรดาร์ทั้ง 3 บีม สัญญาณดังที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นสัญญาณที่ให้ค่าการสะท้อนที่ผิดพลาด ในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ ซึ่งค่าการสะท้อนนี้จะมีค่าระดับสัญญาณสะท้อนกลับที่แรงกว่าสัญญาณสะท้อนจากอนุภาคในบรรยากาศซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่ไม่ถูกต้องและไม่ต้องการวัด จึงจำเป็นจะต้องทำการขจัดสัญญาณที่ผิดพลาดดังกล่าวออกไปก่อนจะนำความเร็วลมในแต่ละช่วงเวลาที่ทำการสังเกตมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลที่ต้องการพิจารณา

วิธีการหาค่าเฉลี่ยแบบคอนเซนซัส (Consensus average) เป็นการนำเอาข้อมูลที่ได้จากการบันทึกโดยระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศมาหาค่าเฉลี่ยของความเร็วลม โดยในที่นี้ใช้ค่าความเร็วลมที่คำนวณได้จากวิธีพีคเพาเวอร์ในบทที่แล้วมาวิเคราะห์แล้วนำไปหาค่าเฉลี่ย ในการวิเคราะห์นี้เราใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัสเพื่อหาค่าตัวแทนของทิศทางและความเร็วลมในช่วงเวลาที่ทำการสังเกต โดยทำการเลือกข้อมูลเรดาร์ที่จัดเป็นข้อมูลกลุ่มเดียวกันมาใช้ และตัดข้อมูลที่ต่างกลุ่มออกไปเพราะถือว่าข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่ผิดพลาดซึ่งปนมากับการวัดอนุภาคในบรรยากาศแล้วถูกเก็บบันทึกไว้ในระบบเรดาร์

การหาค่าเฉลี่ยโดยวิธีคอนเซนซัสเป็นเทคนิควิธีหนึ่งที่ใช้ในการเลือก หรือปรับข้อมูลให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน (Smoothing technique) โดยทำการตัดเอาข้อมูลที่ให้ค่าแตกต่างไปจากกลุ่มมากๆ ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่ผิดพลาด (Error data) ออกไป แต่วิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัสจะมีข้อแตกต่างจากวิธีการปรับหรือเลือกข้อมูลกลุ่มเดียวกันวิธีอื่นๆ ซึ่งจะใช้จำนวนข้อมูลเริ่มต้นให้มากที่สุดในชุดข้อมูลใดๆ เพื่อใช้หาคำตอบเริ่มแรก จากนั้นจะพยายามตัดข้อมูลที่ผิดออกไป แต่วิธีคอนเซนซัสจะใช้ชุดของข้อมูลเริ่มต้นจำนวนน้อยที่สุดมาพิจารณาจากนั้นค่อยขยายจำนวนข้อมูลขึ้นเรื่อยๆ ถ้าข้อมูลดังกล่าวจัดว่าเป็นข้อมูลกลุ่มเดียวกับชุดของข้อมูลเริ่มต้นที่เลือกมาพิจารณา

ตัวอย่างการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้หลักการของวิธีคอนเซนซัส เช่น ในการหาส่วนโค้งของวงกลมในระนาบ 2 มิติ จะต้องเลือกชุดของข้อมูลเริ่มต้นจำนวน 3 จุด ซึ่งเป็นจำนวนข้อมูลที่น้อยที่สุดที่ใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นในการหาวงกลม 1 วง จากนั้นทำการคำนวณหาจุดศูนย์กลาง และรัศมีของวงกลม และทำการนับจุดที่อยู่ใกล้กับวงกลมเพื่อใช้ในการประมาณค่าหาส่วนโค้งของวงกลม ถ้ามีจุดบนส่วนโค้งของวงกลมที่เพียงพอแล้วจะทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของจุดที่ได้โดยใช้เทคนิคการประมาณค่าของข้อมูลให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันวิธีอื่นๆ เช่น วิธี Least square เพื่อคำนวณหาค่าของจุดบนส่วนโค้งของวงกลมที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัสสามารถทำได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

- กำหนดรูปแบบ (Model) ที่ใช้ข้อมูลจำนวนที่น้อยที่สุด n จำนวนเพื่อใช้เป็นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นอย่างอิสระ
- เลือกเซตข้อมูล P ซึ่งจำนวนจุดใน P มีค่ามากกว่า n (n(P) $\geq$ n)
- ทำการสุ่มเลือกสับเซตของเซต S1 ที่มีจำนวนเท่ากับ n ข้อมูลจากเซต P เพื่อใช้ในการกำหนดโมเดล (M1)
- ใช้รูปแบบ (Model) M1 หาสับเซต S1* ของจุดที่อยู่ในเซต P ซึ่งอยู่ภายในช่วงของค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ (Error tolerance) ของ M1 ซึ่งเรียกเซต S1* ว่าเป็นเซตที่คอนเซนซัสกับเซต S1 จากนั้นทำการตรวจสอบเงื่อนไขดังต่อไปนี้
- ถ้าจำนวนของ S1* มีค่ามากกว่าค่าเทรชโฮลด์ t ซึ่งเป็นฟังก์ชันในการประมาณค่าของจำนวนค่าผิดพลาดทั้งหมดในเซต P ให้ใช้เซต S1* ในการคำนวณหารูปแบบ (model) ใหม่ (M1*)
- ถ้าจำนวนของ S1* มีค่าน้อยกว่าเทรชโฮลด์ t ให้ทำการสุ่มเลือกสับเซตของเซต S2 ขึ้นมาใหม่และทำซ้ำตามขั้นตอนดังกล่าวข้างต้น ถ้าหลังจากกำหนดจำนวนในการทดลองขึ้นมาใหม่แล้วยังไม่มีเซตที่คอนเซนซัสกับ t หรือพบจำนวนสมาชิกที่มากกว่าจำนวนที่กำหนดขึ้นมาใหม่ ให้แก้ปัญหาโดยการเลือกรูปแบบที่ให้เซตที่คอนเซนซัสจำนวนมากที่สุดที่สามารถหาได้มาพิจารณา หรือสิ้นสุดการทำงานโดยถือว่าหาเซตที่คอนเซนซัสกันไม่ได้

ข้อสังเกต ในขั้นตอนของการสุ่มสามารถเลือกค่าลงไปได้เลยโดยไม่ต้องทำการสุ่ม

ตัวอย่าง วิธีการพิจารณาตามหลักการข้างต้น สมมติว่ามีข้อมูลดังต่อไปนี้

P = {10, 13, 15, 30, 22, 11}

จากข้อมูลในเซต P เลือก n = 2 เป็นจำนวนที่น้อยที่สุดในการกำหนดรูปแบบ (Model)
โดยที่ n(P) = 6 ซึ่งจะเห็นว่า ในที่นี้เซต P มีค่าเป็น 6 ซึ่งมากกว่า n (คือ 2)
(ในข้อกำหนด ให้พิจารณาจำนวนของเซต P มากกว่า หรือเท่ากับ n)
ทำการสุ่มเลือกค่าในเซต P มา 2 จำนวนซึ่งเท่ากับจำนวนของ n ในที่นี้เลือก 10 และ 22
กำหนดให้ค่าที่เลือก คือ 10 และ 22 เป็นค่าในเซตของ S1
กำหนดรูปแบบ M1 ดังนี้

M1 = ข้อมูล – (ค่าที่สุ่มเลือก / จำนวนค่าที่สุ่มเลือก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดค่าผิดพลาด = 10

หาสับเซต S1* ที่เป็นสับเซตของ P เทียบกับค่าผิดพลาดที่กำหนดโดยใช้รูปแบบ M1 มาพิจารณา

ได้ข้อมูลดังนี้ 10, 13, 15, 22, 11 ซึ่งเป็นเซตที่คอนเซนซัสกับเซตของ S1

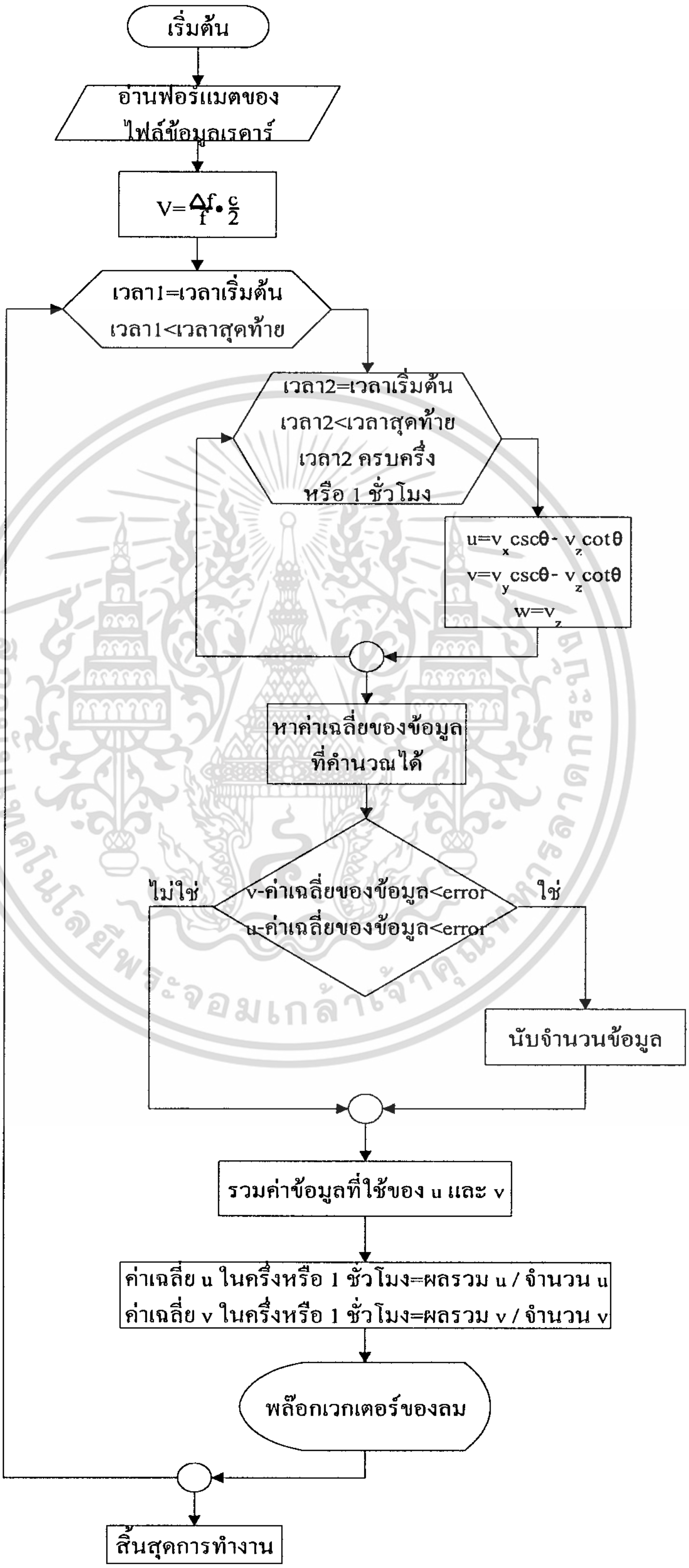
กำหนด $t = n(P) / 2 = 6 / 2 = 3$

ดังนั้น จะเห็นว่าข้อมูลที่เลือกมาใช้ได้ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่คอนเซนซัสกัน เนื่องจากจำนวนของ S1* มีค่ามากกว่า t

สำหรับขั้นตอนของโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัสสามารถแสงเป็นแผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงาน (Flow chart) ได้ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานโดยใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัส



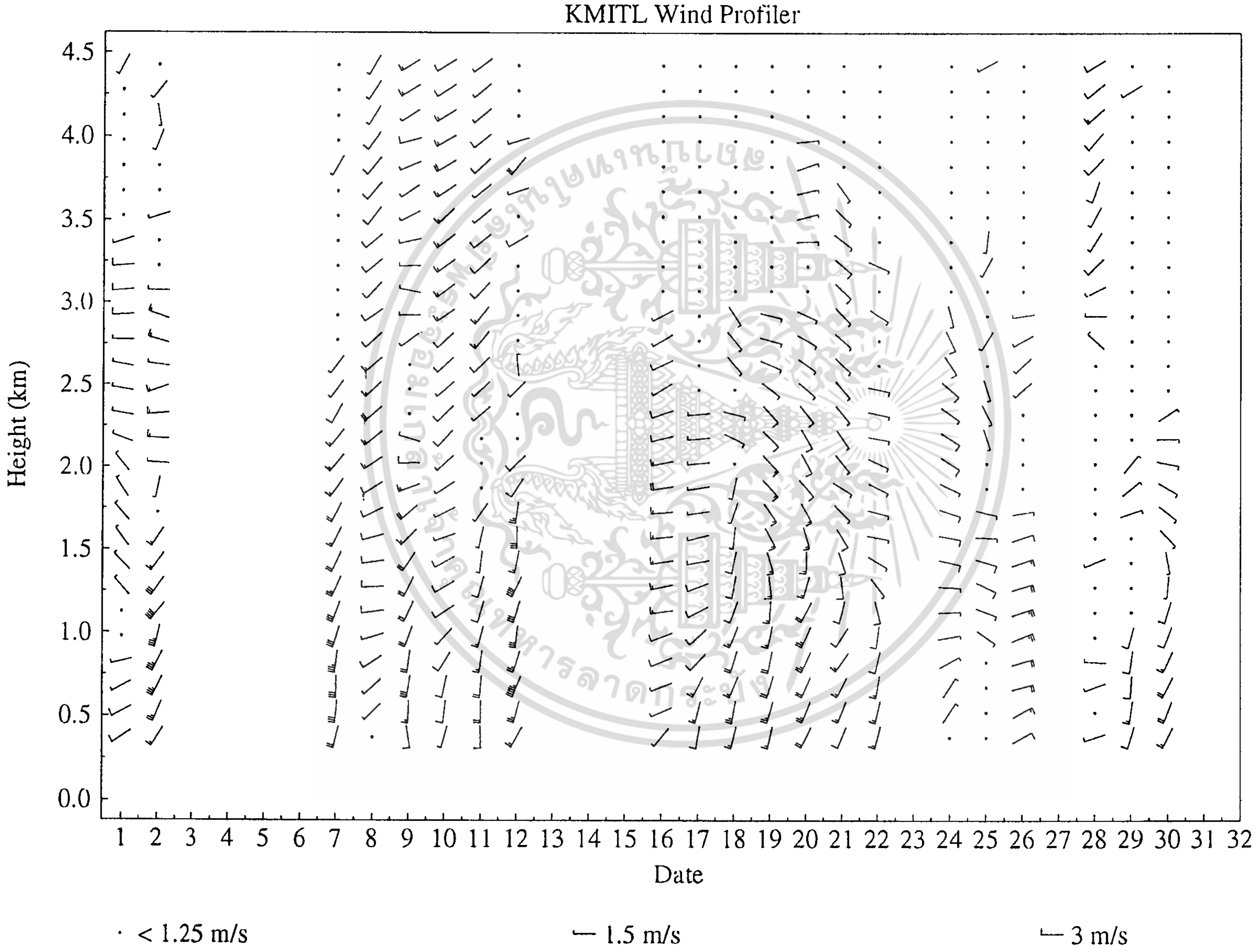
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการทดลอง

ข้อมูลเรดาร์ที่ผ่านขั้นตอนการคำนวณหา ความเร็วและทิศทางของลมในสมการที่ 19 แล้ว นำค่าดังกล่าวไปหาค่าเวกเตอร์ความเร็วของลมในสามมิติ $(u\ v\ w)^T$ ในสมการที่ 16, 17 และ 18 ต่อ จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลลมจากเวกเตอร์ $(u\ v\ w)^T$ ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัสตาม หลักการที่ได้กล่าวในหัวข้อที่แล้ว เพื่อพิจารณาค่าของข้อมูลเฉพาะกลุ่มข้อมูลกลุ่มเดียวกัน ในที่นี้ ใช้ค่า error ที่ 10.0 และค่า เทรชโฮลด์กำหนดได้จากการสุ่มค่าของข้อมูลมาจำนวน 2 ค่า แล้วหาค่า เฉลี่ยของข้อมูลทั้ง 2 ในการหาค่าเฉลี่ยนี้ทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยในช่วงคาบเวลาทุกๆ 1 ชั่วโมง แล้วนำค่าเฉลี่ยทุกๆ ชั่วโมง มาหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตภายใน 1 วัน จากนั้นนำค่าเฉลี่ยในแต่ละวันไป พล๊อตเป็นโปรไฟล์ของลมใน 1 เดือน ซึ่งพล๊อตเป็นเวกเตอร์แสดงความเร็ว และทิศทางของลม เทียบกับระดับความสูงของบรรยากาศที่ระบบสามารถวัดได้ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของลม ในแต่ละระดับความสูงที่เรดาร์วัดได้เป็นแกนตั้ง เทียบกับเวลาเป็นแกนนอน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 ส่วนรูปที่ 4.7 – 4.8 เป็นการพล๊อตโปรไฟล์ของลมโดยทำการหาค่าเฉลี่ยทุกๆ ครึ่งชั่วโมง เปรียบเทียบวิธีการหาค่าเฉลี่ยระหว่างวิธีหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตกับวิธีหาค่าเฉลี่ยแบบคอนเซนซัส

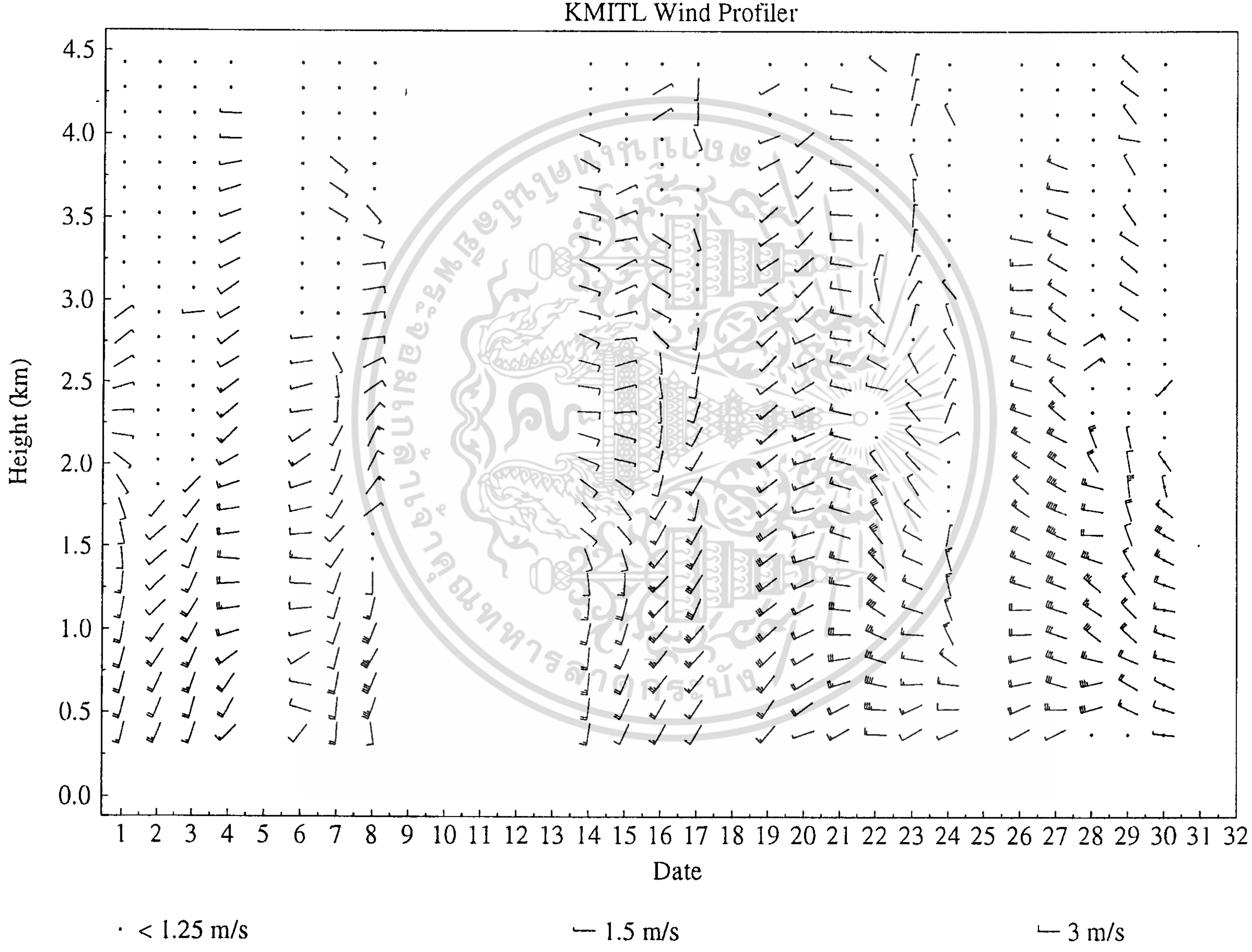
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 โปรไฟล์ของลมในระนาบทิศเหนือ-ตะวันออกของข้อมูลที่บันทึกด้วยระบบเรดาร์สำรวจบรรยากาศของเดือน เมษายน 2540 ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัสทุก 1 ชั่วโมง แล้วแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของลมโดยหาค่าเฉลี่ยของลมใน 1 วัน



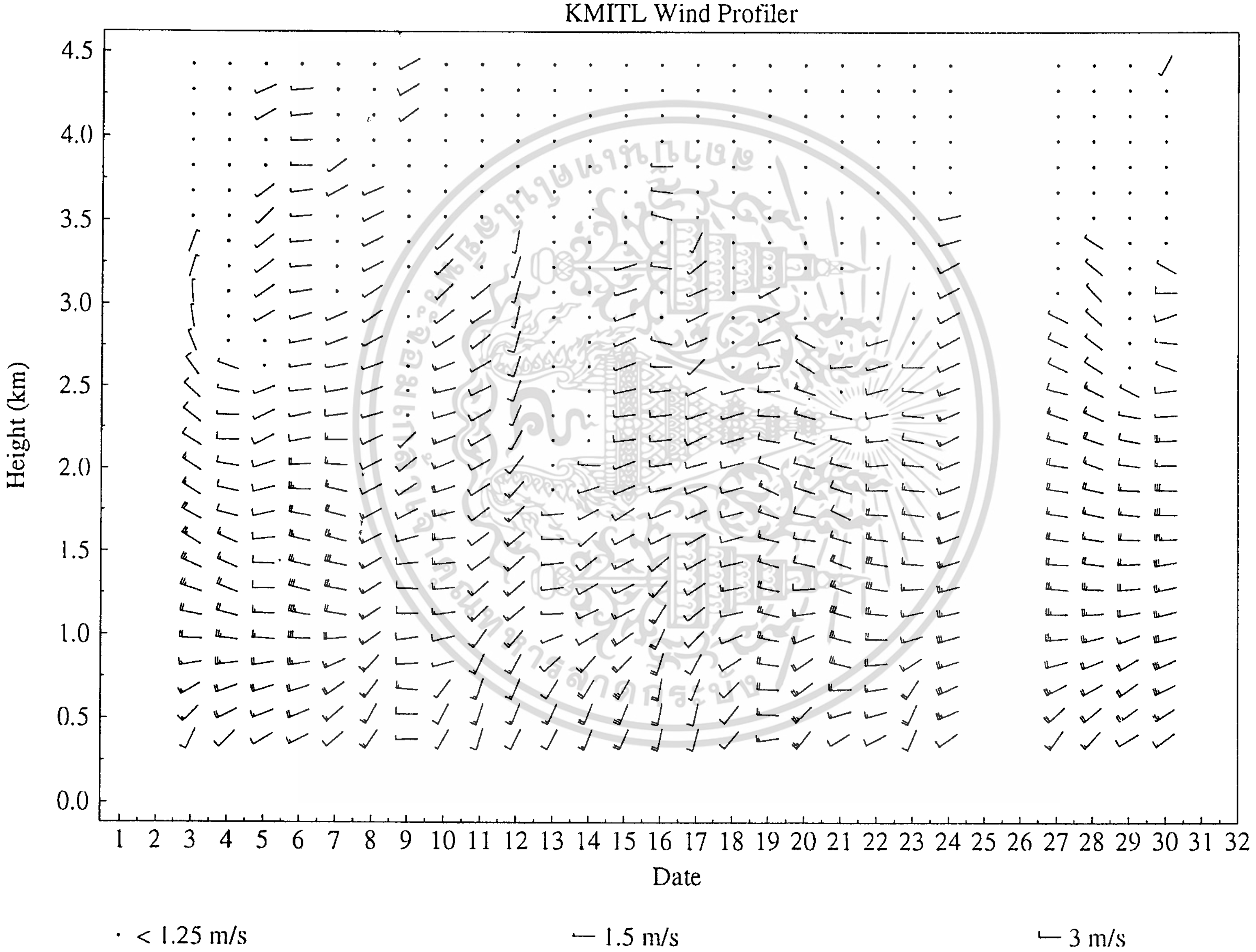
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 โปรไฟล์ของลมในระนาบทิศเหนือ-ตะวันออกของข้อมูลที่บันทึกด้วยระบบเรดาร์สำรวจบรรยากาศของเดือน พฤษภาคม 2540 ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัสทุก 1 ชั่วโมง แล้วแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของลมโดยหาค่าเฉลี่ยของลมใน 1 วัน



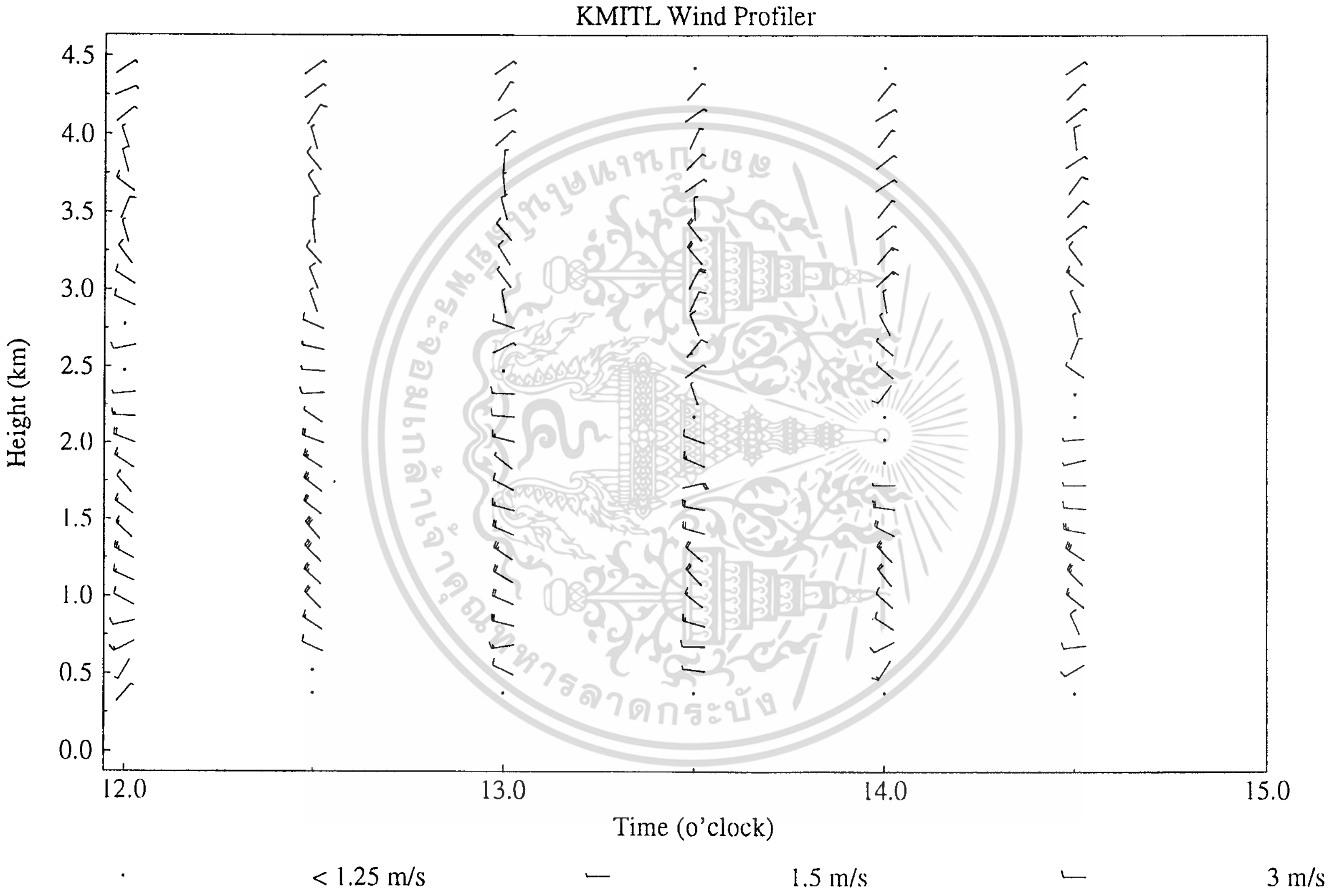
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 โปรไฟล์ของลมในระนาบทิศเหนือ-ตะวันออกของข้อมูลที่บันทึกด้วยระบบเรดาร์สำรวจบรรยากาศของเดือน มิถุนายน 2540 ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัสทุก 1 ชั่วโมง แล้วแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของลมโดยหาค่าเฉลี่ยของลมใน 1 วัน



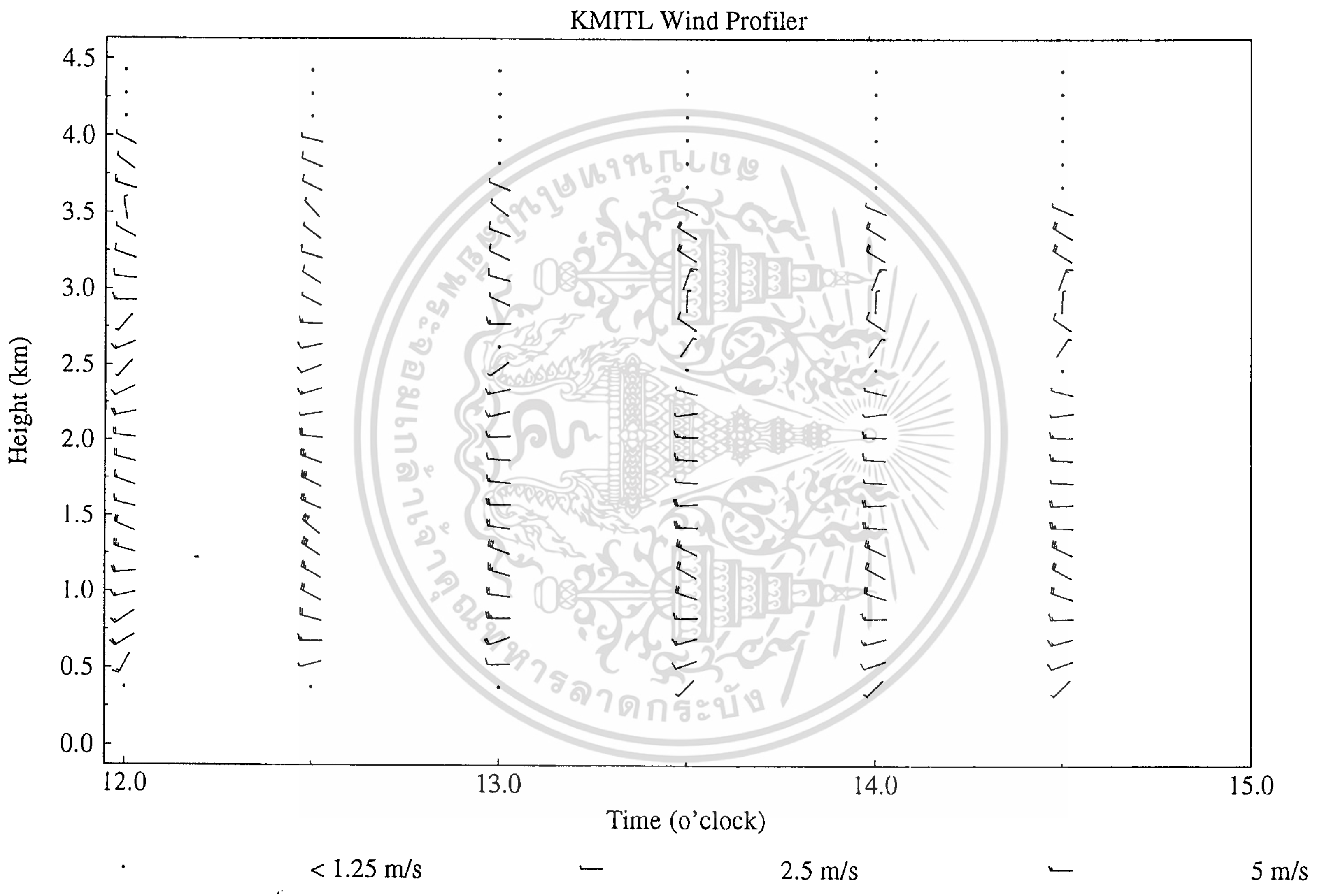
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 โปรไฟล์ของลมในระนาบทิศเหนือ-ตะวันออกของข้อมูลที่บันทึกด้วยระบบเรดาร์สำรวจบรรยากาศของวันที่ 21 มิถุนายน 2540 โดยแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของลมทุกๆ ครึ่งชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 12.00-14.30 น. ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 โปรไฟล์ของลมในระนาบทิศเหนือ-ตะวันออกของข้อมูลที่บันทึกด้วยระบบเรดาร์สำรวจบรรยากาศของวันที่ 21 มิถุนายน 2540 โดยแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของลมทุกๆ ครึ่งชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 12.00-14.30 น. ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 สรุป

การนำเอาข้อมูลที่บันทึกได้จากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศมาวิเคราะห์และคำนวณความเร็วของลมสามารถทำได้ดังแสดงเป็นโปรไฟล์ของลมในผลการทดลองก่อนหน้านี้ ซึ่งจะเห็นว่าสำหรับการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตจะให้ผลของข้อมูลที่แสดงเป็นเวกเตอร์ของลมบางค่าผิดพลาดไปจากความเป็นจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งถ้านำเอาค่าความเร็วของลมมาหาค่าเฉลี่ยแบบคอนเซน-ซัสดังแสดงโปรไฟล์ของลมในรูปที่ 4.8 จะได้ค่าของเวกเตอร์ของลมที่ถูกต้องยิ่งขึ้น ดังนั้นเราจึงเลือกใช้วิธีการพล๊อตโปรไฟล์ของลมด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ยแบบคอนเซนซัสในผลการทดลองอื่นๆ โดยนำเอาข้อมูลลมที่บันทึกได้จากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศในแต่ละวันมาทำการคำนวณแล้วหาค่าเฉลี่ยในทุกๆ 1 ชั่วโมงแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของลมในแต่ละวันที่แต่ละระดับความสูง 60 ระดับ โดยมีความสูงเริ่มต้นที่ 150 เมตรแรก จนถึงระยะประมาณ 4.5 กิโลเมตร โดยพล๊อตเป็นเวกเตอร์ของลมที่เปลี่ยนแปลงไปภายใน 1 เดือน โดยเลือกเอาตัวอย่างข้อมูลลมของเดือน เมษายน พฤษภาคม และ มิถุนายน มาพิจารณาดังแสดงในรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและวิจารณ์

ในการประมาณค่าความเร็วและทิศทางของลมสำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีพีคเพาเวอร์ มาประมาณค่าความเร็วและทิศทางของลมจากข้อมูลที่บันทึกได้จากระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศที่ทำการบันทึกข้อมูลลม ณ บริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แล้วนำค่าความเร็วที่คำนวณได้ไปหาค่าเฉลี่ย 2 แบบคือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต และค่าเฉลี่ยคอนเซนซัส จากนั้นทำเปรียบเทียบผลที่ได้จากเวกเตอร์ของลมที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยทั้ง 2 แบบ ซึ่งพบว่าวิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัสจะให้ความถูกต้องน่าเชื่อถือได้ดีกว่าวิธีหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต ดังนั้นจึงใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยคอนเซนซัสไปพล๊อตเป็นโปรไฟล์ของลมในระนาบ 2 มิติ โดยนำค่าเฉลี่ยที่ได้พล๊อตเป็นเวกเตอร์ของลมในแต่ละระดับความสูง เทียบกับแต่ละวัน ใน 1 เดือน เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของลมในแต่ละวันใน 1 เดือน

ข้อเสนอแนะจากการทดลองคือ ข้อมูลที่นำไปพล๊อตในแต่เดือน จะมีข้อมูลบางวันที่ไม่ได้ทำการบันทึกทำให้ผลการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของลมไม่ต่อเนื่องเท่าที่ควร เนื่องจากขนาดของแผ่นบันทึกข้อมูล (ใช้ MO diskette) เต็ม ดังนั้นควรจะเลือกแผ่นบันทึกข้อมูลที่ให้ค่าความจุสูงขึ้น หรือ มีการเช็คขนาดของข้อมูลที่บันทึกไปแล้วและเปลี่ยนแผ่นบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องตลอด

สำหรับข้อเสนอแนะในการศึกษาต่อไปคือ นำผลการทดลองที่ได้ด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ไปเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธี Radiosonde ซึ่งเป็นวิธีที่ทำการปล่อยบอลลูนให้ล่องลอยไปอย่างอิสระในบรรยากาศโดยมีตัวเซนเซอร์ผูกติดไปด้วย ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอยู่จนถึงปัจจุบัน ในการเปรียบเทียบผลสามารถทำได้โดยนำข้อมูลในช่วงเวลาและสภาพแวดล้อมที่เหมือนหรือใกล้เคียงกันมาพิจารณาเปรียบเทียบกัน แต่ข้อดีของระบบเรดาร์ที่เห็นได้ชัดคือ สามารถทำการวัดข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง และในการปล่อยบอลลูนไปแต่ละครั้งต้องใช้คนจำนวนมากพอสมควรเมื่อเทียบกับระบบเรดาร์ที่ทำงานด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้คนคอยดูแลควบคุมการทำงานของเครื่องแค่คนเดียวก็เพียงพอ อีกทั้งเราไม่สามารถควบคุมให้บอลลูนที่ปล่อยไปตกลงในที่ที่เรากำหนดได้ จึงอาจพิจารณาได้ว่าเป็นการสิ้นเปลืองระยะยาว แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากต้องการจะสรุปผลเกี่ยวกับ ข้อดี-ข้อเสีย ของวิธีการทั้ง 2 วิธีนี้ได้ชัดเจนยิ่งขึ้นในเรื่องการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายจะต้องทำการการประเมินค่าใช้จ่ายและงบประมาณในระยะยาวของทั้ง 2 ระบบนี้ เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกวิธีที่ดีที่สุดในการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะสามารถนำการประมาณความเร็วและทิศทางของลมไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ก็คือ ในเรื่องของการพยากรณ์อากาศและใช้ในการคาดการณ์ว่าบริเวณที่มีอากาศแปรปรวนจะแผ่กระจายอิทธิพลจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งเมื่อไร ใช้กับการบินและการขึ้น – ลงที่สนามบิน ใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาเลือกทำเลหรือที่ตั้งที่เหมาะสมในการสร้างบ้านเรือนที่อยู่อาศัยหรืออาคารต่างๆ รวมไปถึงการเพาะปลูก ตลอดจนใช้เลือกตรวจสอบหาบริเวณที่มีลมพัดอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้แรงจากลมมาผลิตเครื่องกำเนิดพลังงานเพื่อทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งอื่น เช่น พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

พรพรรณ์ ดุลยกาญจน์, ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี และ ปัญญา ฐิติมัชฌิมา, "การใช้วิธีพีคเพาเวอร์ประมาณความเร็วลมในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20, (13 – 14 พฤศจิกายน 2540) : 649-652.

พรพรรณ์ ดุลยกาญจน์ และ ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี, "การแสดงโปรไฟล์ของลมโดยการหาค่าเฉลี่ยความเร็วลมด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ยแบบคอนเซนซัส," การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 36, (3 – 5 กุมภาพันธ์ 2541).

อภินันท์ มัณยานนท์. "Wind Profiler and Lidar Project at KMITL," Proceedings of Seminar on Environmental Remote Sensing by Radiowave and Laser, (19 – 20 December 1995) : B-1 – B-19.

Balsley, Ben B., "Clear-Air Radar Technology: Panel Report." Radar in Meteorology: Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology Conference, D. Atlas, ed., American Meteorological Society, Boston : n.p., 1990.

Basic Radar. New York : The Technical Press Ltd., 1969.

Clifford, Steven F. and others. "Ground-Based Remote Profiling in Atmospheric Studies: An Overview," Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 3 (1994) : 313-355.

Clothiaux, E. E. et al., "A First-Guess Feature-Based Algorithm for Estimating Wind Speed in Clear-Air Doppler Radar Spectra," Journal of Atmospheric and Ocenic Technology, vol. 11 (August 1994) : 888-908.

Doviak, Richard J. and Dusan S. Zrnic, Doppler Radar and Weather Observations, San Diego, California : Academic Press Inc., 1993.

Edde, Byron. RADAR Principle, Technology, Applications, Prentice-Hall, 1993.

Encyclopedia of Science & Technology, McGraw-Hill, 6th ed., vol.2, 1987.

Fischler, Martin A. and Robert C. Bolles, "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography," Communication of ACM, vol. 24, no. 6 (June 1981) : 381-395.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fukao, Shoichiro, "Atmospheric Radars: Principles and Techniques," The Seminar on the Environment Observation Technology, Tokyo : n.p., 1993.

Keeler, Jeffrey R. and Richard E. Passarelli, "Signal Processing for Atmospheric Radars," Radar in Meteorology: Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology Conference, D. Atlas, ed., American Meteorological Society. Boston : n.p., 1990.

Kingsley, Simon and Shaun Quegan, Understanding Radar Systems, Singapore : McGraw-Hill, 1993.

May, Peter T. and Richard G. Strauch, "An Examination of Wind Profiler Signal Processing Algorithms." Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 6 (August 1989) : 731-735.

Nakamura, Kenji, "Utilization of Remote Sensing for Atmospheric Sciences," Proceedings of Seminar on Environmental Remote Sensing by Radiowave and Laser, (19 – 20 December 1995) : B-1 – B-19.

Nathanson, Fred E. RADAR design principle, McGraw-Hill, 1990.

Ohsaki, Yuji, "Current Technology of the Wind Profiler Radar," Proceedings of Seminar on Environmental Remote Sensing by Radiowave and Laser, (19 – 20 December 1995) : B-1 – B-19.

Rottger, J. and M. F. Larsen, "UHF/VHF Radar Techniques for Atmospheric Research and Wind Profiler Applications," Radar in Meteorology: Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology Conference, D. Atlas, ed., American Meteorological Society. Boston : n.p., 1990.

Sato, Toru, Radar Principle, Kyoto : n.p., n.d.

Skolnik, Merrill I, Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill, 1980.

Toomay, J. C., Radar Principles for the Non-specialist, New York : Von Nostrand Reinhold, 1989.

Tsuda, Toshitaka, Data Acquisition and Processing, Kyoto : n.p., n.d.

Zrnic, Dusan S., "Signal Processing: Panel Report," Radar in Meteorology: Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology Conference, D. Atlas, ed., American Meteorological Society, Boston : n.p., 1990.

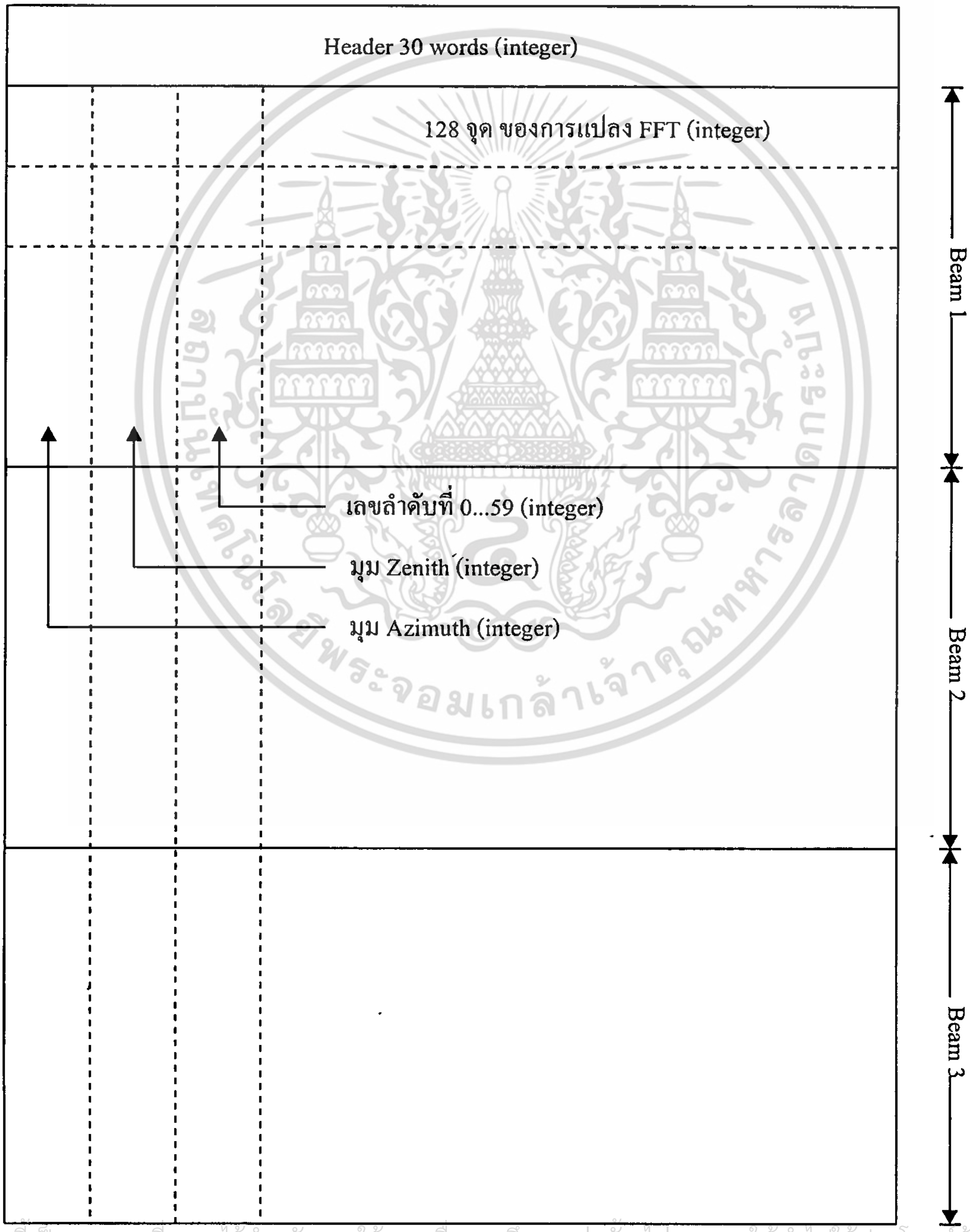
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

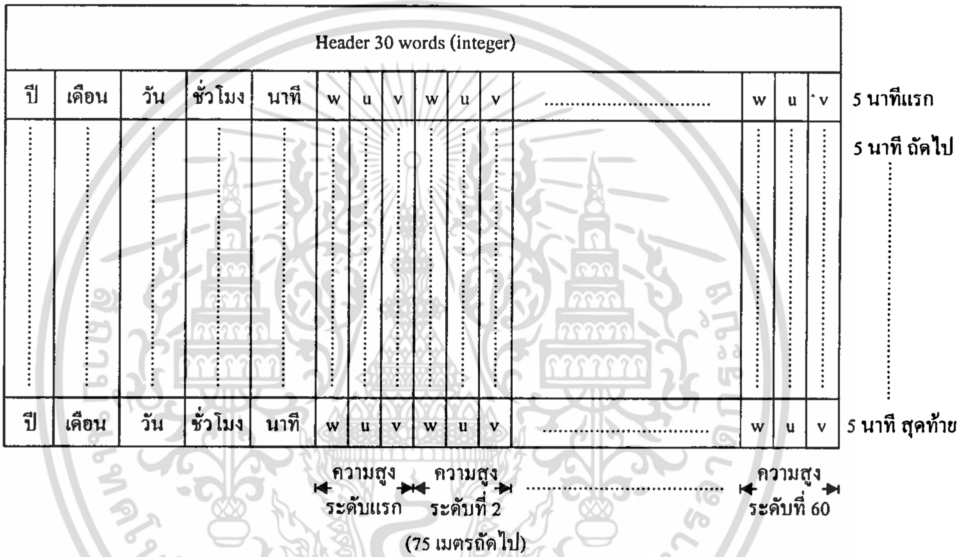
ฟอร์แมตของไฟล์ข้อมูลที่บันทึกได้จากระบบเรดาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

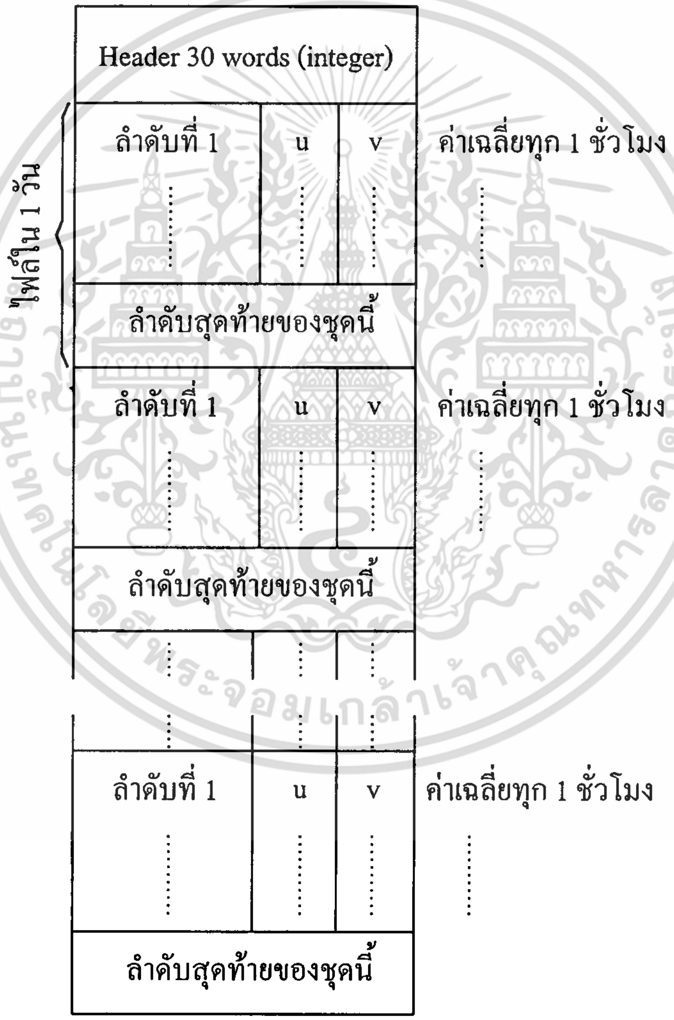
ฟอร์แมตของไฟล์ข้อมูลที่ทำการบันทึกใหม่จากไฟล์ข้อมูลของระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ ใน 1 วัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ฟอร์แมตของไฟล์ข้อมูลที่ทำการบันทึกใหม่จากไฟล์ข้อมูลของระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ ใน 1 เดือน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวพรพรรณ์ ดุลยกาญจน์
เกิดวันที่	8 มีนาคม 2515 ที่จังหวัดลำปาง
การศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต(คณิตศาสตร์) จากมหาวิทยาลัยบูรพา ปีการศึกษา 2535
ทุนการศึกษา	สมาคมคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร หรือ C&C เป็นระยะเวลา 2 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538 – 2539

<u>ผลงานทางวิชาการ</u>

พรพรรณ์ ดุลยกาญจน์, ผศ.ดร.ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี และ ดร.ปัญญา ฐิติมัชฌิมา. "การใช้วิธีพีค-เพาเวอร์ประมาณความเร็วลมในระบบเรดาร์สำรวจชั้นบรรยากาศ (Using Peak Power Method for the Estimation of Wind Speed in Lower Atmosphere Observation Radar)." <u>การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20</u>, พ.ศ. 2540.

พรพรรณ์ ดุลยกาญจน์, ผศ.ดร.ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี. "การแสดงโปรไฟล์ของลมโดยการหาค่าเฉลี่ยความเร็วลมด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ยแบบคอนเซนซัส (Wind Profiler Using Average of Wind Speed by Consensus Average)." <u>การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 36</u>, พ.ศ. 2541.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้