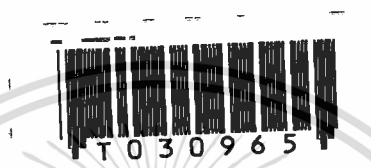


การประยุกต์ใช้งานของ LIDAR เพื่อการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ

AN APPLICATION OF LIDAR FOR AEROSOL AND DUST
MEASUREMENT IN ATMOSPHERE



นายพีระวุฒิ สุวรรณจันทร์
MR. PEERAWUT SUWANJAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2541

ISBN 974-622-146-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AN APPLICATION OF LIDAR FOR AEROSOL AND DUST
MEASUREMENT IN ATMOSPHERE

PEERAWUT SUWANJAN

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

1998

ISBN 974-622-146-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้งานของ LIDAR เพื่อการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ
นักศึกษา	นายพีระวุฒิ สุวรรณจันทร์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2541

บทคัดย่อ

ในการตรวจจับและแสดงข้อมูลของสิ่งแวดล้อมที่ห่อหุ้มโลกนั้นสามารถทำได้โดยใช้ Remote sensing techniques ในวิทยานิพนธ์นี้ จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานของ LIDAR ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งของ Optical remote sensing techniques เพื่อการวัดฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ ณ ความสูงต่างๆ โดยจะใช้ Nd:YAG เป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร ส่งไปยังชั้นบรรยากาศในแนวตั้งฉากกับพื้นดิน แสงเลเซอร์จะกระทบกับฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศเกิดการแตกกระจายกลับมายังพื้นดิน โดยจะใช้เทเลสโคปเป็นตัวรวบรวมสัญญาณซึ่งจะทำการรับสัญญาณสองโพลาไรเซชันที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน แล้วใช้หลอด PMT ขยายสัญญาณ จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้จากการทดลองแสดงเป็น Profiles ของฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ การวัดนี้เพื่อต้องการตรวจสอบสภาพแวดล้อมที่ห่อหุ้มโลกว่าอยู่ในสภาพเช่นใด ซึ่งคาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพชีวิตตลอดจนผลกระทบต่อผลกระทบคลื่นวิทยุในระบบสื่อสาร

Thesis Title	An Application of LIDAR for Aerosol and Dust Measurement in Atmosphere
Student	Mr.Peerawut Suwanjan
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Kobchai Dejhan
Level of Student	Master of Engineering in Electrical Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	1998

Abstract

This thesis proposes an application of LIDAR as a method of optical remote sensing techniques to measure the aerosol and dust around the atmospheres. An Nd:YAG laser is used as laser light source with 532 nanometre wavelength. The laser light is perpendicular by sent to the atmosphere from the ground plane. It reflects the aerosol and dust in the atmospheres and diffracts back to the ground plane. A telescope is use to collect the orthogonal polarization signals which they are amplifier by PMT tube. The computer analyzes the data and shows the experimental result profiles of dust in troposphere. All of the data will be used to examine the atmosphere at that area above the ground and its effects to the radio wave propagation.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเสร็จลงไปด้วยดี ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง
แต่ รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์, ผศ.อภิรักษ์ มั่นยานนท์ และ
Dr.Toshikazu Itabe เป็นผู้ประสานงานในการขอความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และข้อมูลทาง
เทคนิคต่างๆ จาก Communication research laboratory, Ministry of Posts & Telecommunication
ประเทศญี่ปุ่น ที่ได้ให้คำแนะนำตลอดจนให้ความช่วยเหลือด้านเอกสารข้อมูลต่างๆ อันเป็น
ประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณมูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร (C&C)
ที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษาเป็นเวลาถึง 2 ปีการศึกษา และขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่
น้องสาว เพื่อนๆ และคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา
ครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล. ผู้ให้กำลังใจในด้านการศึกษามาโดยตลอด

พระวุฒิ สุวรรณจันทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
บทที่	
1 บทนำ.....	1
แนวความคิดของวิทยานิพนธ์.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย	3
2 โครงสร้างของชั้นบรรยากาศและการแพร่กระจายคลื่น.....	4
กล่าวนำ.....	4
ส่วนประกอบทั่วไปของบรรยากาศ	4
ส่วนประกอบที่สำคัญของบรรยากาศ	7
การแบ่งชั้นบรรยากาศตามเกณฑ์อุณหภูมิ	11
การแบ่งชั้นบรรยากาศตามสมบัติของก๊าซในบรรยากาศ	15
การแบ่งชั้นบรรยากาศตามเกณฑ์อุณหภูมิมิวิทยา	19
การแพร่กระจายคลื่น	21
การลดทอนของคลื่นวิทยุย่านความถี่ไมโครเวฟ.....	22
การลดทอนของคลื่นในช่วงอินฟราเรดและช่วงที่สายตาคนสามารถมองเห็น	23
3 หลักการของเลเซอร์และระบบเซ็นเซอร์.....	25
กล่าวนำ.....	25
การปล่อยและการดูดกลืนแสง.....	25
การกลับจำนวนอะตอม.....	27

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การกระตุ้นตัวกลาง Nd:YAG	29
Q-switching	31
The resonant optical cavity.....	32
โหมดตามความยาวและความกว้างของเส้น.....	34
Electronic line narrowing	36
การผลิตความยาวคลื่นอื่น	36
ข้อควรพิจารณาในการออกแบบ โครงสร้างของรีโซเนเตอร์	37
Pulse triggering sequence and timing.....	38
ระบบเซ็นเซอร์.....	40
ระบบเรดาร์.....	42
4 ระบบ LIDAR.....	44
กล่าวนำ.....	44
หลักการเบื้องต้นของระบบ LIDAR	44
Mie scattering.....	47
Rayleigh scattering.....	47
Raman scattering.....	47
Fluorescence and Resonance scattering	48
Absorption	48
5 สมการ LIDAR และการวิเคราะห์ข้อมูล	52
กล่าวนำ.....	52
Scattering form ของสมการ LIDAR.....	52
Photon counting.....	59
การเก็บข้อมูลและการประมวลผลโดยใช้คอมพิวเตอร์	61
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	65

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6 โครงสร้างของอุปกรณ์การทดลอง.....	70
กล่าวนำ.....	70
บล็อกไดอะแกรมของระบบ LIDAR	70
การทำงานของระบบ LIDAR	71
เลเซอร์	71
เทเลสโคป.....	72
Photon multiplier tube (PMT)	74
Discriminator.....	75
MCA & PC.....	77
รายละเอียดทางเทคนิคของระบบ.....	77
7 การทดลองและผลการทดลอง	78
กล่าวนำ.....	78
ขั้นตอนการทดลอง	78
ผลการทดลอง	81
8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	90
สรุปผลการทดลอง.....	90
แนวทางการพัฒนา.....	91
บรรณานุกรม	92
ภาคผนวก	93
ประวัติผู้เขียน	118
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	118

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1. แสดงส่วนประกอบของอากาศแห้ง.....	6
2. แสดงขนาดทั่วไปของอนุภาคมวลสาร.....	9
2.(ต่อ) แสดงขนาดทั่วไปของอนุภาคมวลสาร	10
3. แสดงตัวอย่างสารประกอบ Aerosol ชนิดต่างๆ	11
4. แสดงชนิดของขบวนการของการเกิดปฏิกิริยาทางแสงที่ใช้สำหรับ Laser remote sensing...	46
5. รายละเอียดทางเทคนิคของระบบ LIDAR.....	77



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1. แสดงขนาดของอนุภาคต่างๆ ในอากาศ	10
2. แสดงการแบ่งชั้นบรรยากาศในแนวดิ่งตามเกณฑ์อุณหภูมิ	12
3. แสดงส่วนประกอบและปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ของบรรยากาศในแนวดิ่ง	15
4. แสดงอิทธิพลของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการส่งคลื่นวิทยุ	17
5. แสดงระดับของโทรโพพอสตามละติจูดต่างๆ	21
6. แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	22
7. แสดงการลดทอนของคลื่นวิทยุย่านความถี่ไมโครเวฟ	23
8. แสดงการลดทอนของคลื่นในช่วงอินฟราเรดและช่วงที่สายตาคนสามารถมองเห็น	24
9. แสดงอิเล็กทรอนิกส์แต่ละตัวจะใช้วงโคจรที่แตกต่างกันไปซึ่งกำหนดโดยความน่าจะเป็นของการหาอิเล็กทรอนิกส์ 1 ตัว ที่ตำแหน่งที่กำหนดให้และรูปร่างของวงโคจรจะกำหนดโดยรัศมีและมุมซึ่งขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็น	26
10. แสดงแบบจำลองของรูปแบบการเปลี่ยนระดับพลังงานของแสงเลเซอร์แบบ 4 ระดับ	28
11. แสดงแผนผังระดับพลังงานของแหล่งจ่ายเลเซอร์ Nd:YAG	30
12. แสดงส่วนประกอบของ Q-switch	31
13. แสดงรีโซเนเตอร์แบบคงที่และแบบไม่คงที่	33
14. แสดงการกระจายความถี่ของ Longitudinal modes สำหรับเส้นเดียว	34
15. แสดง Etalon Loss ค่าสุดเพื่อขยายอัตราขยายเลเซอร์สูงสุด	35
16. แสดงแผนผังของระบบอิเล็กทรอนิกส์ GCR-11	39
17. แสดงเทคนิควิธีการของการวัดในระบบเซ็นเซอร์	40
18. แสดงรูปแบบพื้นฐานของระบบเรดาร์	43
19. แสดงโครงสร้างพื้นฐานของ LIDAR	45
20. แสดงแผนภูมิของการดูดซับชนิด Single-ended laser remote sensors	49
21. แสดงข้อสรุปที่แน่นอนของช่องว่างในอากาศ ของเหตุการณ์การเกิดการกระจายที่ไม่แน่นอนของสัญญาณพัลส์ รูปของเลเซอร์ ที่ได้จากการมองผ่านทางช่องของเวลา	57
22. แสดงการทำงานของ Photon counting	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
23. แสดงระดับค่า Threshold และจำนวนพัลส์ที่ได้	60
24. แสดงช่วงเวลาของการเก็บข้อมูล	61
25. แสดงการเก็บข้อมูลโดยคอมพิวเตอร์	62
26. แสดงการรวมชุดข้อมูลของชุดข้อมูล X_i ต่างๆ	62
27. แสดงการหาค่า k และอัตราส่วน $R(h)$	64
28. แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมบันทึกข้อมูล	65
29. แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมบันทึกข้อมูล (ต่อ)	66
30. แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมบันทึกข้อมูล (ต่อ)	67
31. แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมแสดงผลบนจอภาพ	68
32. แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมแสดงผลบนจอภาพ (ต่อ)	69
33. แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบ LIDAR	70
34. แสดงภาพถ่ายของตัวกำเนิดแสงเลเซอร์	72
35. แสดงชนิดของเทเลสโคป	73
36. แสดงภาพถ่ายของเทเลสโคป	74
37. แสดงการทำงานของหลอด PMT	74
38. แสดงภาพถ่ายของหลอด PMT	75
39. แสดงภาพถ่ายภายในห้องที่ทำการทดลอง	76
40. แสดงภาพถ่ายภายนอกอาคารที่ทำการทดลอง	76
41. แสดงสถานีส่ง-รับบริเวณอาคารสมเด็จพระเทพฯ	79
42. แสดงลำปี่มที่เกิดการซ้อนทับกัน	79
43. แสดงตัวอย่างการ Run โปรแกรม LE93AT3.EXE	80
44. แสดงตัวอย่างการ Run โปรแกรม LE93AT3R.EXE	80
45. แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 2 กันยายน 2538	82
46. แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2538	83
47. แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน 2538	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
48. แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 21 ธันวาคม 2538.....	85
49. แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 11 มกราคม 2539.....	86
50. แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2539	87
51. แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 25 มีนาคม 2539.....	88
52. แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 29 เมษายน 2539.....	89



บทที่ 1

บทนำ

แนวความคิดของวิทยานิพนธ์

โดยปกติอากาศบริสุทธิ์ที่สิ่งมีชีวิตใช้หายใจจะประกอบด้วย ก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 78 ก๊าซออกซิเจนร้อยละ 21 และก๊าซอื่นๆ อีกร้อยละ 1 รวมทั้งไอน้ำและฝุ่นละอองอีกเล็กน้อยในปริมาณที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายพอจะขจัดออกไปได้ สารมลพิษในอากาศที่เกิดขึ้นทั่วไปและนับว่าเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ได้แก่ ก๊าซพิษชนิดต่างๆ ฝุ่นละออง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคสารที่มีขนาดต่ำกว่า 200 ไมครอนลงไป จำพวก ฝุ่น หมอกควัน ไอต่างๆ เช่น ไอของโลหะหนักจากพวกตะกั่วปรอท สารพิษต่างๆ จะมีการกระจายหรือสะสมในที่ต่างๆ มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาวะทางอุตุนิยมวิทยาได้แก่ ความแปรปรวน ความเร็วของลมที่ระดับต่างๆ อุณหภูมิของบรรยากาศที่ระดับต่างๆ เป็นต้น รวมทั้งสภาพภูมิประเทศด้วย ฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศมีผลต่อคุณภาพชีวิตตลอดจนผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในระบบสื่อสาร ดังนั้นจึงควรที่จะมีการวัดปริมาณของฝุ่นละอองที่มีอยู่ ณ ความสูงต่างๆ กันบนชั้นบรรยากาศ เพื่อเป็นการตรวจสอบสภาพแวดล้อมที่ห่อหุ้มโลกว่าอยู่ในสภาพเช่นใดและยังทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในย่านความถี่ต่างๆ ของระบบสื่อสารอีกด้วย

หลักการเดิมในการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศนั้น ทำได้โดยการส่งบอลลูกขึ้นไปบนท้องฟ้า แล้วทำการวัดที่ระดับความสูงต่างๆ หรืออาจจะใช้เครื่องบินแทนบอลลูกก็ได้ ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้จะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง หรืออาจใช้วิธีการของเรดาร์โดยใช้ความถี่ย่านวิทยุ แต่ความถี่ในย่านนี้มีผลกระทบต่ออนุภาคและฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับผลกระทบต่อความถี่ย่านเลเซอร์ ปริมาณของฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศนี้สามารถวัดได้ด้วย LIDAR (Light detection and ranging) งานวิจัยที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการประยุกต์ใช้งานของ LIDAR ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งของ Optical remote sensing techniques เพื่อการวัดปริมาณของฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ ณ ความสูงต่างๆ ของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) โดยอาศัยคุณสมบัติของแสงเลเซอร์ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นมากอยู่ในช่วงนาโนเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะใช้ Nd:YAG Laser เป็นตัวกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร ส่งขึ้นไปยังชั้นบรรยากาศในแนวตั้ง ซึ่งพลังงานของแสงเลเซอร์จะผ่านทะลุสู่ชั้นบรรยากาศและทำปฏิกิริยากับอนุภาคและฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ แสงเลเซอร์จะเกิดการแตกกระจายเมื่อตกกระทบกับอนุภาคและฝุ่นละออง พลังงานส่วนหนึ่งจะแตกกระจายกลับสู่ภาคพื้นดิน โดยใช้เทเลสโคปเป็นตัวรวบรวมสัญญาณเพื่อทำการประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ต่อไป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการประยุกต์ใช้งานของ LIDAR เพื่อการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ โดยใช้ Optical remote sensing techniques ซึ่งมีวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ดังนี้

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นบรรยากาศและหลักการทำงานของระบบ LIDAR
2. เพื่อประยุกต์ใช้งานระบบ LIDAR ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์
3. เพื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ
4. เพื่อทำการทดลองการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ
5. เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็น Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ความสูงต่างๆ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยการประยุกต์ใช้งานของ LIDAR เพื่อการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ มีดังนี้

1. ทราบถึงโครงสร้างของชั้นบรรยากาศและหลักการทำงานของระบบ LIDAR
2. สามารถประยุกต์ใช้งานระบบ LIDAR ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทราบถึงวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ
4. ได้ข้อมูลจากการทดลองการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ
5. ทราบผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็น Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่ความสูงต่างๆ

ขอบเขตของการวิจัย

ในการทำวิจัยการประยุกต์ใช้งานของ LIDAR เพื่อการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศนี้ จะทำการทดลอง ณ บริเวณอาคารสมเด็จพระเทพฯ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีสถานีส่งแสงเลเซอร์อยู่ภายในอาคาร ส่วนสถานีรับจะอยู่ภายนอกอาคารและนำข้อมูลที่ได้รับได้มาทำการวิเคราะห์และประมวลผลภายในอาคาร ในการวัดแต่ละครั้งจะได้รับ Profile ของฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ ณ ความสูงต่างๆ ในช่วงเวลาที่กำหนด

บทที่ 2

โครงสร้างของชั้นบรรยากาศและการแพร่กระจายคลื่น

กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของชั้นบรรยากาศว่าสามารถแบ่งออกเป็นชั้นต่างๆ ได้กี่ชนิด แต่ละชั้นประกอบด้วยอะไรบ้างและมีอัตราส่วนของแต่ละชนิดมากน้อยเพียงใด ตลอดจนลักษณะของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดัน และความหนาแน่นในแต่ละชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับระยะความสูงจากระดับน้ำทะเลว่ามีการเปลี่ยนแปลงเช่นใด อีกทั้งยังกล่าวถึงผลกระทบต่างๆ ต่อการแพร่กระจายคลื่นในบรรยากาศ โดยพิจารณาถึงผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่นในช่วงความถี่ไมโครเวฟ อินฟราเรด ตลอดจนถึงความถี่แสงที่สายตามนุษย์มองเห็นได้ว่ามีผลกระทบอย่างไร

ส่วนประกอบทั่วไปของบรรยากาศ

คำว่า “บรรยากาศ” หมายถึง อากาศที่ปกคลุมเหนือที่กว้างใหญ่และสูง ส่วนคำว่า “อากาศ” หมายถึง อากาศที่ปกคลุมบริเวณที่เล็กกว่า อากาศเป็นสิ่งที่มองไม่เห็นและปราศจากกลิ่นที่คนเราสูดหายใจเข้าไป เป็นสิ่งยังชีพของสิ่งมีชีวิตต่างๆ และก่อให้เกิดความมั่งคั่งที่กลมกลืนกันต่างๆ มากมาย ในสมัยก่อนนักปราชญ์ชาวกรีกมีความเชื่อว่าอากาศเป็นหนึ่งในบรรดาธาตุพื้นฐานทั้ง 4 ซึ่งประกอบด้วย ดิน น้ำ ลม ไฟ ส่วนสารประกอบอื่นๆ เกิดจากการผสมของธาตุทั้ง 4 นี้ อริสโตเติล (Aristotle) รู้จักไอน้ำว่าเป็นสิ่งที่แตกต่างจากอากาศธรรมดา หลังจากนั้นประมาณ 2,000 ปี จอห์น มาเยว (John Mayow) พบว่าอากาศแห้ง (Dry air) ประกอบด้วยสารประกอบต่างๆ หลายส่วน โดยได้เริ่มทำการทดลองต่างๆ และได้ข้อสรุปว่า อากาศประกอบด้วย 2 ส่วน คือสิ่งที่ช่วยให้เกิดสิ่งที่มีชีวิตและการเผาไหม้ซึ่งเขาเรียกว่าอากาศไฟ (Fire air) อีกส่วนหนึ่งคือส่วนที่ไม่ช่วยให้เกิดสิ่งดังกล่าว ซึ่งความจริงแล้วก๊าซตัวแรกในบรรยากาศที่ถูกแยกออกมาและศึกษาอย่างละเอียดนั้นไม่ใช่ อากาศไฟแต่กลายเป็นก๊าซอื่นส่วนประกอบของก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศที่ถูกค้นพบมีดังนี้คือ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสารประกอบตัวแรกในบรรยากาศที่ถูกค้นพบในปี พ.ศ.2295 โดยโจเซฟ แบลค (Joseph Black) ได้ค้นพบก๊าซชนิดนี้จากการเผาไหม้คาร์บอนแล้วปรากฏว่ามีก๊าซชนิดหนึ่งเกิดขึ้น และถ้าเอาเศษตะกอนที่ได้จากการเผาไหม้นี้มาผึ่งไว้ในที่แจ้ง ก๊าซชนิดนี้จะถูกดูดกลับเข้าไปทำปฏิกิริยากลายเป็นสารเดิม โจเซฟ แบลค เรียกก๊าซที่แยกออกมานั้นว่า ฟิกซ์แอร์ (Fixed air) เนื่องจากว่าสามารถถูกตรึงอยู่กับสารคาร์บอนแตกต่างๆ ซึ่งสามารถแยกออกมาได้โดยใช้ความร้อน ฟิกซ์แอร์จึงเป็นก๊าซชนิดเดียวกับก๊าซที่เรียกว่า คาร์บอนไดออกไซด์นั่นเอง

2. ในโตรเจน ในเวลาต่อมา มีการค้นพบก๊าซไนโตรเจนโดย แดเนียล รัทเธอร์ฟอร์ด (Daniel Rutherford) ว่ามีอยู่ในบรรยากาศร้อยละประมาณ 80 โดยปริมาตร ซึ่งค้นพบจากการเผาถ่านในภาชนะปิดเป็นเวลานานเท่าที่จะนานได้ หลังจากการจัดกรเอาฟิกซ์แอร์ออกไปแล้วจะเหลือก๊าซค้างอยู่อีกชนิดหนึ่ง รัทเธอร์ฟอร์ดได้ทำการศึกษาสมบัติของก๊าซที่เหลือค้างอยู่นี้และแสดงให้เห็นว่าก๊าซชนิดนี้ต่างจากอากาศธรรมดา คือ ก๊าซนี้ไม่ได้ช่วยในการเผาไหม้หรือใช้ในการหายใจเลย ดังนั้นเขาจึงเรียกก๊าซนี้ว่า เมฟิติกแอร์ (Mephitic air) ซึ่งก็คือก๊าซไนโตรเจนในปัจจุบันนั่นเอง

3. ออกซิเจน หลังจากที่รัทเธอร์ฟอร์ดแยกเมฟิติกแอร์ได้ไม่นานนัก โจเซฟ พริสทลีย์ (Joseph Priestley) และคาร์ล วิลเลียม ซีลล์ (Carl William Scheele) ได้ทำการแยกก๊าซชนิดหนึ่งออกมาโดยให้ความร้อนแก่ปรอทจนเป็นผงแดง ต่อจากนั้นก็เพิ่มความร้อนขึ้นอีกจนกระทั่งได้ก๊าซนี้ออกมา ก๊าซที่ได้ออกมานี้จะช่วยในการเผาไหม้ได้ดีกว่าอากาศธรรมดา เขาจึงเรียกก๊าซชนิดนี้ว่า ดีฟล็อกซิเตตแอร์ (Dephlogistated air) ซึ่งก็คือ ก๊าซออกซิเจนในปัจจุบันนี้

4. อาร์กอน ในปีพ.ศ. 2437 ลอร์ด เรย์เลย์ (Lord Rayleigh) และ เซอร์วิลเลียม แรมเซย์ (Sir William Ramsay) ได้ค้นพบก๊าซชนิดนี้ขึ้นโดยการเผาไหม้ออกซิเจนทั้งหมด และแยกเอาคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ออกไป จะพบก๊าซที่เหลือซึ่งหนักกว่าไนโตรเจนบริสุทธิ์เพียงเล็กน้อย เขาได้ทำการแยกเอาไนโตรเจนออกได้สำเร็จและเหลือแต่ก๊าซตัวใหม่ เนื่องจากก๊าซใหม่นี้มีปฏิกิริยาทางเคมีเป็นก๊าซเฉื่อย ดังนั้นจึงเรียกก๊าซนี้ว่า อาร์กอน (Argon) จากการตรวจวัดต่อมาในภายหลังปรากฏว่า อาร์กอนมีอยู่ในบรรยากาศร้อยละประมาณ 1 โดยปริมาตร

5. ก๊าซอื่น หลังจากการค้นพบก๊าซ 4 ชนิดในอากาศแล้ว ได้มีการศึกษาอย่างละเอียดยิ่งขึ้นเพื่อที่จะดูว่ามีก๊าซอื่นประกอบอยู่ในอากาศอีกหรือไม่ ปรากฏว่าค้นพบก๊าซเฉื่อยอีก 4 ชนิด คือ ฮีเลียม นีออน คริปตัน และซีนอน นอกจากนี้ยังพบก๊าซไฮโดรเจนอีก ก๊าซใหม่ 5 ชนิด ที่ค้นพบในตอนหลังนี้มีอยู่ในบรรยากาศเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

นอกจากนี้บรรยากาศยังประกอบด้วยก๊าซอื่นๆ ที่เกิดจากกระบวนการทางชีววิทยาและการประกอบอุตสาหกรรมต่างๆ ก๊าซเหล่านี้ที่สำคัญได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจน แอมโมเนีย มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ โอโซน และสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ สารเหล่านี้บางตัวมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสำคัญและมีผลกระทบต่อสภาวะของอากาศได้ แม้ว่าจะมีอยู่ในอากาศเพียง 1 ppm (part per million = ส่วนในล้านส่วน) หรือน้อยกว่าก็ตาม

ตารางที่ 1
แสดงส่วนประกอบของอากาศแห้ง

ก๊าซ	สัญลักษณ์ และสูตรเคมี	ปริมาณ	
		(%)	(ppm)
ไนโตรเจน	N ₂	78.08	
ออกซิเจน	O ₂	20.95	
อาร์กอน	A	0.93	
คาร์บอนไดออกไซด์	CO ₂	0.03	
นีออน	Ne		18.18
ฮีเลียม	He		5.24
มีเทน	CH ₄		2.0
คริปตัน	Kr		1.14
ไนตรัสออกไซด์	N ₂ O		0.5
ไฮโดรเจน	H ₂		0.5
ซีนอน	Xe		0.087
โอโซน	O ₃		0 - 0.07
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	SO ₂		0 - 1
ไนโตรเจนไดออกไซด์	NO ₂		0 - 0.02
ไอโอดีน	I ₂		เล็กน้อย
โซเดียมคลอไรด์	NaCl		เล็กน้อย
แอมโมเนีย	NH ₃		0 - เล็กน้อย
คาร์บอนมอนอกไซด์	CO		0 - เล็กน้อย

ตารางที่ 1 [4] แสดงถึงปริมาณเป็นร้อยละ โดยปริมาตรของก๊าซต่างๆ ที่ประกอบอยู่ในบรรยากาศโดยทั่วไป ก๊าซต่างๆ จะปรากฏในอัตราส่วนเดียวกันจนถึงความสูงประมาณ 80 กิโลเมตร ยกเว้น โอโซนและคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบที่สำคัญของบรรยากาศ

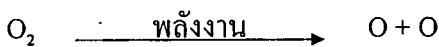
สารต่างๆ ในบรรยากาศที่มีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของสิ่งมีชีวิต หรือได้มีการศึกษาอย่างละเอียด คือ คาร์บอนไดออกไซด์ โอโซน ไอน้ำ และฝุ่นละออง

1. คาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศมีมากเป็นอันดับที่ 4 เมื่อเทียบกับก๊าซอื่นๆ ที่อุณหภูมิและความกดอากาศเดียวกัน ในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มีอยู่เพียง 0.03% ของปริมาณทั้งหมด ปริมาณ 99% ของคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดในโลกละลายอยู่ในมหาสมุทร แต่ความสามารถของการละลายนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซในอากาศ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณใกล้พื้นผิวโลกไม่คงที่ ณ สถานที่ต่างกัน ในเมืองใหญ่ๆ ที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน หรือน้ำมัน เป็นจำนวนมาก ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซก็จะสูงขึ้น ในบริเวณที่อยู่ห่างไกลจากเมืองอุตสาหกรรมหรือในระดับที่สูงจากพื้นดินไม่กี่เมตร ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้เกือบจะคงที่ ไม่ต่างไปจากค่าในตารางที่ 1 มากนัก แต่การกระจายของก๊าซนี้ในบรรยากาศชั้นบนๆ ไม่ค่อยเป็นที่รู้จักมากนัก นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาว่า ถ้าปริมาณของก๊าซนี้เพิ่มเป็น 2 เท่า จะมีผลทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น 3.7 ถึง 8.1 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ -15.5 ถึง -13.3 องศาเซลเซียส

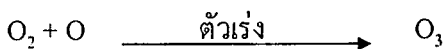
2. โอโซน โมเลกุลของโอโซนประกอบด้วยออกซิเจน 3 อะตอม ความเข้มข้นของก๊าซชนิดนี้แปรตามความสูง ละติจูด และเวลา โอโซนส่วนมากจะก่อดำในบรรยากาศระดับสูงๆ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการกระบวนต่างๆ ซึ่งรวมถึงการดูดกลืนรังสีเหนือม่วงหรืออัลตราไวโอเลต โมเลกุลของโอโซนมักจะจมลงในบรรยากาศและสะสมกันอยู่ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งมีความสูงอยู่ที่ระดับ 15-25 กิโลเมตร ณ บริเวณใกล้ๆ พื้นผิวโลกจะมีโอโซนอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้นและส่วนมากเกิดเนื่องจากการปล่อยกระแสไฟฟ้า

การเกิดและการสลายตัวของโอโซนประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

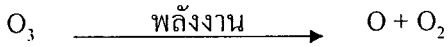
ขั้นตอนที่ 1 เมื่อโมเลกุลของออกซิเจนดูดพลังงานในช่วงคลื่นที่ต่ำกว่า 0.24 ไมครอนและจะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน (O)



ขั้นตอนที่ 2 อะตอมออกซิเจนจะไปชนกับโมเลกุลออกซิเจน และด้วยอนุภาคที่เป็นตัวเร่ง เช่น ไนโตรเจน อะตอมออกซิเจนจะรวมตัวกับโมเลกุลออกซิเจน กลายเป็นโอโซน



ขั้นตอนที่ 3 โอโซนจะไม่มีเสถียรภาพเมื่ออยู่ในที่มีแสงแดด ดังนั้นเมื่อได้ดูดพลังงานในช่วงคลื่นที่ต่ำกว่า 1.1 ไมครอนแล้วก็จะกลับไปอยู่ในสภาพของอะตอมและโมเลกุลของออกซิเจนตามเดิม



ขั้นตอนที่ 4 อะตอมออกซิเจนจะรวมตัวกับโอโซนใหม่กลายเป็น โมเลกุลออกซิเจน



กรรมวิธีการเกิดและการสลายตัวของโอโซนจะเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา โดยส่วนมากจะเกิดในชั้นความสูงบรรยากาศ ระหว่าง 30-55 กิโลเมตร แต่ความเข้มข้นของโอโซนจะมีมากที่สุดที่บริเวณความสูง 25 กิโลเมตร ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุใหญ่ 2 ประการ คือ พลังงานรังสีคลื่นสั้นที่ทำให้เกิดอะตอมออกซิเจนนั้นจะค่อยๆ หดไปขณะที่ผ่านเข้ามาจากบรรยากาศชั้นสูงๆ อีกประการหนึ่งคือความหนาแน่นของอนุภาคมีเพียงพอที่จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอะตอมและโมเลกุลของออกซิเจน

แม้ว่าโอโซนจะมีอยู่ในบรรยากาศเป็นปริมาณเล็กน้อยก็ตาม แต่มีความสำคัญอย่างมากต่อสิ่งมีชีวิตบนโลกและต่อการหมุนเวียนของบรรยากาศระดับบน ความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตคือ โอโซนมีความสามารถสูงในการดูดรังสีเหนือม่วงทำให้รังสีนี้ไม่ถึงพื้นผิวโลกในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ถ้าปราศจากโอโซนในบรรยากาศพื้นผิวโลกจะได้รับรังสีเหนือม่วงจากดวงอาทิตย์ในปริมาณความเข้มสูงพอที่จะเผาผิวหนังของสิ่งมีชีวิตให้ไหม้เกรียมอย่างรุนแรง อย่างน้อย 50 เท่าของที่วัดได้ในบริเวณภูเขาสูงในช่วงฤดูร้อน ในทางตรงข้ามถ้าปริมาณของโอโซนเพิ่มขึ้นอย่างน่าสังเกต ปริมาณของรังสีที่มาถึงพื้นผิวโลกจะลดน้อยลง อาจทำให้การสร้างวิตามินดี ในร่างกายมนุษย์ลดน้อยลง โอโซนในบรรยากาศสูงๆ จึงเปรียบเสมือนร่มซึ่งป้องกันไม่ให้รังสีเหนือม่วงเข้าสู่บรรยากาศชั้นต่ำกว่า ดังนั้นโอโซนในชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) จึงมีความสำคัญต่อความปลอดภัยของสิ่งมีชีวิต ทำให้สิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่บนพื้นผิวโลกได้

3. ไอน้ำ คือ น้ำในบรรยากาศที่อยู่ในสถานะก๊าซ ในบรรยากาศจะมีไอน้ำปรากฏอยู่เสมอ แต่มีปริมาณไม่คงที่ มากบ้างน้อยบ้าง ตามบริเวณชายฝั่งในเขตร้อนไอน้ำจะมีอยู่ในบรรยากาศประมาณ 3% ของมวลอากาศ ในทางกลับกันบางท้องถิ่นก็มีไอน้ำอยู่ในบรรยากาศเป็นปริมาณที่น้อยมากจนยากที่จะทำการตรวจวัดได้ ไอน้ำที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยจะสามารถทำให้ลมฟ้าอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีระดับความสูงต่ำกว่า 6 กิโลเมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความชื้นสูง ไอน้ำเข้าสู่บรรยากาศโดยการระเหยจากพื้นผิวน้ำและจากการคายน้ำของพืช ต่อมาไอน้ำก็เกิดการกลั่นตัวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งหรือของเหลว และในที่สุดก็กลับมาสู่พื้นผิวโลกในรูปของน้ำค้าง น้ำค้างแข็ง ฝนละออง ฝน หิมะหรือลูกเห็บ โดยเฉลี่ยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจะลดลงตามความสูง คือยิ่งสูงจากพื้นผิวโลกขึ้นไป ปริมาณไอน้ำในอากาศก็ยิ่งจะลดลง แต่การกระจายของไอน้ำในบางส่วนของบรรยากาศอาจจะเป็นไปในทางตรงข้ามเป็นครั้งคราว

4. ฝุ่นละออง (Aerosol) อนุภาคของแข็งลอยอยู่ในบรรยากาศมากมาย อนุภาคเหล่านี้รวมถึงผงฝุ่นละเอียดที่ถูกลมพัดจากพื้นผิวดินขึ้นไป เหมม่าที่เกิดจากไฟฟ้า จากโรงงานอุตสาหกรรม และภูเขาไฟ ละอองเธรสและจุลินทรีย์ที่ถูกลมพัดพาไป ฝุ่นละอองที่เกิดจากดาวตกและเกลือที่เกิดจากละอองน้ำในมหาสมุทรระเหยกลายเป็นไอ อนุภาคที่ใหญ่ๆ ก็หนักเกินไปที่จะลอยอยู่ในอากาศได้ นอกจากนี้ยังมีอนุภาคขนาดเล็กเป็นจำนวนมากที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ล่องลอยอยู่ในบรรยากาศเป็นเดือนเป็นปี เช่น อนุภาคเล็กๆ ของฝุ่นละอองที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ อนุภาคฝุ่นละอองเล็กๆ เหล่านี้จะทำหน้าที่คล้ายกับเป็นแก่น (nuclei) ที่ล้อมรอบด้วยหยดน้ำหรือเกล็ดน้ำแข็ง สิ่งเหล่านี้จะมีผลต่อความโปร่งใสของอากาศ ซึ่งไม่เพียงแต่จะลดทัศนวิสัยลงเท่านั้น แต่ยังกั้นพลังงานดวงอาทิตย์ไม่ให้ส่องทะลุถึงพื้นผิวโลกอีกด้วย ได้มีการตั้งข้อสังเกตว่ามนุษย์เป็นผู้เปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ เช่น โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เครื่องบินที่บินในระดับสูง เป็นตัวการเพิ่มปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศ ถึงแม้มนุษย์จะเป็นตัวการใหญ่ในการนี้แต่ก็ยังน้อยเมื่อเทียบกับแหล่งอนุภาคฝุ่นละอองตามธรรมชาติอื่นๆ เช่น ภูเขาไฟ ขนาดของอนุภาคมวลสารชนิดต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2 [13]

ตารางที่ 2
แสดงขนาดทั่วไปของอนุภาคมวลสาร

สาร	ขนาดใหญ่สุด (ไมครอน)	ขนาดเล็กสุด (ไมครอน)
ละอองน้ำ	500	40
ผงถ่านหิน	250	25
ฝุ่น	200	20
ฝุ่นโรงถลุงเหล็ก	200	1
ผงซีเมนต์	150	10
จี๊เล้า	110	3
เธรสดอกไม้	60	20
หมอก	40	1.5
สปอร์ต้นไม้	30	10

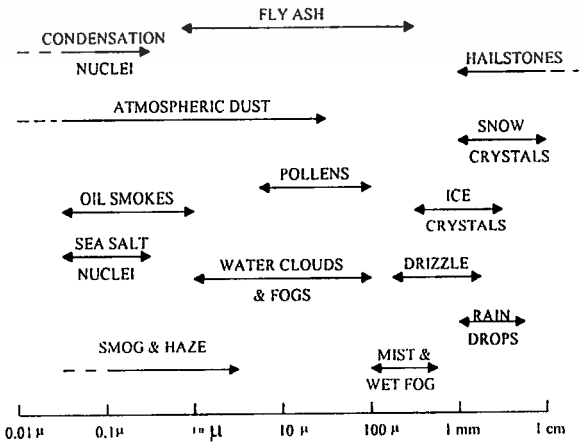
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 (ต่อ)

สาร	ขนาดใหญ่สุด (ไมครอน)	ขนาดเล็กสุด (ไมครอน)
แบคทีเรีย	15	1
ยากำจัดแมลงแบบผง	10	0.4
สีฝุ่น	4	0.1
สมีอก	2	0.001
ควันบุหรี่	1	0.01
ควันน้ำมัน	1	0.03
ควันซิงค์ออกไซด์	0.3	0.01
ควันถ่านหิน	0.2	0.01
ไวรัส	0.05	0.003

ตารางที่ 2 แสดงขนาดทั่วไปของอนุภาคมวลสาร โดยสรุปฝุ่นขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน มาจากไอเสียรถยนต์ ปฏิกริยาระหว่างก๊าซชนิดต่างๆ ควันไฟ พายุฝุ่น ละอองน้ำทะเลและโรงงานอุตสาหกรรม, ฝุ่นขนาด 0.1-1.0 ไมครอน มาจากการรวมตัวของควัน ไอเสียกับไอน้ำ อนุภาคขนาด 0.4-0.9 ไมครอน เป็นตัวการในการกระจายแสงและทำให้ท้องฟ้าขมุกขมัว ฝุ่นขนาดใหญ่กว่า 1.0 ไมครอน มาจากการรวมตัวใหญ่ขึ้นของควันไฟ จี๊ถั่ว ผงโลหะจากการขัดสี เกสรดอกไม้ และแมลง

ภาพที่ 1



แสดงขนาดของอนุภาคต่างๆ ในอากาศ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฝุ่นละอองที่เกิดจากมลภาวะจากแหล่งต่างๆ เมื่อลอยขึ้นไปในชั้นบรรยากาศจะรวมตัวกันเป็นสารประกอบชนิดต่างๆ โดยจะมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ ซึ่งมีผลต่อการลดทอนของคลื่นโดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงคลื่นอินฟราเรดและช่วงที่สายตาคนสามารถมองเห็นได้ สารประกอบ Aerosol มีมากมายหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาแสดงได้ดังตารางที่ 3 [5]

ตารางที่ 3
แสดงตัวอย่างสารประกอบ Aerosol ชนิดต่างๆ

SiO_2	$\text{K}_2\text{Sn}(\text{SO}_4)_2$
CaCO_3	$(\text{NH}_4)_2\text{Co}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	$(\text{NH}_4)_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$ (letovicite)
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$3(\text{NH}_4\text{NO}_3) \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
$(\text{NH}_4)\text{Pb}(\text{SO}_4)_2$	$2(\text{NH}_4\text{NO}_3) \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
$(\text{NH}_4)\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{NH}_4\text{MgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
$(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$	NaCl
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	$(\text{NH}_4)_2\text{Ni}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

การแบ่งชั้นบรรยากาศตามเกณฑ์อุณหภูมิ

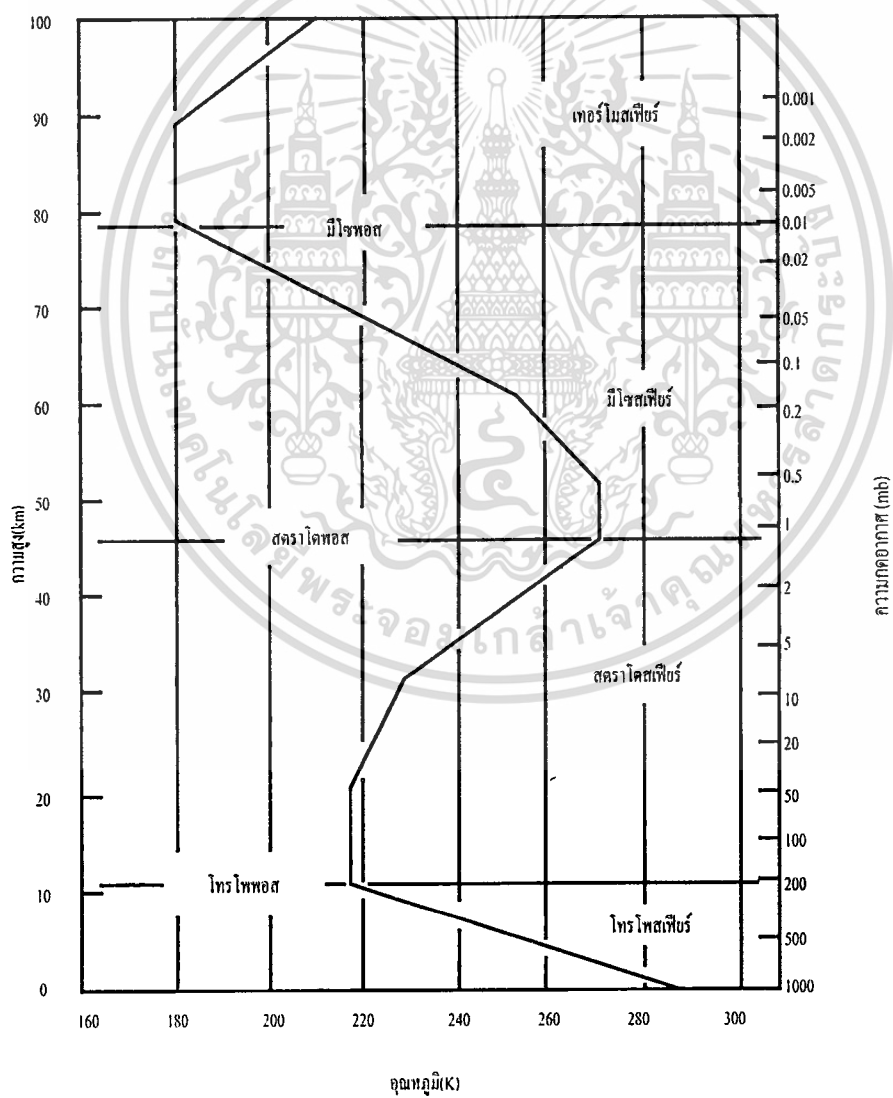
โครงสร้างของชั้นบรรยากาศในแนวดิ่งแบ่งตามอุณหภูมิมิ 4 ชั้น คือ โทรโพสเฟียร์, สตราโตสเฟียร์, มีโซสเฟียร์ (Mesosphere) และเทอร์โมสเฟียร์ (Thermosphere) ส่วนบนสุดของแต่ละชั้นเรียกว่า โทรโปพอส (Tropopause), สตราโตพอส (Stratopause) และมีโซพอส (Mesopause) ตามลำดับ ดังภาพที่ 2

1. โทรโพสเฟียร์ เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่ตอนล่างสุดใกล้กับพื้นโลก เป็นชั้นบรรยากาศซึ่งนอกจากจะประกอบด้วยบรรยากาศร้อยละ 75 โดยน้ำหนักแล้ว ยังประกอบด้วยความชื้นและฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศทั้งหมด และเป็นชั้นบรรยากาศที่มีการผสมกันในแนวดิ่ง

ลักษณะเด่นของบรรยากาศชั้นนี้คืออุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ ลดลงตามระดับความสูง อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามความสูงในบรรยากาศชั้นนี้ โดยเฉลี่ยประมาณ 6.5 องศาเซลเซียสต่อเอกซาล์เป็นเอกซาล์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิโลเมตร อุณหภูมิจะลดลงตามความสูงอย่างรวดเร็วในบริเวณเหนือภาคพื้นทวีปในฤดูร้อนและเหนือภาคพื้นมหาสมุทรในฤดูหนาว ในบางกรณีอาจจะเกิดมีชั้นแคบๆ ในส่วนของโทรโพสเฟียร์ที่อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามความสูง ซึ่งเรียกว่าเกิดการหักกลับของอุณหภูมิ (Temperature inversion) ชั้นแคบๆ นี้เกิดจากการเย็นลงของผิวพื้นดินโดยการแผ่รังสี หรือจากการที่อากาศอุ่นสัมผัสกับพื้นผิวที่เย็นกว่า การหักกลับของอุณหภูมิส่วนมากจะเกิดบริเวณเหนือภาคพื้นทวีปในฤดูหนาว และเกิดบริเวณเหนือภาคพื้นมหาสมุทรในฤดูร้อน

ภาพที่ 2



แสดงการแบ่งชั้นบรรยากาศในแนวดิ่งตามเกณฑ์อุณหภูมิ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนบนสุดของโทรโพสเฟียร์ เรียกว่า โทรโปพอส ความสูงของระดับโทรโปพอสไม่คงที่แปรเปลี่ยนไปตามบริเวณและไม่มี ความต่อเนื่อง โทรโปพอสจะอยู่สูงที่สุดเหนือบริเวณเส้นศูนย์สูตรคือสูงประมาณ 18 กิโลเมตร และต่ำที่สุดเหนือบริเวณขั้วโลกคือสูงประมาณ 8 กิโลเมตร นั่นคืออุณหภูมิของอากาศชั้นต่างๆ สูงยิ่งขึ้นเท่าไรระดับของโทรโปพอสจะสูงขึ้นเท่านั้น

อัตราเปลี่ยนของอุณหภูมิตามความสูงของบรรยากาศชั้นนี้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 6.5 องศาเซลเซียสต่อกิโลเมตร ดังนั้นอุณหภูมิของโทรโปพอสจะมีค่าต่ำในบริเวณเหนือเส้นศูนย์สูตร ซึ่งหมายความว่า อุณหภูมิต่ำสุดของบรรยากาศในชั้นโทรโพสเฟียร์จะอยู่เหนือบริเวณเส้นศูนย์สูตร และมีค่าประมาณ -85 องศาเซลเซียส ณ ระดับความสูง 17 ถึง 20 กิโลเมตร ในทางตรงข้ามอุณหภูมิต่ำสุดของโทรโปพอสเหนือบริเวณขั้วโลกจะมีค่าประมาณ -60 องศาเซลเซียสที่ระดับความสูง 7 ถึง 10 กิโลเมตร

โทรโปพอสจะสังเกตได้จากการหักกลับของอุณหภูมิ เหนือระดับนี้ขึ้นไปอุณหภูมิกลับเพิ่มขึ้นตามความสูงแทนที่จะลดลงตามความสูงโทรโปพอสจึงเป็นระดับสูงสุดที่จำกัดการเกิดเมฆและพายุต่างๆ

2. สตราโตสเฟียร์ เป็นส่วนของบรรยากาศที่อยู่เหนือโทรโพสเฟียร์ขึ้นไปจนถึงระดับความสูง 50-55 กิโลเมตร โดยปกติอุณหภูมิในระดับต่างๆ ของชั้นสตราโตสเฟียร์จะคงที่จนถึงระดับความสูง 20 กิโลเมตร ซึ่งเรียกว่าชั้นอุณหภูมิเท่า (Isothermal layer) เหนือจากชั้นนี้ขึ้นไปอุณหภูมิจะค่อยๆ สูงขึ้นจนถึงระดับ 30-35 กิโลเมตร และต่อจากนั้นอุณหภูมิก็จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อกิโลเมตร ที่ระดับสูงสุดของสตราโตสเฟียร์หรือที่ระดับ 50-60 กิโลเมตร เรียกว่าสตราโตพอส อุณหภูมิสูงสุดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 27-77 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าหรือพอๆ กับอุณหภูมิที่พื้นผิวโลก

ในบรรยากาศชั้นนี้มีความชื้นและฝุ่นละอองเพียงเล็กน้อย ยกเว้นในกรณีที่มีการระเบิดของภูเขาไฟขึ้นสู่ระดับสูงๆ นอกจากนี้ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนจะมีอยู่สูงในบรรยากาศชั้นนี้ โอโซนที่มีอยู่มากในบรรยากาศชั้นนี้จะดูดรังสีเหนือม่วงจากดวงอาทิตย์ และเนื่องจากมวลอากาศในบรรยากาศชั้นนี้มีความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นรังสีดวงอาทิตย์ที่ได้รับจะถูกถ่ายเทให้โมเลกุลต่างๆ ที่มีอยู่เป็นจำนวนค่อนข้างน้อย ทำให้โมเลกุลเหล่านี้มีพลังงานจลน์สูงและยังผลให้อุณหภูมิของบรรยากาศชั้นนี้สูง พลังงานความร้อนที่ได้จะถูกถ่ายเทไปสู่ระดับต่ำๆ โดยการจมลง (Subsidence) และการแผ่รังสี ดังนั้นบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์จึงมีแหล่งความร้อนในระดับสูงๆ ซึ่งต่างจากบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ที่ได้รับความร้อนส่วนใหญ่จากบริเวณตอนล่างๆ

บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์และสตราโตสเฟียร์มีความแตกต่างของสภาพลมฟ้าอากาศอย่างมากมาย ในชั้นสตราโตสเฟียร์การขาดความร้อนในแนวคิ่งมีน้อยกว่าเนื่องจากอากาศร้อนในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนบนและเย็นในส่วนล่างจึงไม่ทำให้เกิดเมฆแม้ว่าจะตรวจพบเมฆหอยมุก (Mother of pearl clouds) เป็นครั้งคราวในบริเวณละติจูดสูงๆ ณ ระดับความสูงประมาณ 20-30 กิโลเมตร

3. มีโซสเฟียร์ เหนือระดับสตราโตสเฟียร์ขึ้นไปในระดับ 80 กิโลเมตรโดยประมาณจะเป็นชั้นบรรยากาศที่เรียกว่ามีโซสเฟียร์ อุณหภูมิของอากาศในชั้นนี้จะลดลงตามระดับความสูงจนถึง -95 องศาเซลเซียสที่ระดับมีโซพอส ดังนั้นมีโซพอสจึงเป็นระดับที่มีความหนาวเย็นของบรรยากาศมากที่สุด

ในฤดูร้อนอากาศในบรรยากาศชั้นนี้เหนือบริเวณแถบขั้วโลกอาจจะมีการเคลื่อนตัวในแนวตั้งก่อให้เกิดเป็นเมฆชั้นบางๆ ในมีโซสเฟียร์ชั้นบนๆ ได้ แต่ภายใต้สภาวะปกติการเกาะตัวกันของอนุภาคต่างๆ ในเมฆมีอยู่น้อยมากเกินกว่าที่จะเห็นได้จากพื้นผิวโลก อย่างไรก็ตามในบริเวณละติจูดสูงๆ จะสังเกตเห็นเมฆสี ปรากฏเป็นครั้งคราวในระดับที่ดวงอาทิตย์อยู่ต่ำกว่าขอบฟ้าประมาณ 5-13 องศา อาจจะเป็นไปได้ว่าเมฆเหล่านี้ประกอบด้วยอนุภาคฝุ่นละอองที่ปกคลุมด้วยน้ำแข็ง

จากพื้นผิวโลกขึ้นไปจนถึงระดับมีโซพอสจะถือว่าเป็นระดับที่อากาศรวมเป็นเนื้อเดียวกัน กล่าวคือ ส่วนผสมของก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศนี้เกือบคงที่ ยกเว้นไอน้ำและโอโซน ซึ่งมีปริมาณที่แปรเปลี่ยนได้ ดังนั้นอาจรวมเรียกบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ สตราโตสเฟียร์และมีโซสเฟียร์ว่า โฮโมสเฟียร์ (Homosphere)

4. เทอร์โมสเฟียร์ เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่เหนือมีโซพอสขึ้นไปจนถึงระดับ 400-500 กิโลเมตร บรรยากาศชั้นนี้อุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรกจนถึงระดับ 110 กิโลเมตร จากนั้นอัตราการสูงขึ้นของอุณหภูมิจะลดลง บรรยากาศชั้นนี้จะร้อนมาก อุณหภูมิจะอยู่ในพิสัยของ 227-1,727 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของอนุภาคต่างๆ มีน้อยมาก โอกาสที่อนุภาคต่างๆ จะชนกันนั้นมีไม่บ่อยนัก และบางอนุภาคก็สามารถหนีรอดแรงดึงดูดของโลกได้

บรรยากาศชั้นนี้ถือว่าเป็นบริเวณที่เปลี่ยนจากบรรยากาศของโลกมาเป็นก๊าซระหว่างดาวที่บางเบาที่เรียกว่า เอกโซสเฟียร์ (Exosphere)

จากภาพที่ 2 ความกดอากาศที่สตราโตสเฟียร์จะมีค่าประมาณ 1 มิลลิบาร์ เมื่อเปรียบเทียบกับความกดอากาศที่พื้นโลกซึ่งมีค่าประมาณ 1,000 มิลลิบาร์ ปรากฏว่า มวลในบรรยากาศ 99.9% จะอยู่ในชั้นโทรโพสเฟียร์และสตราโตสเฟียร์ ส่วนมวลที่เหลือ 0.1% นั้น 0.099% จะอยู่ในชั้นมีโซสเฟียร์ และอีก 0.001% จะอยู่ในชั้นเทอร์โมสเฟียร์

1. โทรโพสเฟียร์ เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่ติดผิวโลกขึ้นไปจนถึงระดับความสูงโดยเฉลี่ยประมาณ 10 กิโลเมตร ส่วนผสมที่สำคัญของชั้นบรรยากาศที่ชั้นนี้คือไอน้ำ เซอร์ริง (Suring) ได้ให้ข้อคิดว่า 90% ของจำนวนไอน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในชั้นระหว่างจากพื้นผิวโลกขึ้นไปจนถึง 6 กิโลเมตร และเหนือระดับ 10 กิโลเมตรขึ้นไปอากาศจะมีความชื้นน้อยกว่า 1% ของความชื้นทั้งหมด

2. ไอโซโนสเฟียร์ เหนือระดับโทรโพสเฟียร์ขึ้นไปจะถึงระดับ 50-55 กิโลเมตร จะมีชั้นอากาศที่มีไอโซนรวมตัวกันมากกว่าบรรยากาศชั้นอื่นๆ โดยเฉพาะที่บริเวณความสูงประมาณ 25 กิโลเมตร จะมีปริมาณความเข้มข้นของไอโซนมากที่สุดประมาณ 0.2ppm เราจึงเรียกบรรยากาศชั้นนี้ว่า ไอโซโนสเฟียร์

ปริมาณของไอโซนที่อยู่ในบรรยากาศชั้นที่ต่ำกว่าไอโซโนสเฟียร์จะมีอยู่น้อยมากในบริเวณที่ต่ำกว่าระดับ 10 กิโลเมตร ไอโซนที่อยู่ในระดับที่สูงกว่าจะดูดเอารังสีเหนือม่วงไว้เกือบหมด ดังนั้นจึงไม่มีตัวการที่ทำให้โมเลกุลออกซิเจนแตกตัวเป็นอะตอม ส่วนที่บริเวณเหนือระดับ 50-55 กิโลเมตร นี้ออกซิเจนอยู่ในปริมาณที่เบาบางมากเกินไปที่จะเกิดการชนระหว่างโมเลกุลออกซิเจนและอะตอมออกซิเจน ดังนั้นในระดับสูงๆ จึงไม่ค่อยมีไอโซน

3. ไอโอโนสเฟียร์ ในปี พ.ศ.2445 ซึ่งเป็นปีที่ Tiesserence de Bort พบบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ Kennally และ Heaviside ได้ให้ความเห็นอย่างเป็นกลางว่าในระดับสูงๆ จะต้องมีความเข้มข้นอากาศที่มีความแตกตัวสูงเพราะปราศจากอากาศชั้นนี้แล้วก็ไม่สามารถอธิบายถึงสาเหตุการส่งวิทยุระยะไกลๆ ได้

บรรยากาศจะเกิดการแตกตัวขึ้นได้เมื่อมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่เป็นจำนวนมากและมากพอที่จะมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สิ่งสำคัญในการเกิดการแตกตัวคือจะต้องเป็นบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำ เพราะถ้าเป็นบริเวณที่มีความกดอากาศปกติ โมเลกุลและอะตอมมีปรากฏอยู่มากมายจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระอยู่ในอากาศได้ไม่นานพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัว ความกดอากาศต่ำที่จะทำให้เกิดการแตกตัวในบรรยากาศได้นั้นจะอยู่ที่ความสูงประมาณ 60 กิโลเมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความกดอากาศประมาณ 0.35 มิลลิบาร์ ผลจากการแตกตัวนี้สามารถตรวจพบได้ในระดับนี้ขึ้นไปจนถึงระดับประมาณ 1,000 กิโลเมตรจึงถือว่าเป็น ไอโอโนสเฟียร์ หรือ บางทีเรียกว่า ชั้นของเฮฟวิไซด์ (Heaviside)

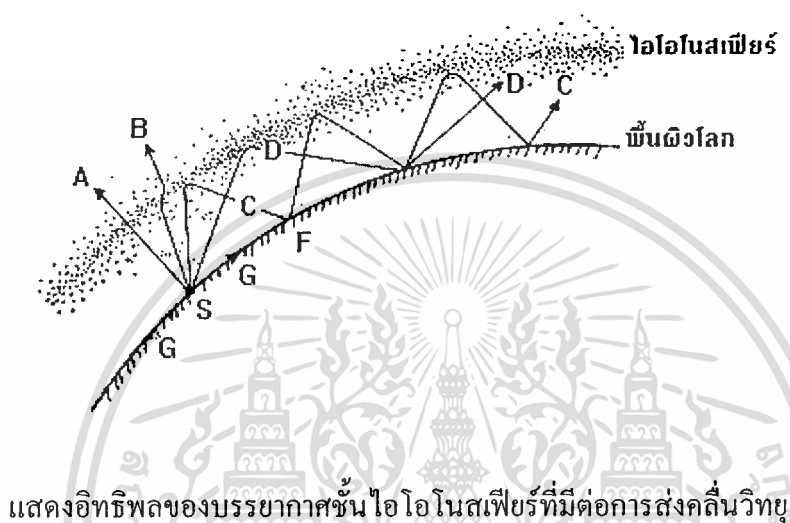
ระหว่างชั้นของไอโอโนสเฟียร์และพื้นผิวโลกนั้น คลื่นวิทยุจะถูกสะท้อนไปมาซ้ำแล้วซ้ำอีก ทำให้สามารถส่งสัญญาณวิทยุได้ไกลเป็นระยะทางหลายพันกิโลเมตรดังแสดงในภาพที่ 4

ภาพที่ 4 แสดงผลของชั้นบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการส่งคลื่นวิทยุ คลื่นแนวตั้ง A จะลอดผ่านบรรยากาศชั้นนี้โดยปราศจากการเลี้ยวเบน คลื่น B ลอดผ่านไปได้เช่นเดียวกับ A หลังจากเลี้ยวเบนไป 2 ครั้ง คลื่น C และคลื่นอื่นๆ ที่มีมุมเงยเล็กกว่าจะมีการสะท้อนกลับมาระหว่างเอ็กสเฟียร์กับเอ็กสเฟียร์สองครั้งสำหรับการใช้งานเพื่อการสื่อสารเท่านั้น ไม่นับญาติให้น่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์กับพื้นผิวโลก ซึ่งเรียกว่า "คลื่นท้องฟ้า" (Sky waves) ส่วนที่ระดับพื้นดิน (Ground waves) จะอ่อนลงอย่างรวดเร็ว บริเวณระหว่าง G และ F จะไม่ได้รับทั้งคลื่นผิวดินและคลื่นท้องฟ้า เรียกบริเวณนี้ว่า เขตแห่งความสงบเงียบ (Zone of silence)

ภาพที่ 4



แสดงอิทธิพลของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการส่งคลื่นวิทยุ

ความเข้มของอิเล็กตรอนอิสระจะค่อยๆ เพิ่มจากระดับ 60 กิโลเมตร จนถึงระดับประมาณ 350 กิโลเมตร (ดังภาพที่ 3) ซึ่งจะมีปริมาณของอิเล็กตรอนอิสระมากที่สุด ดังนั้นไอโอโนสเฟียร์จึงสามารถแบ่งเป็นชั้นย่อยๆ ดังนี้ คือ

3.1 ชั้น D (D-layer) จะปรากฏอยู่ที่ระดับความสูงประมาณ 60-100 กิโลเมตร แต่โดยเฉลี่ยประมาณ 90 กิโลเมตร อากาศชั้นนี้จะเกิดจากรังสีเหนือม่วงจะทำให้โมเลกุลของออกซิเจนเกิดการแตกตัวหรือแยกตัวออกจากกัน สมบัติของบรรยากาศชั้นนี้คือสะท้อนคลื่นวิทยุที่มีความถี่ต่ำ และจะดูดคลื่นวิทยุที่มีความถี่กลางๆ และความถี่สูงๆ ไว้ ชั้น D นี้มีความสัมพันธ์กับการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ กล่าวคือจะปรากฏเมื่อมีแสงอาทิตย์และจะหายไปในทันทีเมื่อดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้า ในขณะที่แสงอาทิตย์โชติช่วงชั้น D จะก่อตัวได้ดีและดูดคลื่นวิทยุที่มีความถี่ปานกลางและความถี่สูงไว้ทั้งหมด แล้วสะท้อนกลับเฉพาะคลื่นความถี่ต่ำๆ เท่านั้น ภาววิศวกรรมโทรคมนาคมเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดการรบกวนอย่างฉับพลันในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Sudden Ionospheric Disturbances, SID)

3.2 ชั้น E (E-layer) ชั้น E จะเกิดที่ระดับความสูงจาก 90-130 กิโลเมตร มีสมบัติในการสะท้อนคลื่นวิทยุที่มีความถี่ปานกลางและความถี่สูงได้ดี อากาศชั้นนี้อาจเกิดจากการกระทำของเม็ดแสงเหนือม่วง (Ultraviolet photon) ของดวงอาทิตย์ที่มีต่อโมเลกุลต่างๆ ของออกซิเจนและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโทรเจน ชั้น E นี้จะอ่อนกำลังลงในทันทีที่ดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้า สสารต่าง ๆ จะเริ่มรวมตัวกันใหม่ และกระทำได้เร็วมากโดยเฉพาะบริเวณล่าง ๆ ของชั้น E เท่านั้น ดังนั้น ชั้น E จะค่อย ๆ เบาลงในเวลากลางคืน แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าบรรยากาศชั้นนี้จะสลายไปเลย ยกเว้นในกรณีที่มีกลางคืนยาวนาน ชั้น E จะหายไปเลย

3.3 ชั้นสปอเรติก E (Sporadic E-layer) อากาศชั้นนี้จะเกิดนานๆ ครั้งและเกิดในกรณีพิเศษเท่านั้น ซึ่งเกิดเนื่องจากดาวตกต่างๆ และบางที่เกิดจากกลไกเดียวกันกับที่ทำให้เกิดแสงเหนือ สภาวะของอากาศชั้นนี้บางที่ทำให้เกิดเมฆ ซึ่งการเคลื่อนตัวของเมฆอาจพิจารณาได้จากผลกระทบที่มีต่อการส่งคลื่นวิทยุ โดยเฉพาะคลื่นวิทยุที่มีความถี่สูงมากๆ

3.4 แถบ E2 (E2 region) บริเวณนี้ส่วนมากจะเกิดในเวลากลางวันที่มีระดับความสูงประมาณ 150 กิโลเมตร ย่าน E2 นี้ อาจเกิดจากการแตกตัวของอะตอมของออกซิเจนอันเนื่องจากรังสีจากดวงอาทิตย์

3.5 แถบ F (F region) เป็นย่านกว้างที่การสะท้อนของคลื่นวิทยุเกิดขึ้น แบ่งย่อยออกเป็น 2 ชั้น คือ

- แถบ F1 (F1 region) เป็นบริเวณที่เกิดในเวลากลางวัน ส่วนในเวลากลางคืนจะรวมกับชั้น F2 ที่อยู่เหนือขึ้นไป แถบ F1 อาจจะตรวจพบได้ในเวลากลางคืนได้เป็นครั้งคราวระหว่างการเกิดการรบกวนในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ อากาศในบริเวณนี้มีความสำคัญต่อการเคลื่อนตัวของคลื่นวิทยุในความถี่ปานกลางและความถี่สูง และเป็นชั้นบรรยากาศที่อาจจะเกิดจากการดูดแสงเหนือม่วงของอะตอมออกซิเจนและโมเลกุลไนโตรเจน

- แถบ F2 (F2 region) เป็นบริเวณที่อยู่ในระดับความสูงระหว่าง 220-380 กิโลเมตร หรือโดยเฉลี่ยที่ระดับ 300 กิโลเมตร เป็นชั้นที่อาจเกิดจากปฏิกิริยาของเม็ดแสงเหนือม่วงที่มีต่อโมเลกุลไนโตรเจน และต่ออะตอมออกซิเจน แต่ในประมาณที่น้อยกว่า แถบ F2 เป็นชั้นบรรยากาศที่มีความสำคัญมากต่อวิทยุโทรคมนาคมระยะไกล

3.6 แถบ G (G region) บริเวณนี้จะปรากฏให้เห็นเป็นครั้งคราวที่ระดับความสูงประมาณ 400 กิโลเมตร เมื่อบริเวณ F2 มีกำลังอ่อนผิดปกติ แถบ G อาจจะปรากฏอยู่เป็นประจำแต่ไม่สามารถตรวจพบได้เนื่องจากแถบ F2 สามารถสะท้อนคลื่นได้ทุกชนิดเหมือนกับแถบ G อิเล็กตรอนอิสระในชั้นอากาศนี้เกิดจากปฏิกิริยาของเม็ดแสงเหนือม่วงที่มีต่ออะตอมไนโตรเจน

4. เอกโซสเฟียร์ ที่ระดับเหนือไอโอโนสเฟียร์ ความหนาแน่นของอะตอมต่าง ๆ ในบรรยากาศจะน้อยลง ๆ จะกระแทกกันระหว่างอนุภาคต่าง ๆ เกิดได้ยากมาก เหนือระดับนี้ขึ้นไปจะเรียกว่าระดับวิกฤต (Critical Level) Lyman Spitzer เรียกส่วนที่อยู่ชั้นนอกสุดของชั้นบรรยากาศโลกที่มีการชนกันระหว่างอนุภาคต่างๆ น้อยมากนี้ว่า เอกโซสเฟียร์ ระดับความสูงจริงๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฐานของเอกโซสเฟียร์นั้นไม่แน่นอน Spitzer ให้ความเห็นว่าอยู่เหนือระดับ 300 กิโลเมตร ซึ่งอาจจะเป็นบริเวณ 500-1,000 กิโลเมตร

เนื่องจากความหนาแน่นของอากาศในชั้นนี้เบาบางมาก อุณหภูมิในบริเวณฐานของบรรยากาศชั้นนี้จะมีค่าประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส และส่วนบนสุดของบรรยากาศมีค่าประมาณ 10,000 เคลวิน หรือ 9,727 องศาเซลเซียส ชั้นบนๆ ของบรรยากาศนี้จะมีไฮโดรเจนและฮีเลียมมาก

การแบ่งชั้นบรรยากาศตามเกณฑ์อุณหภูมิตามทฤษฎี

เนื่องจากบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์เป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากการแผ่รังสี การพาความร้อน และการระเหย การกลั่นตัวระหว่างโลกและบรรยากาศที่มีกำลังแรง โทรโพสเฟียร์จึงสามารถแบ่งออกเป็นชั้นได้โดยพิจารณาตามความสัมพันธ์ต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณพื้นผิวโลกหรือใกล้พื้นผิวโลก ดังนั้นการแบ่งชั้นบรรยากาศโดยถือเกณฑ์อุณหภูมิตามทฤษฎีจึงแบ่งออกได้ดังนี้คือ บริเวณที่มีอิทธิพลของความฝืด โทรโพสเฟียร์ชั้นกลางและชั้นบน โทรโพพอส สตราโตสเฟียร์และบรรยากาศชั้นสูง

1. บริเวณที่มีอิทธิพลของความฝืด จากบริเวณพื้นผิวโลกขึ้นไปจนถึงระดับ 0.5-2 กิโลเมตร จะเป็นบริเวณที่การไหลเวียนของมวลอากาศได้รับอิทธิพลเนื่องมาจากความฝืดและจากลักษณะของพื้นผิวโลกนั้นๆ การหักกลับของอุณหภูมิต่างๆ จะเกิดอยู่ในอากาศชั้นนี้ โครงสร้างในชั้นนี้จะแปรเปลี่ยนตามความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของโลกรับอากาศในบริเวณนั้นๆ โดยวิธีการแผ่รังสี การพาความร้อน และการถ่ายเทอย่างหมุนวน (Eddy flux) การแปรเปลี่ยนของโครงสร้างบรรยากาศนี้ขึ้นอยู่กับ

1.1 ละติจูด การแปรเปลี่ยนชนิดนี้มีความสำคัญมากพอควรเนื่องจากการขนส่งความร้อนต่างๆ เหล่านี้จะต้องถ่ายเทจากละติจูดหนึ่งไปสู่อีกละติจูดหนึ่ง ดังนั้นสมบัติการพาความร้อนในแนวอนึ่งจะมีผลต่อลักษณะอากาศในแต่ละแห่ง ในบริเวณที่อยู่ละติจูดสูงๆ รังสีความร้อนจากโลกที่แผ่ออกไปนั้นมีมาก อากาศในชั้นล่างๆ จะเย็นลงอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นแถบขั้วโลกจะเกิดอุณหภูมิหักกลับบ่อยๆ ส่วนในบริเวณเขตร้อนรังสีดวงอาทิตย์ที่โลกได้รับนั้นมีมากกว่าที่สูญเสียไป อุณหภูมิหักกลับจึงไม่เกิดในแถบนี้

1.2 ภูมิประเทศ การแปรเปลี่ยนที่เกิดจากความแตกต่างของพื้นผิวชนิดต่างๆ เช่น แผ่นดินและพื้นน้ำ อุณหภูมิหักกลับมักเกิดบริเวณเหนือพื้นดินในฤดูหนาวและเกิดเหนือพื้นน้ำในฤดูร้อน เนื่องจากในฤดูหนาวอากาศเหนือมหาสมุทรหรือจากบริเวณที่อุ่นกว่าที่ถูกส่งมายังพื้นดินจะเอ็กสทรานเป็นเอ็กสทรานที่พลังงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกทำให้เย็นลงจากเบื้องล่าง เช่นเดียวกันในฤดูร้อนอากาศเหนือพื้นดินหรือในเขตร้อนที่ถูกพาไปเหนือน่านน้ำบริเวณมหาสมุทรจะถูกทำให้เย็นลงจากเบื้องล่าง บริเวณเหนือภาคพื้นทวีปโครงสร้างของอุณหภูมิในชั้นล่างสุดจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นประจำทุกวัน ในคืนที่มีเมฆน้อยพื้นผิวโลกจะมีการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีจากโลก จากการหยั่งอุณหภูมิอากาศ (Temperature sounding) ในตอนเช้าตรู่จะปรากฏว่ามีการเกิดหักกลับของอุณหภูมิอยู่เกือบเป็นประจำ การหักกลับของอุณหภูมินี้เรียกว่าเป็นการหักกลับของอุณหภูมิในเวลากลางคืน (Nocturnal inversion) แต่การหักกลับของอุณหภูมินี้จะหายไปในช่วงเวลากลางวันเพราะพื้นผิวโลกได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์

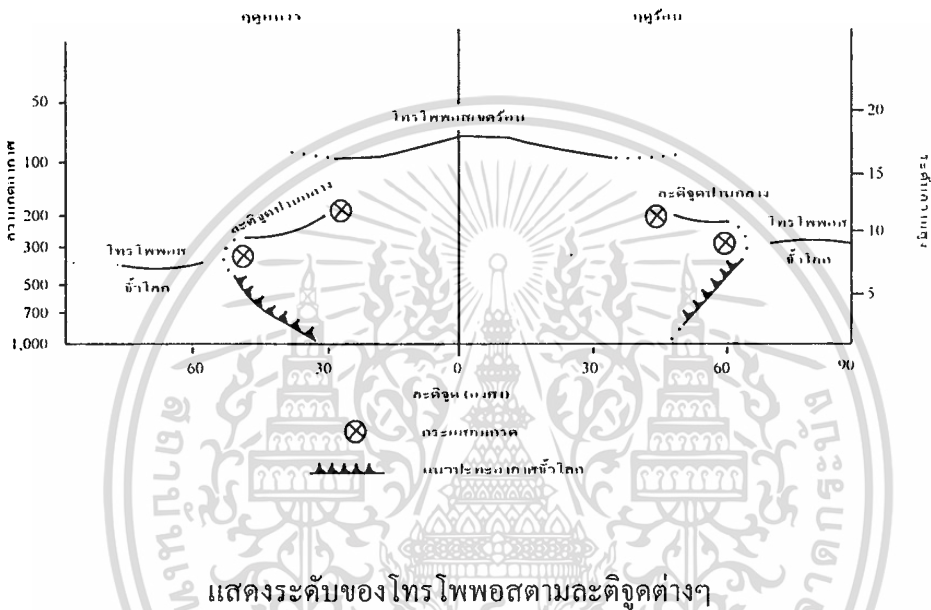
2. โทรโพสเฟียร์ชั้นกลางและชั้นบน ในระดับนี้ความฝืดจะมีผลต่อการไหลเวียนของมวลอากาศน้อยลงมาก อุณหภูมิจะลดลงอย่างสม่ำเสมอเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น ความร้อนที่พื้นผิวโลกได้รับในแต่ละวันนั้นไม่เพียงพอที่จะมีผลต่ออุณหภูมิที่อยู่สูงกว่าระดับ 2 กิโลเมตร ในเกณฑ์ที่เป็นระยะยาวคือเป็นเวลาหลายๆ วันหรือหลายสัปดาห์ ความร้อนที่เกิดเหนือระดับนี้ส่วนมากเกิดจากแผ่รังสีจากโลกหรือการพาความร้อนที่สะสมไว้มากพอที่จะทำให้อากาศค่อยๆ อุ่นขึ้นในฤดูใบไม้ผลิ ในทางตรงข้ามในฤดูใบไม้ร่วงช่วงเวลาในเวลากลางวันสั้นลงจึงมีการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสี ดังนั้นอากาศในชั้นบนๆ จะเย็นลงๆ

3. โทรโพพอส เป็นชั้นอากาศที่อยู่ระหว่างโทรโพสเฟียร์และสตราโตสเฟียร์เป็นเขตของบรรยากาศที่แบ่งชั้นที่มีไอน้ำและไม่มีไอน้ำ การหยั่งอากาศ ณ สถานีใดสถานีหนึ่งจะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนระหว่างอัตราลดปกติของอุณหภูมิที่เกิดในชั้นโทรโพสเฟียร์และชั้นอุณหภูมิเท่าในตอนล่างๆ ของชั้นสตราโตสเฟียร์ ในบางกรณีความไม่ต่อเนื่องอาจจะเห็นได้ไม่ชัดเจนนักโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการที่จะพยายามหาตำแหน่งของโทรโพพอสเป็นบริเวณกว้างๆ จากข่ายสถานีหยั่งอากาศต่างๆ โทรโพพอสจากสถานีหนึ่งอาจมีพฤติกรรมทางบรรยากาศที่ไม่สอดคล้องกับของโทรโพพอสในสถานีอื่น ดังนั้นนักอุตุนิยมวิทยาจึงยอมรับหลักการของการมีหลายโทรโพพอส ที่ว่าโทรโพพอสที่แผ่เหนือบริเวณกว้างใหญ่นั้นมิได้มีเพียงหนึ่ง แต่จะมีมากมายซ้อนเกกันแบบขั้นบันไดจากที่ระดับสูงๆ ที่มีอุณหภูมิต่ำๆ เหนือเขตศูนย์สูตรลาดเอียงไปยังระดับต่ำๆ ที่มีอุณหภูมิสูงใกล้เคียงผิวโลก ดังแสดงในภาพที่ 5

4. สตราโตสเฟียร์ เหนือโทรโพพอสขึ้นไปจนถึงระดับความสูงประมาณ 50-55 กิโลเมตร ถือว่าเป็นชั้นของสตราโตสเฟียร์ เช่นเดียวกับการแบ่งโดยถือเอาอุณหภูมิเป็นเกณฑ์ อุณหภูมิในชั้นนี้จะค่อยๆ สูงขึ้นและมีโอโซนอยู่ในอากาศชั้นนี้ด้วย

5. บรรยากาศชั้นสูง จากระดับสตราโตสเฟียร์ขึ้นไปจนถึงขอบนอกสุดของบรรยากาศ ถือว่าเป็นชั้นบรรยากาศสูงๆ ซึ่งแบ่งย่อยได้เป็นชั้นต่างๆ เหมือนกับของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว [2]

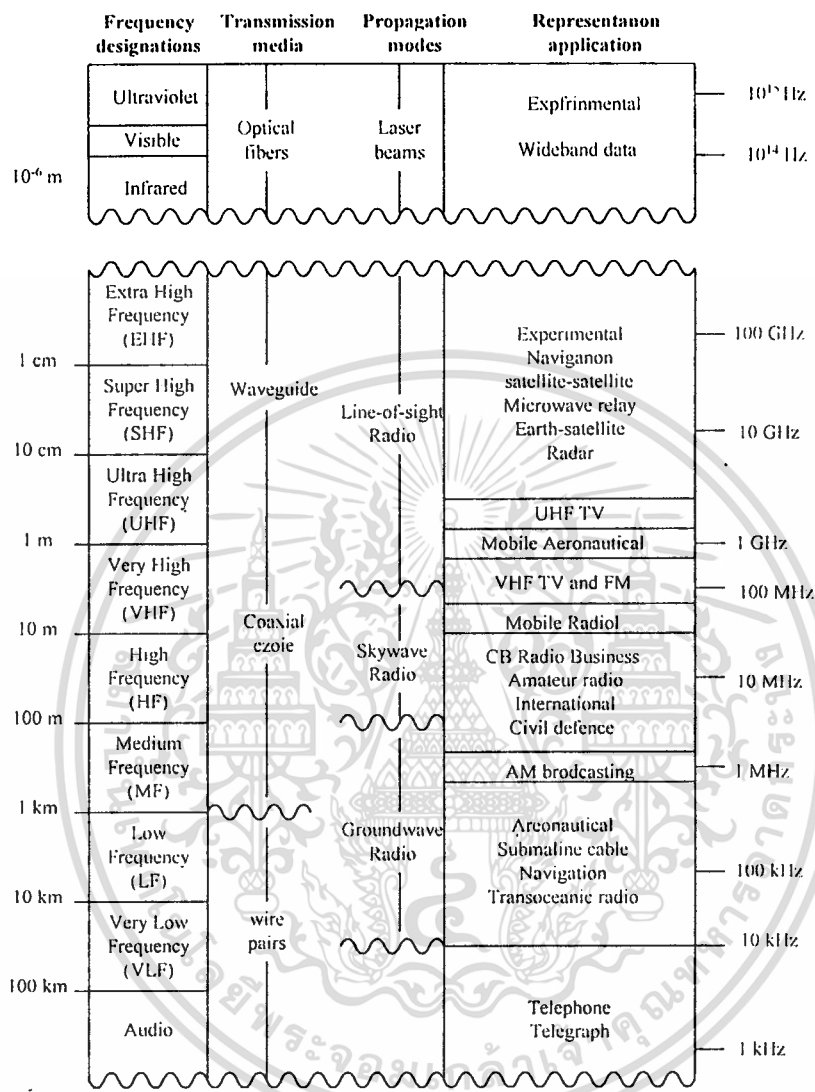
ภาพที่ 5



การแพร่กระจายคลื่น

ในการแพร่กระจายคลื่นผ่านตัวกลางที่เป็นบรรยากาศจะแพร่กระจายในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และหากบรรยากาศมีอนุภาคต่างๆ อยู่มากมาย จะก่อให้เกิดผลกระทบที่สำคัญต่อคลื่น ซึ่งผลกระทบต่างๆ ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นที่แพร่กระจายในอากาศ ในที่นี้จะพิจารณาความถี่ย่านไมโครเวฟขึ้นไปซึ่งจะมีผลกระทบที่สำคัญ คือ การดูดกลืน และการกระเจิงของคลื่น โดยเกิดจากโมเลกุลของก๊าซชนิดต่างๆ เมฆ ฝน หมอก หิมะ และฝุ่นละออง ส่งผลให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ ซึ่งมีผลแตกต่างกันไปในแต่ละช่องความถี่ที่ใช้งาน โดยช่องความถี่สามารถแบ่งได้ดังแสดงในภาพที่ 6 [6]

ภาพที่ 6



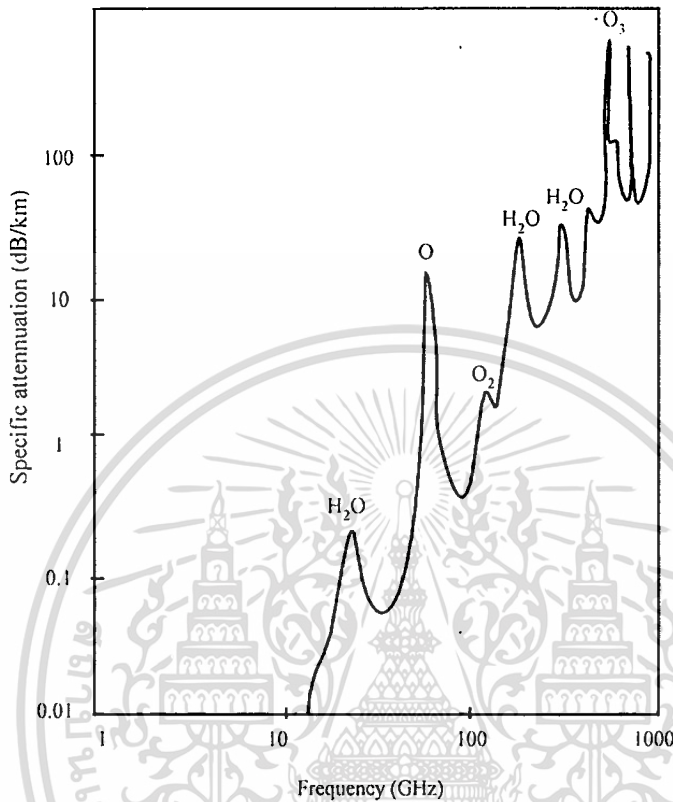
แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การลดทอนของคลื่นวิทยุย่านความถี่ไมโครเวฟ

ในย่านความถี่ไมโครเวฟซึ่งมีค่าความถี่ 1 GHz ขึ้นไป มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงเซนติเมตรถึงมิลลิเมตร ความถี่ในช่วงนี้จะมีผลกระทบกับอนุภาคในอากาศ โดยเฉพาะ H₂O และ O₃ ทำให้มีผลในการลดทอนเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้นแสดงดังภาพที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 7



แสดงการลดทอนของคลื่นวิทยุย่านความถี่ไมโครเวฟ

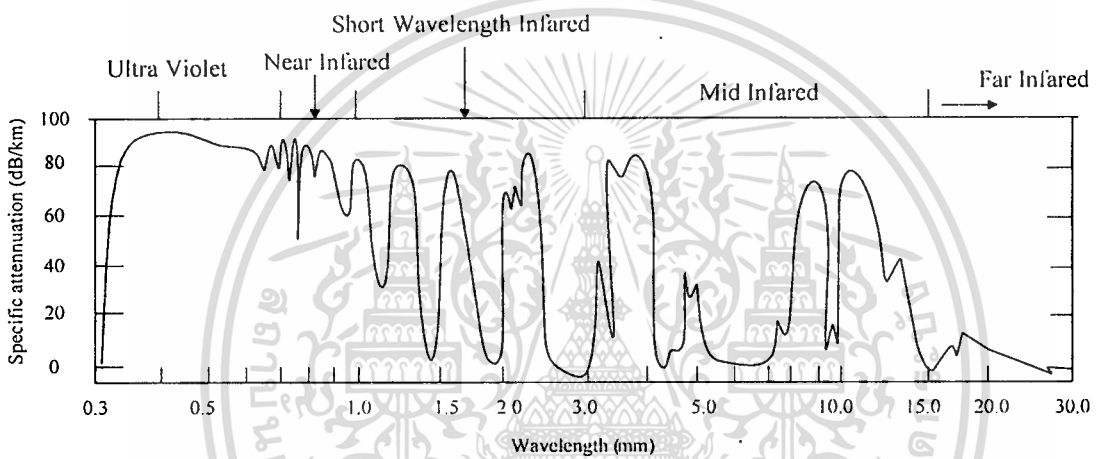
การลดทอนของคลื่นในช่วงอินฟราเรดและช่วงที่สายตากคนสามารถมองเห็น

คลื่นในช่วงนี้มีผลการลดทอนสูงมากเนื่องจากความยาวคลื่นของคลื่นในช่วงนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของอะตอม โมเลกุล และอนุภาคต่างๆ ที่อยู่ในบรรยากาศ และด้วยเหตุผลนี้ซึ่งมีผลทำให้เกิดการแตกกระจายของคลื่นโดยทั่วไป คลื่นแสงซึ่งเดินทางผ่านบรรยากาศทำให้เกิดการดูดกลืนและสะท้อนกลับและเกิดการแตกกระจายของคลื่นจากอะตอม โมเลกุลของก๊าซ และอนุภาคต่างๆ และเข้าสู่สายตาเรา และช่วงคลื่นแสงสีฟ้าจะมีผลต่อการแตกกระจายของคลื่นมากที่สุดทำให้เห็นท้องฟ้าเป็นสีฟ้า หรือในเหตุการณ์เวลาตกเย็นเราจะเห็นท้องฟ้าเป็นสีแดง เนื่องจากปริมาณของอนุภาค โดยเฉพาะฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะทำการสะท้อนความถี่ที่มีค่ามากกว่าแสงสีแดง หรือความยาวคลื่นน้อยกว่าความยาวคลื่นของแสงสีแดง คลื่นเหล่านี้จะถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนทำให้ไม่สามารถผ่านมาได้ ทำให้เราเห็นท้องฟ้าเป็นสีแดงในตอนเย็น และผลประโยชน์อย่างหนึ่งของการดูดกลืนและสะท้อนกลับจากอะตอม โมเลกุล และอนุภาคต่างๆ ที่อยู่ในบรรยากาศ ช่วยทำการยับยั้งรังสีความร้อน รังสีอัลตราไวโอเล็ต ไม่ให้เข้ามาสู่พื้นโลก ดังนั้นคลื่นในช่วงอินฟราเรดและช่วงที่สายตาคนสามารถมองเห็นจะมีผลต่อการลดทอนมาก โดยมีค่าแตกต่างกันในแต่ละความถี่แสดงดังภาพที่ 8

ภาพที่ 8



แสดงการลดทอนของคลื่นในช่วงอินฟราเรดและช่วงที่สายตาคนสามารถมองเห็น

บทที่ 3

หลักการของเลเซอร์และระบบเซ็นเซอร์

กล่าวนำ

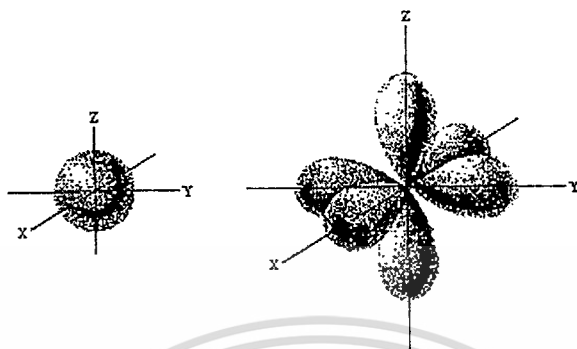
เลเซอร์ (LASER) ย่อมาจากคำในภาษาอังกฤษว่า Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานของเลเซอร์ ระบบเซ็นเซอร์ และระบบเรดาร์

การปล่อยและการดูดกลืนแสง

ตัวปล่อยรังสีความร้อน เช่น ดวงอาทิตย์ จะปล่อยแสงในทุกทิศทางซึ่งอนุภาคโฟตอนแต่ละตัวจะไม่มีความสัมพันธ์กัน ส่วนเลเซอร์ จะเป็นตัวขยายการอสซิลเลตของแสง โดยเอาต์พุตจะประกอบด้วยอนุภาคโฟตอนซึ่งมีเฟส ทิศทาง และขนาดเหมือนกัน ดังนั้นลำแสงที่ได้จะมีทิศทางเดียว มีความเข้มสูง มีความยาวคลื่นเดียว และเป็นแสงแบบโคฮีเร้นท์

การปล่อยและดูดกลืนแสง (ซึ่งแสงในที่นี้คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ในช่วงอินฟราเรดถึงอัลตราไวโอเลต) จะเกิดขึ้นภายในโครงสร้างของอะตอมหรือโมเลกุลของสาร โดยโครงสร้างอะตอมที่มีรูปแบบเดียวกันจะแสดงคุณสมบัติของระบบที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยนิวเคลียส 1 ตัวกับอิเล็กตรอนซึ่งยึดติดกับนิวเคลียส 1 ตัวหรือมากกว่า อิเล็กตรอนแต่ละตัวก็จะใช้วงโคจรที่แตกต่างกันไป วงโคจรที่แตกต่างกันนี้จะแสดงความน่าจะเป็นของการค้นพบอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งที่กำหนดให้ซึ่งสัมพันธ์กับนิวเคลียส แต่ละวงโคจรก็จะมีรูปร่างเฉพาะซึ่งกำหนดโดยรัศมีและมุมที่ขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นของการค้นพบ เช่น วงโคจร S ทั้งหมดจะเป็นทรงกลมที่สมมาตร และวงโคจร P ทั้งหมดครอบคลุมแกน x, y และ z ของนิวเคลียสจะมีลักษณะเป็น Double-lobed ดังแสดงในภาพที่ 9

ภาพที่ 9



แสดงอิเล็กตรอนแต่ละตัวจะใช้วงโคจรที่แตกต่างกันไปซึ่งกำหนดโดยความน่าจะเป็นของการหาอิเล็กตรอน 1 ตัว ที่ตำแหน่งที่กำหนดให้และรูปร่างของวงโคจรจะกำหนดโดยรัศมีและมุมซึ่งขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็น

พลังงานของอิเล็กตรอนหาได้โดยวงโคจรซึ่งอิเล็กตรอนตัวนั้นใช้และพลังงานทั้งหมดของอะตอมหรือที่เรียกว่า ระดับพลังงานของอะตอม ซึ่งขึ้นอยู่กับการกระจายของอิเล็กตรอนทั้งหมดในวงโคจรที่มีอยู่ของอะตอมนั้นๆ แต่ละอะตอมจะมีระดับพลังงานที่เป็นระเบียบคือระดับพลังงานต่ำที่สุดที่เป็นไปได้เรียกว่า Ground state และระดับพลังงานที่สูงกว่าเรียกว่า Excited state ถ้าอะตอมอยู่ใน Ground state อะตอมจะอยู่ที่ระดับดังกล่าวจนกว่าจะมีแรงจากภายนอกมากระตุ้น

การเคลื่อนที่จากระดับพลังงานหนึ่งไปยังอีกระดับพลังงานหนึ่งหรือการเปลี่ยนระดับพลังงานนั้นจะเกิดขึ้นเมื่ออะตอมมีการดูดกลืนหรือปล่อยพลังงาน การเปลี่ยนไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่าจะเกิดจากการชนของอิเล็กตรอนอิสระหรือการกระตุ้นอะตอม ซึ่งการเปลี่ยนระดับพลังงานทั้ง 2 ทิศทางจะเกิดเหมือนผลของการทำปฏิกิริยาของอนุภาคโฟตอนของแสง พิจารณาการเปลี่ยนระดับจากระดับที่ต่ำกว่าซึ่งมีค่าพลังงานเป็น E_1 ไปยังระดับที่สูงกว่าซึ่งมีพลังงานเป็น E_2 การเปลี่ยนระดับจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบอะตอมนั้นเท่ากับความแตกต่างของพลังงานระหว่าง 2 ระดับดังนี้

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1)$$

โดย h คือ ค่าคงที่ของ Planck

ν คือ ความถี่ของโฟตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจาก E_2 มายัง E_1 มันจะสูญเสียพลังงานเท่ากับ $E_2 - E_1$ เพราะอิเล็กตรอนเปลี่ยนมาสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า โดยที่อะตอมไม่ได้รับการกระตุ้นจะมีการปล่อยอนุภาคโฟตอนมากับพลังงาน $h\nu$ และมีความถี่ตามสมการที่ 2

$$\nu = \left(\frac{E_2 - E_1}{h} \right) \quad (2)$$

การลดระดับพลังงานโดยไม่มีการกระตุ้นอาจไม่มีการปล่อยอนุภาคโฟตอนก็ได้ โดยพลังงานที่สูญเสียไปจะอยู่ในรูปอื่นแทน เช่น พลังงานจลน์เนื่องจากการชนของอะตอมอื่น อะตอมที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่ระดับ E_2 สามารถที่จะกลับมาสู่ระดับ E_1 ได้ โดยการทำปฏิกิริยากับความถี่ (ν) ของอนุภาคโฟตอน โดยจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของอนุภาคโฟตอน 1 คู่ ซึ่งมีเฟส ความถี่ และทิศทางเหมือนกับอนุภาคโฟตอนที่ตกกระทบ ในทางตรงข้ามการปล่อยพลังงานโดยไม่มีการกระตุ้นจะมีผลให้อนุภาคโฟตอนที่ปล่อยออกมาไม่มีทิศทางหรือเฟสที่สัมพันธ์กับอนุภาคโฟตอนตัวอื่นๆ

เลเซอร์ถูกออกแบบให้มีความได้เปรียบของการดูดกลืนแสง โดยปรากฏการณ์การปล่อยแสงทั้งที่เกิดจากการกระตุ้นและไม่มีการกระตุ้นจะใช้สร้างเงื่อนไขที่เป็นประโยชน์ต่อการขยายแสงซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้จะกล่าวต่อไป

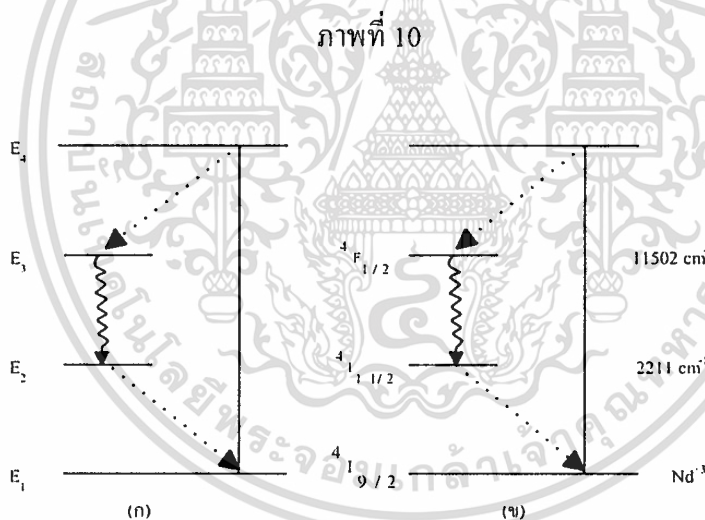
การกลับจำนวนอะตอม

ประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงที่ความถี่หนึ่ง คือความแตกต่างระหว่างอัตราการปล่อยแสงและอัตราการดูดกลืนแสงที่ความถี่นั้นๆ โดยอัตราการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าจากระดับพลังงาน E_1 ไปยัง E_2 จะเป็นสัดส่วนกับจำนวนของอะตอมในระดับพลังงานที่ต่ำกว่า (N_1) และความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับพลังงาน ส่วนอัตราการปล่อยแสงโดยการกระตุ้นจะเป็นสัดส่วนกับจำนวนอะตอมในระดับพลังงานที่สูงกว่า (N_2) และความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับพลังงาน ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับพลังงานยังขึ้นอยู่กับฟลักซ์ของคลื่นที่มาตกกระทบและคุณลักษณะของการเปลี่ยนระดับพลังงานซึ่งเรียกว่า “Cross section” แต่การเปลี่ยนระดับพลังงานแบบ Cross Section นี้จะไม่มีทิศทางที่แน่นอน ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงจึงขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างจำนวนอะตอม N_1 และ N_2 และฟลักซ์ของคลื่นตกกระทบเท่านั้น นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสารอยู่ในอุณหภูมิคงที่การกระจายของ Boltzmann ของอะตอมบนลำดับของระดับพลังงานที่เป็นไปได้จะอยู่ที่ใกล้เคียงกับระดับ Ground state ดังนั้นอัตราการดูดกลืนแสงของทุกๆ ความถี่จะมากกว่าอัตราการปล่อยแสง ทำให้ประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงที่ความถี่ใดๆ ก็ตามเป็นบวก

ถ้าป้อนแสงที่มีความถี่ ν เข้าไปอย่างเพียงพอ จำนวนของอะตอมจะเปลี่ยนแปลงจนกระทั่ง $N_2 = N_1$ ภายใต้เงื่อนไขนี้อัตราการดูดกลืนแสงและการปล่อยแสงจะเท่ากัน และประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงที่ความถี่ ν จะเป็นศูนย์ ถ้ารูปแบบของการเปลี่ยนระดับพลังงานถูกจำกัดให้มีระดับพลังงานเพียง 2 ระดับ ก็ไม่มีทางที่จะทำให้ N_2 มากกว่า N_1 เพราะการเปลี่ยนระดับพลังงานสูงขึ้นก็จะเท่ากับระดับพลังงานอีกระดับหนึ่งซึ่งมีทิศทางตรงข้าม

ในกรณีที่มียกระดับพลังงาน 3 ระดับหรือมากกว่าและระดับพลังงานเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันดังที่จะอธิบายต่อไปนั้น พลังงานที่กระตุ้นเข้าไปจะทำให้เกิดการกลับจำนวนอะตอมซึ่งทำให้ $N_2 > N_1$



แสดงแบบจำลองของรูปแบบการเปลี่ยนระดับพลังงานของแสงเลเซอร์แบบ 4 ระดับ (ก) เปรียบเทียบกับของ Nd:YAG (ข)

ภาพที่ 10(ก) แสดงแบบจำลองของรูปแบบการเปลี่ยนระดับพลังงานของแสงเลเซอร์แบบ 4 ระดับ เมื่อนำอนุภาคโฟตอน 1 ตัวที่มีความถี่ ν มากระตุ้นอะตอมจะทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก E_1 ไปยัง E_4 ถ้าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก E_4 ไปยัง E_3 มีค่ามากกว่าจาก E_4 ไปยัง E_1 และถ้า E_4 ไม่คงที่ อะตอมจะลดระดับพลังงานลงมายัง E_3 ทันที ถ้า E_3 มีเสถียรภาพไม่แน่นอน เช่น ถ้าอะตอมซึ่งอยู่ที่ E_3 เป็นเวลานาน จำนวนอะตอมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตาม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนอะตอมที่ถูกกระตุ้นซึ่งมาจากระดับบน (E_4) ในขั้นสุดท้ายอะตอมในระดับ E_3 จะตกลงมาสู่ระดับ E_2 และปล่อยความถี่ของอนุภาคโฟตอนออกมา ถ้าระดับ E_2 ไม่คงที่อะตอมก็จะกลับลงมายัง Ground state (E_1) อย่างรวดเร็ว ทำให้จำนวนอะตอมในระดับ E_2 มีจำนวนน้อยและลดอัตราการดูดกลืนของความถี่ ν_2 ซึ่งจำนวนอะตอมใน E_3 ยังคงมีจำนวนมากในขณะที่ E_2 ยังคงมีจำนวนอะตอมต่ำกว่า ดังนั้นจะทำให้เกิดการกลับจำนวนอะตอมระหว่าง E_3 และ E_2 ภายใต้งี้อันนี้ดังกล่าวกว่าประสิทธิภาพการดูดกลืนที่ความถี่ ν_2 จะเป็นลบ แสงจะถูกขยายเมื่อผ่านสารซึ่งเรียกว่า ตัวกลางที่มีการขยาย ถ้าการกลับจำนวนอะตอมมีค่ามาก อัตราขยายก็จะมากด้วย

รูปแบบของการเปลี่ยนระดับแบบ 4 ระดับมีข้อได้เปรียบที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับระบบที่มี 3 ระดับ คือระดับ E_1 จะเป็นทั้งจุดเริ่มของการเปลี่ยนระดับพลังงานและจุดสิ้นสุดของการเปลี่ยนระดับพลังงานที่ให้แสงออกมา ในการจัดเรียงแบบ 4 ระดับ อะตอมตัวแรกซึ่งถูกกระตุ้นจะทำให้เกิดการกลับจำนวนอะตอมขณะที่ในระบบที่มี 3 ระดับ จะต้องดันอะตอมไปเป็นจำนวนมากกว่าครั้งจากระดับ E_1 จึงจะเกิดการกลับจำนวนอะตอม

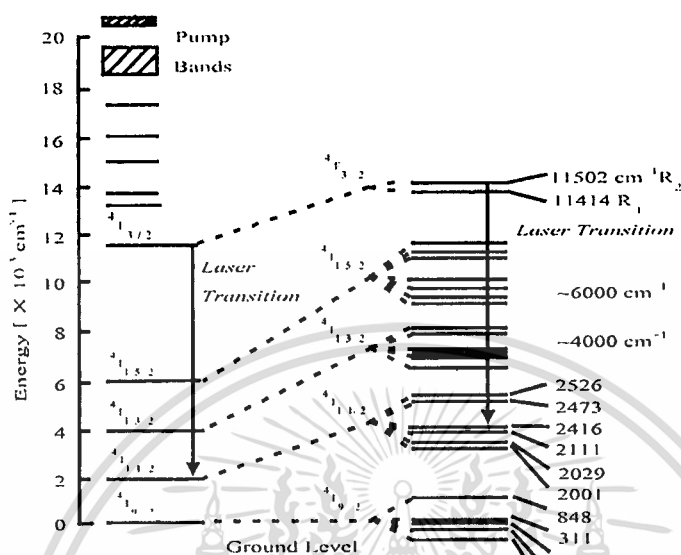
ในการออกแบบเลเซอร์สำหรับการค้ำนั้นโดยปกติจะใช้แสงหรือไฟฟ้าเป็นตัวกำเนิดพลังงานในการกระตุ้น เช่น เลเซอร์ที่เป็นของแข็งนิยมใช้ Arc lamp ในการกระตุ้น และเอาต์พุตของเลเซอร์ตัวหนึ่งสามารถใช้กระตุ้นตัวกำเนิดเลเซอร์อีกตัวได้ เช่น เลเซอร์ที่เป็นของเหลวสามารถกระตุ้นได้โดยพัลส์ของเลเซอร์ Nd:YAG การฉายประจุไฟฟ้าก็สามารถนำมากระตุ้นสารที่เป็นก๊าซ เช่น Argon หรือ Krypton

การกระตุ้นตัวกลาง Nd:YAG

คุณสมบัติของ Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet) มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง รูปแบบการเปลี่ยนระดับพลังงานของ Nd:YAG มีลักษณะดังภาพที่ 10(ข) และแผนผังระดับพลังงานแสดงดังภาพที่ 11

ตัวกลางที่มีการขยาย (Active medium) คือ สาร Neodymium ที่ถูกทำให้มีประจุไฟฟ้าเป็น 3 เท่า ซึ่งจะใช้ Flash lamp ที่มีเอาต์พุตที่เหมาะสมกับช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีแดงและใกล้อินฟราเรดในการกระตุ้น อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะตกลงมาอย่างรวดเร็วที่ระดับ $F_{3/2}$ ซึ่งเป็นระดับที่สูงกว่าระดับที่มีการเปลี่ยนพลังงานที่ทำให้เกิดแสงและจะอยู่ที่ระดับนี้เป็นเวลา 230 μsec

ภาพที่ 11



แสดงแผนผังระดับพลังงานของแหล่งจ่ายเลเซอร์ Nd:YAG

การเปลี่ยนระดับพลังงานที่ให้แสงออกมาซึ่งเป็นไปได้ส่วนใหญ่ คือระดับที่ $I_{11/2}$ โดยจะปล่อยอนุภาคโฟตอนที่ 1064nm เนื่องจากอิเล็กตรอนรอนในระดับนี้จะกลับลงไปยัง Ground state อย่างรวดเร็ว ทำให้อิเล็กตรอนจะมีจำนวนน้อย ดังนั้นจึงเป็นการง่ายที่จะสร้างการกลับจำนวนอะตอมที่อุณหภูมิห้อง Emission cross section ของการเปลี่ยนระดับพลังงานนี้จะสูงในขณะที่ระดับเปรียบเทียบในการปล่อยแสงของมันจะต่ำ ขณะเดียวกันก็จะมีการเปลี่ยนระดับจากระดับด้านบนเดียวกัน แต่มีความยาวคลื่น 1319, 1338 และ 946nm ซึ่งมีอัตราขยายต่ำกว่าและระดับเปรียบเทียบสูงกว่าช่วงความยาวคลื่น 1064nm ฉะนั้นในการทำงานปกติจะใช้ความยาวคลื่นที่ 1064nm

เลเซอร์ที่สร้างจาก Active medium และ เรโซเนเตอร์ (Resonator) จะปล่อยพัลส์ของแสงเลเซอร์ 1 พัลส์เมื่อกระตุ้นด้วย Flash lamp 1 ครั้ง อย่างไรก็ตามช่วงความกว้างของพัลส์จะยาวประมาณเท่ากับ Flash lamp โดยกำลังสูงสุดจะต่ำ ดังนั้นเราจะใช้ Q-switch เพื่อตัดพัลส์ให้สั้นลงและเพิ่มค่ากำลังสูงสุดขึ้น

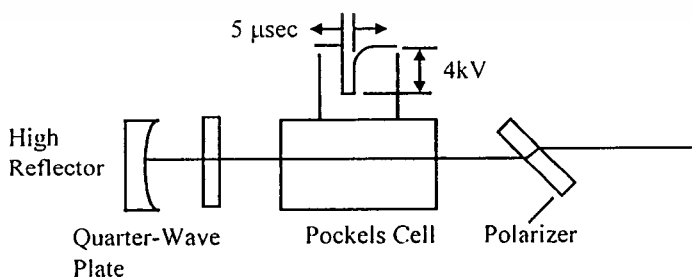
Q-switching

เพราะว่าที่ระดับสูงกว่าของการเปลี่ยนระดับพลังงานมีระยะเวลาอยู่ยาวนาน ดังนั้นเราสามารถสร้างไอออนของ Neodymium ที่ถูกกระตุ้นในแท่ง YAG ได้เป็นจำนวนพอๆ กับการเก็บพลังงานไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ถ้าการออสซิลเลตถูกป้องกันไว้ขณะที่เกิดการกลับจำนวนอะตอมและพลังงานที่ถูกเก็บไว้สามารถปล่อยออกมาได้อย่างรวดเร็ว แสงเลเซอร์ที่ได้จะเป็นพัลส์สั้นและมีความเข้มสูง

Electro-optic Q-switch นำไปสู่การสูญเสียควิตี้สูง เพื่อป้องกันการออสซิลเลตดังภาพที่ 12 แสดงส่วนประกอบของ Q-switch ได้แก่ Polarizer, Quarter-wave plate และ Pockels cell โดยการป้อนแรงดันสูงให้แก่ Pockels cell crystal จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการทำโพลาไรเซชันของ Pockels cell ให้ช้าลงซึ่งจะเป็นตัวกำหนดว่า Q-switch เปิด (การสูญเสียต่ำ) หรือปิด (การสูญเสียสูง)

เมื่อไม่ป้อนแรงดัน Pockels cell จะไม่ส่งผลต่อโพลาไรเซชันของแสงที่ผ่านตัวมัน ซึ่งการทำงานของ Q-switch จะเป็นดังนี้ Polarizer จะเปลี่ยนโพลาไรเซชันของแสงที่เข้า Q-switch เป็นแบบแนวตั้งและ Quarter-wave plate จะเปลี่ยนโพลาไรเซชันเป็นแบบวงกลม จากนั้นคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบวงกลมจะถูกสะท้อนกลับโดย High reflector ผ่าน Quarter-wave plate ทำให้คลื่นมีโพลาไรเซชันเป็นแบบแนวนอน เนื่องจาก Polarizer จะยอมให้แสงที่มีโพลาไรเซชันแบบแนวตั้งผ่านเท่านั้น ดังนั้นมันจะสะท้อนแสงที่ไม่มีโพลาไรเซชันดังกล่าว ซึ่งทำให้การสูญเสียควิตี้สูง เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้า Pockels Cell จะไม่มีการทำให้โพลาไรเซชันของ Quarter-Wave Plate ช้าลงดังนั้นแสงจะยังคงมีโพลาไรเซชันเป็นแบบแนวตั้งและมีการสูญเสียน้อยที่สุด

ภาพที่ 12



แสดงส่วนประกอบของ Q-switch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่าง Q-switch ทำงาน Flash lamp จะกระตุ้นไอออน Nd เป็นเวลาประมาณ $200\mu\text{sec}$ เพื่อสร้างการกลับจำนวนอะตอมจำนวนมาก ที่จุดซึ่งมีการกลับจำนวนอะตอมสูงสุด พัลส์แรงดันสูงสุดจะป้อนเข้าสู่ Pockels cell อย่างเร็วเพื่อเปลี่ยน Q-switch จากที่มีการสูญเสียสูงเป็นการสูญเสียต่ำ ซึ่งพัลส์ที่ทำให้เกิดผลดังกล่าวจะต้องมีความกว้างน้อยกว่า 10nsec และมีพลังงานแสงสูงสุดหลายสิบเมกะวัตต์ พัลส์ซึ่งแคบและมีกำลังสูงนี้เป็นสิ่งสำคัญซึ่งเป็นประโยชน์ต่อเลเซอร์ Nd:YAG แบบพัลส์ คือกำลังงานที่สูงสุดจะทำให้สามารถใช้ขบวนการแบบไม่เชิงเส้นได้หลายแบบในการเปลี่ยนความยาวคลื่น เช่น การคูณความถี่ การผสมความถี่ การดับเลเซอร์หรือการแปลงความถี่แบบ Raman ส่วนความแคบของพัลส์นั้นจะเป็นการแก้ปัญหาเกี่ยวกับเวลาของปรากฏการณ์ที่รวดเร็วได้อย่างดี เหมือนกับปฏิกิริยาทางเคมีที่รวดเร็วหรือการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง

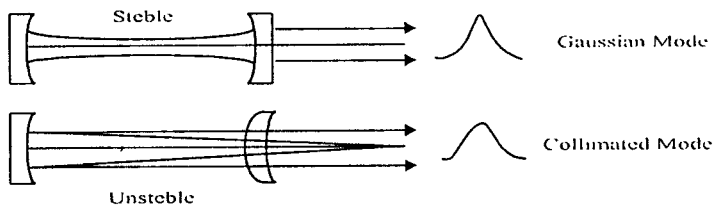
การทำงานอีกโหมดหนึ่งคือแบบ Long pulse นั้นจะถูกสร้างใน GCR-11 แรงดันจะถูกป้อนให้ Pockels cell เช่นเดียวกับ Flash lamp และ Q-switch จะยังคงเปิดสำหรับการป้อนแสงเข้า ผลที่ได้จะเป็นขบวนพัลส์ที่มีความยาวประมาณ $200\mu\text{sec}$ โดยแต่ละพัลส์แยกห่างกันประมาณ $2-4\mu\text{sec}$ พลังงานทั้งหมดของขบวนพัลส์จะมีค่าเหมือนกับพัลส์ Q-switch 1 พัลส์ โหมด Long pulse นี้จะทำให้มีความปลอดภัยในการปรับแต่ง นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ในการทดลองพลังงานของพัลส์ทั้งหมดด้วย

The resonant optical cavity

Resonant cavity ประกอบด้วยกระจก 2 อันสำหรับการป้อนสัญญาณกลับไปยัง Active medium อนุภาคโฟตอนที่ถูกปล่อยขนานกับแกนแสงของควาติจะถูกสะท้อนแสงกลับ และเกิดปฏิกิริยากับไอออนที่ถูกกระตุ้นเข้ามา การปล่อยแสงโดยการกระตุ้นจะทำให้เกิดอนุภาคโฟตอน 2 ตัวที่มีพลังงานเท่ากันแต่เฟสและทิศทางการเคลื่อนที่ต่างกัน จาก 2 ตัวเมื่อทำปฏิกิริยาก็จะกลายเป็น 4 ตัว จาก 4 ตัว เป็น 8 ตัว และเพิ่มจำนวนขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดความสมดุลระหว่างการกระตุ้นและการปล่อยแสง

กระจก 2 อันจะถูกเลือกให้สามารถสะท้อนความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวหรือหลายค่าได้ กระจกอันหนึ่งจะเป็นตัวรวมสัญญาณเอาต์พุต โดยส่งพลังงานจำนวนเล็กน้อยที่ถูกเก็บไว้ในควาติออกไปซึ่งการแพร่กระจายที่หลุดรอดมาได้ก็เป็นลำแสงเอาต์พุตของเลเซอร์

ภาพที่ 13



แสดงรีโซเนเตอร์แบบคงที่และแบบไม่คงที่

Optical resonator มีอยู่ 2 ชนิดหลักๆ ได้แก่ แบบคงที่และแบบไม่คงที่ดังแสดงในภาพที่ 13 ซึ่งมีความแตกต่างกันในเรื่องของผลที่เกิดขึ้นต่อลำแสงที่เดินทางใกล้และขนานกับแกนแสง ในรีโซเนเตอร์แบบคงที่ รังสีจะถูกสะท้อนตรงไปยังแกนแสงโดยกระจกควิตี้ของมันเอง ดังนั้นรังสีก็ยังเดินทางไปตามแกนเดิมของเลเซอร์ ส่วนรังสีที่เดินทางในรีโซเนเตอร์แบบไม่คงที่นั้นจะถูกสะท้อนให้ห่างจากแกนโดยกระจกอีกอันหนึ่งของ Cavity resonator แบบคงที่สามารถที่จะดึงพลังงานได้จากแสงที่เดินทางใกล้แกนแสงของรีโซเนเตอร์เท่านั้น ซึ่งเป็นตัวจำกัดพลังงานของเอาต์พุตในทางกลับกันรีโซเนเตอร์แบบไม่คงที่สามารถที่จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงขนาดใหญ่ ดังนั้นมันจะมีประสิทธิภาพในการดึงพลังงานจาก Active medium ซึ่งมีพื้นที่ Cross section ขนาดใหญ่เหมือนกับแท่งเลเซอร์แบบ Nd:YAG

ตัวรวมสัญญาณเอาต์พุตในรีโซเนเตอร์แบบไม่คงที่จะมีอยู่ 3 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 คือ High reflector ขนาดเล็กติดอยู่กับฐานที่ใสและวางอยู่บนแกนแสงของรีโซเนเตอร์พลังงานจะเล็ดลอดออกจากรีโซเนเตอร์โดยการแตกกระจายรอบๆ จุดนี้ ซึ่งเรียกว่า “Diffraction coupled resonator (DCR)” รูปแบบที่ 2 จะใช้การเคลือบสารที่มีการสะท้อนกลับบางส่วน ซึ่งจะปกคลุมสารทั้งหมดอย่างเป็นระเบียบ รูปแบบที่ 3 จะปรับเปลี่ยนจากแบบแรกโดย High reflector ขนาดเล็กจะแทนด้วย Partial reflector ซึ่งมีการสะท้อนเปลี่ยนแปลงเป็นรัศมี Reflector นี้สามารถสร้าง Spatial profile แบบ Gaussian หรือใกล้เคียงที่เอาต์พุตของเลเซอร์ซึ่งเรียกว่า “Gaussian coupled resonator (GCR)”

ถ้าพลังงานของลำแสงเอาต์พุตเป็นการกระจายที่มีระเบียบ แท่ง Nd:YAG จะต้องให้แสงสว่างที่มีระเบียบ และวาง Flash lamp ที่จุดโฟกัสจุดหนึ่งของ Elliptical chamber ซึ่งจะทำให้แสงทั้งหมดที่มันสร้างขึ้นจะถูกสะท้อนผ่านแท่งซึ่งวางอยู่ที่จุดโฟกัสอื่น

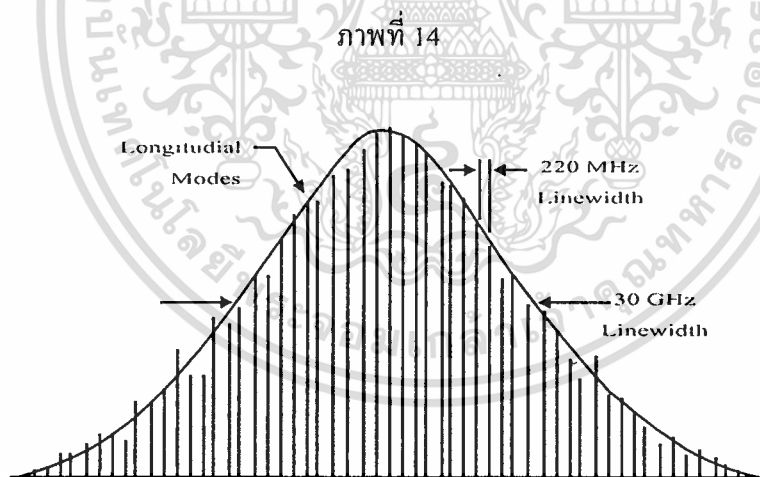
ความเย็นอย่างเป็นระเบียบเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของพัลส์เลเซอร์ Nd:YAG เมื่อได้รับความร้อนแท่ง Nd:YAG จะกลายเป็นเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสขึ้นอยู่กับพลังงานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลี่ยที่ดูคลื่น เพื่อประสิทธิภาพสูงสุด High reflector จะต้องเข้าคู่กับความยาวโพกัสของแท่ง Nd:YAG ซึ่งต้องรักษาให้คงที่ระหว่างที่ทำงานด้วยการเปลี่ยนอุณหภูมิของแท่ง Nd:YAG จะทำให้เกิดการหมุนโพลาไรเซชันแปรเปลี่ยนเป็นรัศมี ซึ่งจะต้องควบคุมอย่างระมัดระวังเพื่อคุณภาพของลำแสงที่ดี

โหมดตามความยาวและความกว้างเส้น

เลเซอร์ที่ออสซิลเลตที่ความถี่ในช่วงแคบของความถี่การเปลี่ยนระดับพลังงาน ความกว้างของการกระจายความถี่ที่เรียกว่า Linewidth และขนาดของมันจะขึ้นอยู่กับ Active medium อุณหภูมิห้องและขนาดของการกลับจำนวนอะตอม Linewidth จะถูกกำหนดโดยการเขียนเส้นทางอัตราการขยายสุทธิของแต่ละความถี่ และการวัดความกว้างของส่วนโค้งซึ่งอัตราขยายตกลงครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด (ความกว้างทั้งหมดที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดแสดงดังภาพที่ 14)



แสดงการกระจายความถี่ของ Longitudinal modes สำหรับเส้นเดี่ยว

เอาต์พุตของเลเซอร์จะไม่ต่อเนื่องในระยะเส้นกว้างที่เหมือนกัน คลื่นนี้จะแพร่กระจายภายใน Optical cavity และความถี่ซึ่งทำให้เกิดการ Resonance คือ

$$\nu_m = \frac{mc}{2L} \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ν_m คือความถี่

c คือค่าความเร็วแสง

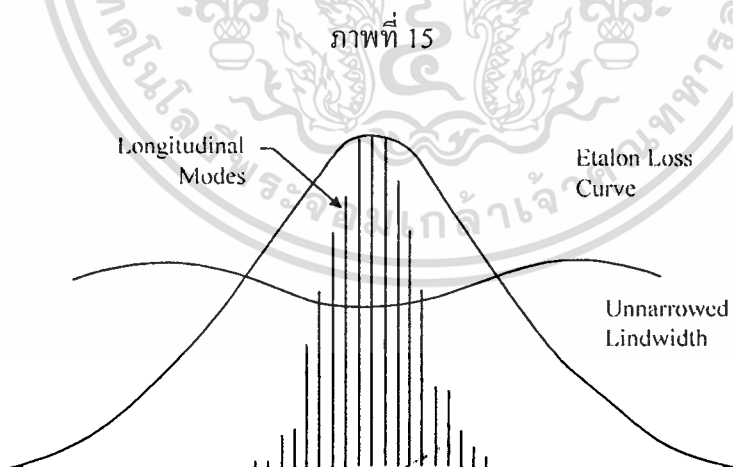
L คือความยาวของ Optical Cavity

m คือเลขจำนวนเต็ม

ดังนั้นเอาต์พุตของเส้นที่ให้จะเป็นกลุ่มของความถี่ที่ไม่ต่อเนื่องเรียกว่า Longitudinal modes ซึ่งมีระยะห่างเป็น

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (4)$$

Etalon ซึ่งเป็นส่วนประกอบของความถี่ที่เลือกจะถูกแทรกเข้าไปในคาวิตี้ เพื่อเป็นการลด Linewidth spectra-physics ใช้เป็น Optical fabry-perot interferometer ซึ่งเป็นเสมือนตัวกรองแบบผ่านแถบความถี่ การทำให้การสูญเสียเพียงพอนในโหมดอื่นๆ จะป้องกันโหมดเหล่านั้นจากการดึงระดับเปรียบเทียบในการปล่อยแสงดังแสดงในภาพที่ 15 ความยาวโคฮีเร้นท์ คือระยะทางในช่วงที่ลำแสงเอาต์พุตมีความสัมพันธ์ของเฟสคงที่ จะเป็นสัดส่วนกลับกับ Linewidth คือ



แสดง Etalon Loss ต่ำสุดเพื่ออัตราขยายเลเซอร์สูงสุด

$$L_c = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (5)$$

การลด Linewidth จะเพิ่มความยาวโคฮีเร้นท์ถ้า Linewidth ลดลงจาก 30GHz จนเหลือประมาณ 6GHz ความยาวโคฮีเร้นท์จะเพิ่มจาก 10nm เป็น 50nm

Electronic line narrowing

เพราะอัตราการขยายที่สูงของ Nd:YAG จึงเป็นไปได้ที่จะทำงานในโหมด Single Longitudinal โดยใช้เพียง 1 Etalon line narrowing ต่อไปสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์การทำงานของ Q-switch เท่านั้น Quarter-wave plate ใน Q-switch จะถูกหมุนเพื่อให้การออสซิลเลตก่อนการปล่อยแสงเลเซอร์มีเวลานาน (Long pre-lase OSC.) เกิดขึ้นในขณะที่ Q-switch ปิดสถานะดังกล่าวจะสนับสนุนให้มีการสูญเสียต่ำสุดของโหมด เพราะมีอัตราการขยายสุทธิสูงสุด และ Etalon กำจัดโหมดอื่นออกไป Q-switch จะเปิดที่จุดสูงสุดของการกลับจำนวนอะตอมและ Linewidth ที่ได้จะมีค่าประมาณ 100MHz ซึ่งมีความยาวโคฮีเร้นท์ 3 เมตร นอกจากนี้พัลส์แบบ Single-mode จะเป็นอิสระจากการมอดูเลตโดยโหมดที่อยู่ใกล้ ดังนั้น Profile ทางเวลาของพัลส์จะใกล้เคียงกับ Profile แบบ Gaussian และการสั่นขึ้นลงของขนาดสูงสุดจะน้อยกว่า 1%

การผลิตความยาวคลื่นอื่น

กำลังสูงสุดที่จุดยอดของพัลส์ Q-switch จะให้การเปลี่ยนความถี่ในคริสตัลแบบไม่เชิงเส้นเหมือนกับ Potassium di-deuterium phosphate (KD*P) ในกรณีที่ย่ำที่สุด ความยาวคลื่นหลักของ Nd:YAG คือ 1064nm. จะทำปฏิกิริยากับคริสตัลเพื่อสร้างคลื่นอันดับที่ 2 ซึ่งมีความยาวคลื่นเป็น 1/2 ของ ความยาวคลื่นหลัก

สำหรับประสิทธิภาพที่สูงสุด คลื่นเหล่านั้นจะต้องรักษาความเร็วและความสัมพันธ์ของเฟสให้เหมือนเดิมตลอดทั้งคริสตัลดัชนีการหักเหของแสงของกับส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น เมื่อลดดัชนีการหักเหของความยาวคลื่นจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในสารบางอย่างเช่น Birefringent ดัชนีการหักเหของสารเหล่านี้ขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชันของคลื่นที่แพร่กระจาย ในสารเหล่านี้ถ้าดัชนีหักเหปกติของความยาวคลื่นหนึ่งเข้ากับดัชนีการหักเหพิเศษของความยาวคลื่นอื่น คลื่นจะแพร่กระจายโดยมีเฟสเดียวกันที่ความเร็วเท่ากัน การแปลงความถี่จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดภายใต้เงื่อนไข การแมตช์เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phase matching จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคริสตอลและมุมระหว่างทิศทางของโพลาไรเซชันและแกนของคริสตอลเป็นสำคัญ

ด้วยสาร KD*P ตัวเลือก Phase Matching 2 ตัวจะยังคงอยู่ใน Phase matching ชนิด I อินพุตจะไปตามแกนปกติ และเอาต์พุตจะเป็นโพลาไรซ์ตามแกนพิเศษ ซึ่งจะปล่อยความยาวคลื่นอินพุตที่เหลืออยู่เป็นแบบโพลาไรซ์เชิงเส้น ชนิดที่ 2 โพลาไรเซชันของอินพุตจะอยู่ที่มุมระหว่างแกนพิเศษและแกนปกติ ขณะที่เอาต์พุตยังคงมีโพลาไรซ์ตามแกนพิเศษ ส่วนความยาวคลื่นอินพุตที่เหลืออยู่จะมีโพลาไรซ์แบบรูปไข่ ถึงแม้ว่า Phase matching ทั้ง 2 ชนิด จะสามารถใช้ในการสร้างสาร์โมนิกที่ 2 ของ Nd:YAG ใน KD*P แต่ชนิด II นิยมใช้มากกว่าเพราะมีประสิทธิภาพในการแปลงที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามในการทดลองบางอย่างต้องการโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นของแสงที่มี $\lambda = 1064\text{nm}$ เพื่อประสิทธิภาพที่สูงสุดซึ่งชนิดที่ I จะให้ผลที่ดีกว่าประสิทธิภาพของระบบทั้งหมด

คลื่นที่ได้ซึ่งมีความยาวคลื่น 532nm สามารถเพิ่มความถี่เป็น 2 เท่าได้โดยการส่งคลื่นดังกล่าวผ่านคริสตอลตัวที่ 2 ซึ่งจะได้คลื่นที่มีความยาวคลื่น 266nm มันยังสามารถถูกผสมใน KD*P โดยความยาวคลื่นหลัก 1064nm ที่เหลืออยู่ทำให้เกิดคลื่นที่มี $\lambda = 355\text{nm}$ ความยาวคลื่นทั้ง 4 (1064, 532, 355 และ 266nm) จะครอบคลุมสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าจากช่วงใกล้แสงอินฟราเรด ถึง อัลตราไวโอเลต ซึ่งช่วยเพิ่มประโยชน์ของเลเซอร์ Nd:YAG ความยาวคลื่น 532nm และ 355nm จะดันสารเลเซอร์ด้วยประสิทธิภาพในการแปลงที่สูง ความยาวคลื่น 355 และ 266nm เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับการแยกตัวและการทำลายแสงของโมเลกุลหลายชนิด ความยาวคลื่น 1064 และ 266nm นิยมใช้อย่างกว้างขวางในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแสงกับสารและการตรวจสอบสารกึ่งตัวนำ

ความถี่ที่คงที่เหล่านี้สามารถขยายต่อไปยัง Raman shifting หรือโดยการใช้ดันสารเลเซอร์ ผลของการใช้ดันสารเลเซอร์นั้นจะทำให้เอาต์พุตปรับแต่งได้อย่างต่อเนื่องในช่วงความยาวคลื่นที่กว้าง

ข้อควรพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างของรีโซเนเตอร์

ความคงที่ของความถี่ที่ออสซิลเลตขึ้นอยู่กับการออกแบบโครงสร้างของรีโซเนเตอร์ความยาวของควาวิตีที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย การเปลี่ยนอุณหภูมิ และการเลือนทางกลไก จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนกันในความถี่รีโซแนนซ์ การเปลี่ยนความยาวของควาวิตีจะมีผลต่ออุณหภูมิตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

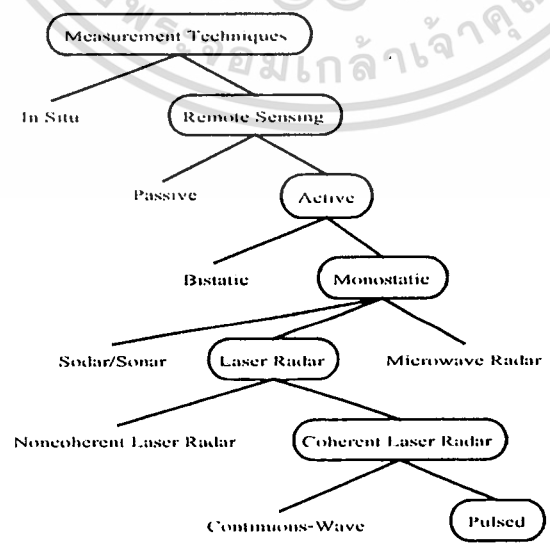
สัญญาณ Q-switch advanced sync จะได้มาจากสัญญาณหน่วย Q-switch (D) สัญญาณ (D) จะกระตุ้นทั้ง Fixed delay (G) ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วและ Variable delay (E) เพื่อตั้งช่วงห่างระหว่างพัลส์ทั้ง 2 พัลส์จาก Variable delay จะสามารถปรับได้ ดังนั้นมันอาจจะสิ้นสุดก่อนหรือหลังการสิ้นสุดของ Fixed delay pulse Variable delay pulse จะกระตุ้นตัวสร้าง Advanced sync pulse และได้สัญญาณ (F) ซึ่งอาจจะนำหน้าหรือตามหลักการเปิดของ Q-switch (I) ซึ่งจะสร้าง Pre- หรือ Post-trigger pulse ที่มีช่วง 1 500ns.

ในโหมด Long pulse pockels cell จะถูกกระตุ้นที่เวลาซึ่งขณะหนึ่งของ Lamp ที่กระตุ้นมันจะถูกเก็บประจุแบบภายใน เพื่อให้พัลส์ยาวและมีแรงดันสูงซึ่งทำให้เกิด Long optical pulse ในโหมดนี้เอาต์พุตของ Q-switch sync จะถูกขัดขวางไว้

ระบบเซ็นเซอร์

เทคนิควิธีการวัดปริมาณมวลสารต่างๆ นั้นมีอยู่มากมายหลายวิธีด้วยกัน ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศนั้นจะใช้วิธีการของ Remote sensing techniques ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 17

ภาพที่ 17



จากภาพที่ 17 แสดงเทคนิควิธีการวัดในระบบเซ็นเซอร์ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ใหญ่ๆ คือ

- In Situ จะเป็นวิธีการวัด ณ ตำแหน่งหรือสถานที่เดียวกันกับสิ่งที่ต้องการจะทำการวัดอยู่
- Remote sensing จะเป็นวิธีการวัด ณ ตำแหน่งหรือสถานที่ซึ่งไกลจากสิ่งที่ต้องการจะทำการวัด ซึ่งมีข้อดีกว่าแบบ In situ คือ ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดภายในบริเวณที่มีสิ่งที่ต้องการจะทำการวัดอยู่ เหมาะกับการวัดในระยะไกลๆ ยากที่จะเข้าถึงบริเวณนั้น และบริเวณที่เสี่ยงต่ออันตราย เป็นต้น

สำหรับวิธีการของ Remote sensing ยังแบ่งออกตามลักษณะการทำงานได้ 2 ชนิด คือ

- แบบ Passive จะเป็นการรับคลื่นจากแหล่งต่างๆ ที่ต้องการจะตรวจจับ เช่น การถ่ายภาพ โดยอาศัยแสงตกกระทบวัตถุและสะท้อนเข้ามาในระบบ เช่นการถ่ายภาพ การถ่ายภาพวิดีโอ เป็นต้น
- แบบ Active จะทำการส่งคลื่นความถี่ที่ใช้งานออกไปและทำการรับสัญญาณซึ่งเกิดจากการสะท้อนกลับมาจากวัตถุ หรือรับสัญญาณซึ่งผ่านตัวกลางใดๆ แล้วเกิดการลดทอนของสัญญาณลงก็ได้

ในระบบ Active ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

- Bistatic หมายถึงตัวส่งคลื่นและตัวรับคลื่นไม่ได้อยู่ในสถานที่เดียวกัน เช่นกรณีของการรับสัญญาณซึ่งผ่านตัวกลางใดๆ จะต้องวางตัวส่งคลื่นและตัวรับคลื่นไว้ในตำแหน่งต่างกัน
- Monostatic หมายถึงตัวส่งคลื่นและตัวรับคลื่นอยู่ในสถานที่เดียวกัน เช่นกรณีของการรับสัญญาณซึ่งเกิดจากการสะท้อนกลับมาจากวัตถุ เป็นต้น

ในวิธีการของ Monostatic นั้นยังสามารถแบ่งออกตามลักษณะของคลื่นที่ใช้งานได้ 3 ชนิด คือ

- Sodar หรือ Sonar ซึ่งอาศัยการทำงานของคลื่นเสียง
- Laser radar หรือ LIDAR ซึ่งอาศัยการทำงานของคลื่นแสงย่านแสงเลเซอร์
- Microwave radar ซึ่งอาศัยการทำงานของคลื่นไมโครเวฟ

ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศจะใช้วิธีการของ Laser radar หรือ LIDAR ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

- Noncoherent laser radar จะเป็นการตรวจจับสัญญาณแสงซึ่งเป็นสัญญาณที่แตกกระจายกลับแบบมีการเปลี่ยนเฟสของสัญญาณข้อมูล
- Coherent laser radar จะเป็นการตรวจจับสัญญาณแสงซึ่งเป็นสัญญาณที่แตกกระจายกลับแบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณข้อมูล

สำหรับ Coherent laser radar ยังแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช.จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Continuous wave จะทำการส่งสัญญาณแสงเลเซอร์ออกไปอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา
- Pulsed จะทำการส่งสัญญาณแสงเลเซอร์ออกไปเป็นพัลส์

ระบบเรดาร์

เรดาร์ (RADAR) ย่อมาจากคำว่า Radio Detection and Ranging ใช้หลักการส่งคลื่นไปกระทบเป้าหมายแล้ววัดผลสะท้อนของคลื่นที่ส่งไปนั้นว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร หลักการก็เหมือนกับค้างคาวที่หาทิศทางในเวลากลางคืน โดยที่ค้างคาวจะส่งคลื่นที่มีขนาด 40 kHz ออกไปเป็นระยะแล้วคอยฟังสัญญาณสะท้อนกลับมา ซึ่งเรียกว่าระบบ SONAR (Sound Navigation and Ranging) และได้มีการนำไปใช้ในการนำร่องเรือ ดำน้ำ และอื่นๆ เมื่อค้นพบคลื่นวิทยุซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีความเร็วเท่ากับแสง (3×10^8 เมตร/วินาที) จะเห็นว่าการตรวจจับและเตือนภัยจะเร็วกว่าระบบ SONAR กล่าวคือ การหาระยะทางของเป้าเป็นดังนี้ [11]

$$R = \frac{CT_R}{2} \quad (7)$$

เมื่อ R คือ ระยะทางของเป้า

C คือ ความเร็วแสง

T_R คือ ระยะเวลาในการส่งคลื่นวิทยุไปกระทบเป้าและสะท้อนกลับมา

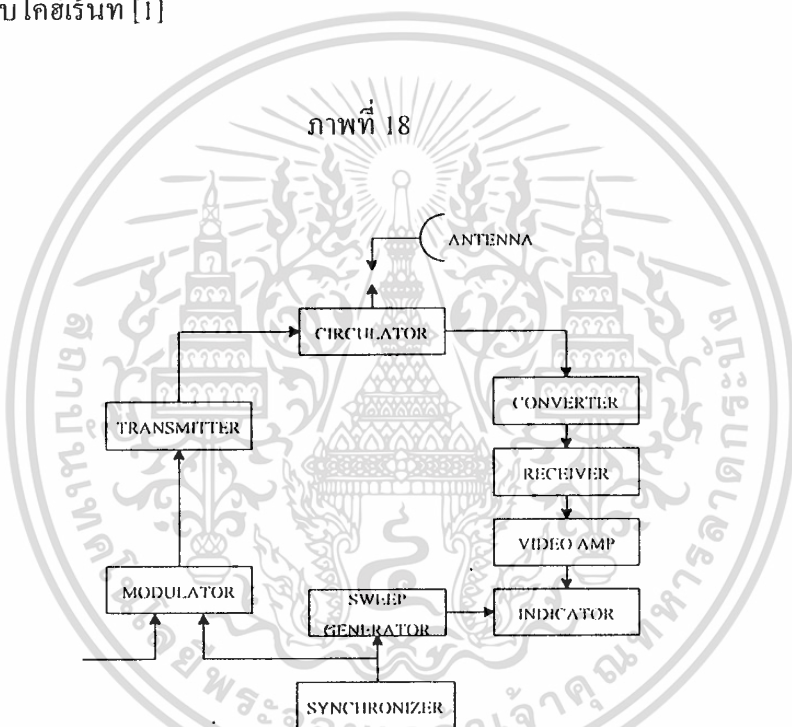
ด้วยพื้นฐานดังกล่าว การพัฒนาเรดาร์มาใช้งานจึงแตกต่างจากการสื่อสารทั่วไป โดยที่เรดาร์ต้องการที่จะวัดสัญญาณสะท้อนและฮาร์โมนิค ซึ่งการสื่อสารทั่วไปไม่ยอมให้สิ่งเหล่านี้เกิดขึ้น เรดาร์มีรูปแบบพื้นฐานอยู่ 4 รูปแบบคือ

1. CW radar เรดาร์แบบนี้จะส่งคลื่นวิทยุแบบต่อเนื่องขึ้นไป เมื่อเป้าหมายผ่านหรือกระทบเป้าหมายก็จะสะท้อนกลับโดยมีความถี่เปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อยเพราะการเคลื่อนที่ของเป้าหมาย ซึ่งเป็นแนวความคิดที่จำเป็นสำหรับการตรวจจับวัตถุเคลื่อนที่ การวัดจะมีภาพกว้างอยู่บนจอภาพเมื่อมีวัตถุผ่าน ในระยะทางที่เหมาะสม สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังภาครับจะเปลี่ยนทั้งเฟสและความเข้มซึ่งกระตุ้นให้เกิดภาพบนจอ

2. Pulse radar ความต้องการขั้นพื้นฐานของเรดาร์คือการตรวจจับเป้าหมาย เพื่อหาระยะทางและทิศทาง โดยที่ระบบพัลส์มีข้อดีที่สามารถใช้งานสายอากาศทางด้านส่งสัญญาณเดียวกันได้ เนื่องจากส่งสัญญาณเป็นช่วงๆ แล้วรอวัดผลการสะท้อนของคลื่นวิทยุที่ส่งไป นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Doppler radar การที่จะตรวจจับว่าวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าไรจะทำได้ไม่ละเอียดนัก การวัดความเร็วของเป้าหมายสามารถหาได้โดยเรดาร์แบบนี้ ซึ่งเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเป้าหมาย โดยใช้วิธีการที่เรียกว่า Clutter ซึ่งจะกำจัดคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากเป้าหมายนี้ ออก ผลที่ได้จากเรดาร์แบบนี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าเป้าหมายที่เคลื่อนที่เป็นชนิดใด

4. Pulse doppler radar เรดาร์แบบนี้มีความคล้ายคลึงกับการหาเป้าหมายของค้างคาวมากที่สุด โดยใช้พัลส์และคลื่นวิทยุมอดูเลตเข้าด้วยกันจะมี Doppler effect ในแต่ละพัลส์ที่สะท้อนกลับ จะหาความเร็วของเป้าหมายที่ตรวจจับได้โดยวิธีง่ายๆ โดยการวัด Doppler shift ของความถี่ระบบ บางที่เรียกว่าระบบ โคฮีเร้นท์ [1]



แสดงรูปแบบพื้นฐานของระบบเรดาร์

บทที่ 4

ระบบ LIDAR

กล่าวนำ

LIDAR ย่อมาจากคำว่า Light Detection and Ranging ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งของ Remote sensing techniques ซึ่งใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดคลื่น คล้ายกันกับ SONAR ซึ่งใช้สัญญาณเสียงและ RADAR ซึ่งใช้คลื่นวิทยุ ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานของระบบ LIDAR ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเอา LIDAR มาประยุกต์ใช้งานในการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ

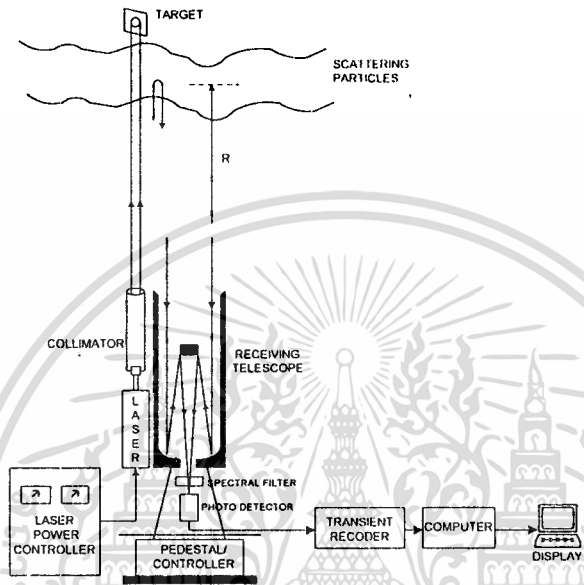
หลักการเบื้องต้นของระบบ LIDAR

LIDAR หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่า Laser radar นั้นจะมีการทำงานโดยอาศัยหลักการพื้นฐานของเรดาร์ ซึ่งใช้ในการวัดย่านการกระจายของชั้นบรรยากาศที่แน่นอนจากสถานที่เดียวเรียกว่า Single-ended system หลักการเบื้องต้นของระบบ LIDAR สามารถเขียนเป็นโครงสร้างพื้นฐานของ LIDAR ได้ดังภาพที่ 19

จากภาพที่ 19 [7] แสดงโครงสร้างพื้นฐานของ LIDAR สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้ Laser power controller จะเป็นตัวควบคุมกำลังงานของพัลส์เลเซอร์ ซึ่งผลิตจากเครื่องกำเนิดเลเซอร์ และถูกส่งไปยังภาค Collimator เพื่อทำให้ลำแสงเลเซอร์เป็นแนวเดียวกัน แล้วส่งไปยังบรรยากาศ ซึ่งพลังงานของเลเซอร์จะผ่านทะลุสู่บรรยากาศและกระทำปฏิกิริยากับตัวแตกกระจายเช่น ฝุ่นละออง, อนุภาค Aerosol ทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว, โมเลกุลก๊าซ, ไอน้ำ, ก้อนเมฆ ส่วนเล็กๆของพลังงานนี้จะแตกกระจายกลับมาและถูกรวบรวมโดย Receiving telescope ส่งต่อไปยัง Spectral filter และสัญญาณจะถูกตรวจจับโดย Photo-detector สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากภาค Photo-detector จะถูกบันทึกโดย Transient memory recorder หลังจากนั้นจะถ่ายทอดไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการประมวลผลสัญญาณที่รับเข้ามาและแสดงผลทางจอภาพ ย่านของค่าการแตกกระจายสามารถหาได้จากสัญญาณที่เก็บบันทึกไว้ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาและคุณสมบัติของการแตกกระจายกลับ เช่น ความเข้มของอนุภาค สามารถหาได้จากขนาดของสัญญาณที่รับได้

ภาพที่ 19



แสดงโครงสร้างพื้นฐานของ LIDAR

โดยทั่วไปการแพร่กระจายคลื่นแสงมีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ เช่น กำลังของสนามไฟฟ้า ความเข้ม ความถี่หรือความยาวคลื่น เฟส โพลาไรเซชัน และทิศทางการแพร่กระจาย การเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์และเคมีเป็นข้อมูลที่ได้รับมาจากการวัดจำนวนของการแพร่กระจายกลับของแสงและทำการประมวลผลการเปลี่ยนแปลงทางแสงโดย Laser remote sensing techniques รูปร่างขนาดของก้อนเมฆและภูมิประเทศจะมีผลต่อการลดทอนของแสงโดยตรง ส่วนฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศนั้นมีผลต่อการลดทอนของแสงโดยอ้อม

ในระบบ LIDAR สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้ดังนี้

1. Elastic LIDAR เป็นการรับสัญญาณที่เกิดจากการชนกันระหว่างคลื่นที่ส่งออกไปกับอนุภาคที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ โดยการชนกันจะเป็นการชนแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ แบบ Elastic คือไม่มีการสูญเสียพลังงาน ดังนั้น สัญญาณที่รับได้ก็จะเป็นสัญญาณที่มีความถี่เดียวกันกับความถี่ที่ส่งออกไป

2. Nonclastic LIDAR เป็นการรับสัญญาณที่เกิดจากการชนกันระหว่างคลื่นที่ส่งออกไปกับอนุภาคที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ โดยการชนกันจะเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น แบบ Nonclastic ซึ่งพิจารณาจากความถี่ และอนุภาคที่ชนจะมีการถ่ายเทพลังงานโดยอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซมีการดูดกลืนพลังงานบางส่วนและสะท้อนกลับพลังงานที่เหลือออกมาที่ความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไป หรืออาจจะดูดกลืนพลังงานและคายพลังงานที่ความยาวคลื่นนั้นออกมา เนื่องจากคุณสมบัติของอะตอมหรือโมเลกุลเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้น ก็จะมีการเปลี่ยนระดับพลังงานและคายพลังงานตามคุณสมบัติของอะตอมนั้นๆ

ขบวนการของการเกิดปฏิกิริยาทางแสงที่ใช้สำหรับ Laser remote sensing พอสรุปได้ดังตารางที่ 4 [7]

ตารางที่ 4

แสดงชนิดของขบวนการของการเกิดปฏิกิริยาทางแสงที่ใช้สำหรับ Laser remote sensing

Interaction process	Received wavelength ^a	Interaction cross section (m ²)	Detectable matter
Mie scattering	λ_0	$10^{-28} \sim 10^{-10}$	Particle
Rayleigh scattering	λ_0	$\sim 10^{-29}$	Atom molecule
Raman scattering	$\lambda_0 \pm \Delta\lambda$	$10^{-15} \sim 10^{-30}$	Molecule
Fluorescence	$\lambda_0 \pm \Delta\lambda'$	$10^{-29} \sim 10^{-27} \text{ }^b$	Atom molecule
(Resonance scattering)	λ_0	$10^{-18} \sim 10^{-15} \text{ }^c$	Atom
Absorption	λ_0	$10^{-24} \sim 10^{-15}$	Atom molecule
Geometrical reflection	λ_0	$r/\pi \text{ }^d$	Solid reflector

^a λ_0 is the incident laser wavelength, $\Delta\lambda$ and $\Delta\lambda'$ are the wavelength shifts

^b Typical quenched value for molecules in one atmospheric pressure

^c Unquenched value

^d Backscattering coefficient of Lambertian reflection surface with reflectance r

Mie Scattering

เป็น Elastic scattering process ที่มีประสิทธิภาพ โดยสัญญาณที่แตกกระจายกลับมาจากชั้นบรรยากาศจะมีขนาดของความยาวคลื่น (λ) เท่ากันกับความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ (λ_0) ที่ส่งออกไป ซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ การแตกกระจายเริ่มจากอนุภาคที่มีรัศมีใหญ่กว่า $\frac{\lambda_0}{2\pi}$ สำหรับความยาวคลื่นเลเซอร์ที่สามารถมองเห็นได้ ฝุ่นละออง Aerosol particles ที่เป็นของแข็งและของเหลวในชั้นบรรยากาศที่มีขนาดใหญ่กว่า $0.1\mu\text{m}$ จะอยู่ในย่านของ Mie scattering

การแตกกระจายกลับจะขึ้นอยู่กับขนาด ความยาวคลื่น และค่าดัชนีการสะท้อนกลับของอนุภาค ซึ่งได้อธิบายโดย Kerker (1969) ปริมาณของการกระจายและค่าดัชนีการสะท้อนกลับของอนุภาคหาได้โดยการวัดความเข้มของการแตกกระจาย โดยการเปลี่ยนความยาวคลื่นของเลเซอร์หรือมุมของการแตกกระจาย เครื่องรับของระบบจะวัดค่าความถี่ที่เลื่อนไป (Doppler frequency shift) ของ Mie scattering จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝุ่นละออง ซึ่งทำให้สามารถวัดความเร็วลมได้

Rayleigh Scattering

เป็น Elastic scattering โดยอะตอม โมเลกุล และอนุภาคเล็กๆที่มีรัศมี $r \ll \frac{\lambda_0}{2\pi}$ อยู่ในย่านของ Rayleigh scattering process และ Scattering cross section ถูกกำหนดคุณสมบัติโดยคลื่นที่มีความยาวคลื่น λ_0^{-4} การแตกกระจายโดยโมเลกุลในชั้นบรรยากาศ จะใช้ในการวัดหาความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศในระดับสูงๆ อย่างไรก็ตามในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะมีช่วงที่ซ้อนทับกันกับ Mie scattering วิธีการของ Spectroscopic ที่มีความเที่ยงตรงสูงจะแยก Rayleigh และ Mie ออกจากกัน

Raman Scattering

ส่วนใหญ่แล้วโมเลกุลต่างๆ ที่แตกกระจายคลื่นแสงไม่เพียงแต่มีความยืดหยุ่นตามการกระตุ้นความยาวคลื่น แต่จะไม่ยืดหยุ่นตามความยาวคลื่นที่ถูกเลื่อนไปโดย Raman scattering process ขนาดของความถี่ที่ถูกเลื่อนไปจะถูกกำหนดโดยการหมุนและการสั่นของโมเลกุลที่กระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อโมเลกุลนั้น Raman scattering technique ถูกนำไปประยุกต์ใช้ใน Spectroscopic เพื่อการวัดชนิดและความเข้มของโมเลกุล ความชื้น อุณหภูมิ และความดันในบรรยากาศ Raman scattering มีข้อดีตรงที่มีคุณภาพและปริมาณในการวัดสามารถใช้คลื่นแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นคงที่เพียงค่าเดียว ความไวในการประมวลผลโดยปกติจะถูกจำกัดต่อการตรวจวัดโมเลกุลที่มีความเข้มสูงและพื้นที่การสะท้อนกลับเล็กๆ ดังแสดงในตารางที่ 4

Fluorescence and Resonance Scattering

ที่ความยาวคลื่นเรโซแนนซ์ การกระตุ้นเลเซอร์ให้แพร่กระจายเป็นแบบดูดซับและส่งต่อ เรียกว่า Spontaneous emission process หรือ Laser-Induced Fluorescence (LIF) process ที่คลื่นเลเซอร์และความยาวคลื่นถูกเลื่อนไป Fluorescence scattering นี้สามารถใช้สำหรับการตรวจวัดโมเลกุลที่มีความไวสูง เนื่องจากมีพื้นที่ตกกระทบในการแผ่คลื่นใหญ่ เมื่อเทียบกับ Raman scattering อย่างไรก็ตามในชั้นบรรยากาศต่างๆ ความเข้มของ Fluorescence จะลดลงเนื่องจากชนกับโมเลกุลของอากาศซึ่งขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิและความชื้น และสเปกตรัมการกระจายของแสงจะมีช่วงกว้างกว่าและมีจำนวนเส้นสเปกตรัมมากในเกือบทุกๆ โมเลกุล ด้วยเหตุนี้จึงประยุกต์ใช้กระบวนการนี้กับ Remote sensing ในชั้นบรรยากาศระดับต่างๆ ขณะที่ถูกนำมาใช้ในการวัดแบบ Situ โดยวัดความเข้มของโมเลกุล เช่น NO_2 และ OH อีกประการคือกระบวนการนี้มีประโยชน์ในการวัด Chlorophyll algae และแผ่นคราบน้ำมันในน้ำ

Absorption

การแพร่กระจายคลื่นที่กระตุ้นจะถูกลดทอนที่ความยาวคลื่นเรโซแนนซ์ของอะตอมและโมเลกุล พื้นที่ตกกระทบมีขนาดใหญ่และไวต่อการตรวจวัดในระยะไกล อธิบายได้โดยการรวมตัวกันและการเกิดปฏิกิริยา เลเซอร์ 2 ความยาวคลื่นจะถูกใช้อย่างกว้างขวางในการวัดความแตกต่างของการดูดซับที่เปิดและปิดการดูดซับของโมเลกุล

แผนภูมิของการดูดซับชนิด Single-ended laser remote sensors แสดงได้ดังภาพที่ 20 [7] การดูดซับแบบ Long-path แสดงดังภาพที่ 20(a) โดยใช้กระจกหรือ Retro-reflector สำหรับกลับทิศทางของลำแสงเลเซอร์ในระบบ Single-ended system วิธีการนี้สามารถใช้ได้กับวัตถุอื่นๆ เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นไม้ อาคาร สิ่งปลูกสร้าง หรือการวัดพื้นผิวโลกจาก Airborne system ซึ่งแสดงดังภาพที่ 20(b) ทั้งสองระบบดังกล่าวสามารถวัดค่าเฉลี่ยหรือความเข้มโดยรวมของการส่งคลื่นได้โดย

$$N = \left\{ \frac{1}{2\Delta\sigma L} \right\} \ln \left[\frac{P_r(\lambda_1)P_o(\lambda_2)}{P_r(\lambda_2)P_o(\lambda_1)} \right] \quad (8)$$

เมื่อ λ_1 และ λ_2 คือ ความยาวคลื่นของการดูดซับที่เปิดและปิด

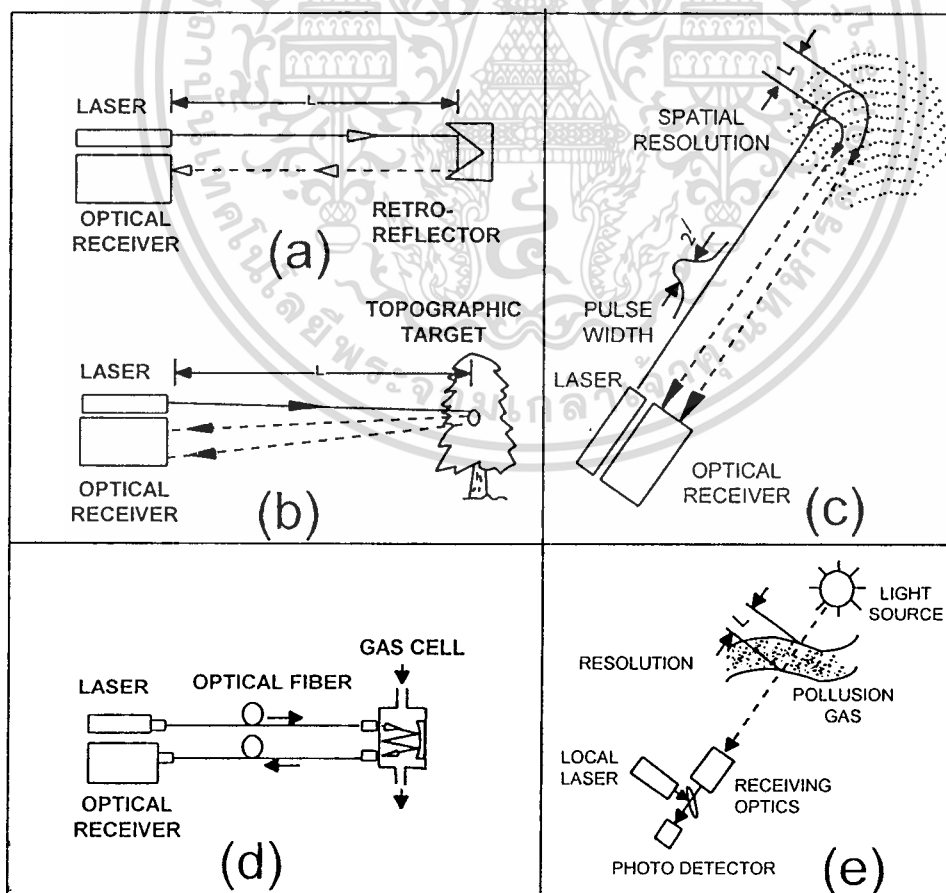
$P_o(\lambda_1)$ และ $P_o(\lambda_2)$ คือ กำลังส่งของเลเซอร์

$P_r(\lambda_1)$ และ $P_r(\lambda_2)$ คือ กำลังของเลเซอร์ที่รับได้ที่ความยาวคลื่นนั้น

$\Delta\sigma$ คือ ความแตกต่างของพื้นที่ตกกระทบของการดูดซับที่ความยาวคลื่นทั้งสอง

L คือ ระยะทางของการส่ง

ภาพที่ 20



การวัดย่านการดูดซับของชั้นบรรยากาศสามารถหาได้โดยเทคนิคของ Differential absorption LIDAR หรือ DIAL LIDAR ดังแสดงในภาพที่ 20(c) วิธีการนี้จะใช้เลเซอร์พัลส์ที่มีความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกัน 2 ความยาวคลื่นส่งไปในเส้นทางเดียวกันพร้อมกันหรือเป็นลำดับ จะสามารถตรวจวัดสัญญาณ Mic scattering และความเข้มของโมเลกุลที่ระยะทาง R ได้จากความสัมพันธ์ของ

$$N(R) = \left\{ \frac{1}{2\Delta\sigma L} \right\} \ln \left[\frac{P_r(\lambda_1, R) P_r(\lambda_2, R+L)}{P_r(\lambda_2, R) P_r(\lambda_1, R+L)} \right] \quad (9)$$

เมื่อ $P_r(\lambda_1, R)$ และ $P_r(\lambda_1, R+L)$ คือ กำลังของเลเซอร์ที่รับได้ที่ความยาวคลื่น on เรโซแนนซ์จากระยะทาง R และ (R+L)
 L คือ ค่าความแตกต่างของระยะทาง
 $P_r(\lambda_2, R)$ และ $P_r(\lambda_2, R+L)$ คือ กำลังของเลเซอร์ที่รับได้ที่ความยาวคลื่น off เรโซแนนซ์

สำหรับ Concentration profile สามารถคำนวณได้จากค่า L โดยการกระทำซ้ำๆ กันของขั้นตอนดังกล่าว

วิธีการแบบ DIAL นั้นเป็นการรวมเทคนิคของการแตกกระจายและการดูดซับ และสามารถปรับปรุงให้มีความไวสูงขึ้นโดยวัดสัญญาณ Mic scattering ให้ได้ใกล้เคียงค่าจริงมากที่สุด ขยายย่านของ L และลดความละเอียดของย่านลง จากสมการข้างต้นสมมติค่าของ $\beta(R)$ และ $\alpha_s(\lambda)$ สำหรับสองความยาวคลื่น อย่างไรก็ตามในบรรยากาศจริงองค์ประกอบที่แตกต่างไปสามารถอธิบายได้โดยการวัดที่มีความไวสูง รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงตรมใน $\beta(R)$ และ $\alpha_s(\lambda)$ สอดแทรกจากโมเลกุลอื่นและ Signal-to-Noise ratio ของระบบที่ใช้ในการตรวจวัด

ภาพที่ 20(d) แสดงตัวอย่างของ Optical fiber absorption sensor ถ้าแสงเลเซอร์กำลังต่ำจะถูกส่งผ่าน Optical fiber ไปยัง Gas cell ที่อยู่ห่างไกลออกไป และแสงที่ถูกดูดซับโดยโมเลกุลจะถูกส่งกลับมายังเครื่องตรวจวัด การประมวลผลของ Spectroscopic จะใช้เพื่อหาความเข้มโมเลกุลของ Remote cell

ภาพที่ 20(e) แสดง Heterodyne radiometer เป็นวิธีการแบบ Passive โดยใช้แสงธรรมชาติสเปกตรัมของแสงที่ถูกส่งออกไปซึ่งได้จากการตรวจวัดแบบ Heterodyne มีความละเอียดสูงที่สุดโดยรวมกับความถี่ของลำแสงเลเซอร์ที่ปรับค่าได้โดย Local oscillator รวมกันเป็นข้อมูลการดูดซับ

โมเลกุลและความสูงของมันสามารถหาได้โดยการสมมติความกดดันของบรรยากาศและการ
กระจายของอุณหภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สมการ LIDAR และการวิเคราะห์ข้อมูล

กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมการของระบบ LIDAR ซึ่งเป็น Mie scattering LIDAR และการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับจากการทดลองเพื่อให้ได้ผลการทดลองตามต้องการ

Scattering form ของสมการ LIDAR

ในกรณีของสัญญาณพัลส์ Monostatic LIDAR การเพิ่มของค่ากำลังของสัญญาณ $\Delta P(\lambda, R)$ ที่รับได้จากการตรวจสอบระยะห่างระหว่างความยาวคลื่น $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$ จากรูปแบบขององค์ประกอบของการหาช่องว่างระหว่างพื้นที่ $(R, R + \Delta R)$ ดังนั้นเราจะได้สมการ

$$\Delta P(\lambda, R) = \int J(\lambda, R, r) \Delta\lambda \Delta R p(\lambda, R, r) dA(R, r) \quad (10)$$

เมื่อ $J(\lambda, R, r)$ คือ รัศมีของสเปกตรัมที่ได้จากแสงเลเซอร์ต่อระยะห่างที่วัดได้ในช่วงความยาวคลื่น λ ในตำแหน่ง r ในพื้นที่เป้าหมาย R
 $dA(R, r)$ คือ องค์ประกอบของพื้นที่ในตำแหน่ง r และ R
 $p(\lambda, R, r)$ คือ ความน่าจะเป็นของการกระจายรัศมีของความยาวคลื่น λ จากตำแหน่ง r ณ จุด R ที่ได้รับการตรวจสอบ

มีหลายๆ สมการที่น่าจะมีผลกระทบต่อความน่าจะเป็นของสมการที่ได้ ทั้งหมดนี้รวมถึงการพิจารณาทางด้านภูมิศาสตร์, การลดทอนในชั้นบรรยากาศ, คุณสมบัติของเครื่องรับ, คุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะของระบบการรับส่งในรูปแบบสเปกตรัม ดังนั้นเราสามารถบอกองค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของความน่าจะเป็นได้ดังต่อไปนี้

$$p(\lambda, R, r) = \frac{Ao}{R^2} \times T(\lambda, R) \times \xi(\lambda) \times \xi(R, r) \quad (11)$$

เมื่อ $\frac{Ao}{R^2}$ คือ ค่ามุมของเครื่องรับ (Ao เริ่มที่พื้นที่ของเลนส์หรือกระจก)

$T(\lambda, R)$ คือ ค่าเฟกเตอร์ของชั้นบรรยากาศที่ความยาวคลื่น λ ที่เหนืออัตราส่วนของ R

$\xi(\lambda)$ คือ เฟกเตอร์สเปกตรัมของเครื่องรับ รวมทั้งผลกระทบของการเลือกอุปกรณ์ เช่น monochromator

$\xi(R, r)$ คือ ความน่าจะเป็นของการกระจายจากตำแหน่ง r ในพื้นที่เป้าหมาย R

ในการตรวจสอบบนพื้นฐานในการพิจารณาทางด้านตำแหน่งทางภูมิศาสตร์

ในขณะนี้เราสมมติให้ $\xi(R, r)$ ขึ้นอยู่กับค่า Overlap ของพื้นที่การกระจายของแสงเลเซอร์และความเข้มในการรับของเครื่องรับเท่านั้น ในขั้นแรกเราจะให้ $\xi(R, r)$ คือ Overlap factor ด้วยเหตุผลนี้เราจะใช้มันในกรณีของการเรียนรู้ทางด้าน Geometrical form factor

ส่วนค่า $J(\lambda, R, r)$ ขึ้นอยู่กับค่าของการกระจายของเลเซอร์และตัวกลางที่เลเซอร์ผ่าน ในส่วนนี้เราจะพิจารณาถึงการแตกกระจายในตัวกลางจะได้

$$J(\lambda, R, r) = \beta(\lambda, \lambda, R, r) I(R, r) \quad (12)$$

เมื่อ $I(R, r)$ คือ ค่าการเปล่งแสงของเลเซอร์ที่ตำแหน่ง r และย่าน R

$$\beta(\lambda, \lambda, R, r) = \sum_i Ni(R, r) \left\{ \frac{d\sigma(\lambda_i)}{d\Omega} \right\}_i g(\lambda) \quad (13)$$

เมื่อ $\beta(\lambda, \lambda, R, r)$ คือ ค่าประสิทธิภาพปริมาตรการสะท้อนกลับของแสงเลเซอร์

$Ni(R, r)$ คือ จำนวนความหนาแน่นของการแตกกระจายจนถึงค่า i

$\left\{ \frac{d\sigma(\lambda_i)}{d\Omega} \right\}_i$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของการแตกกระจายติดกับส่วนของการส่อง

แสงและรัศมีของแสงเลเซอร์ที่ความยาวคลื่น λ_i

$g(\lambda)\Delta\lambda$ คือ ส่วนเล็กๆ ที่เหลือที่ได้จากการแตกกระจายของแสงที่ตกในช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนระยะห่างของความยาวคลื่น $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$ มอนูญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลรวมของกำลังสัญญาณที่รับได้จะมีค่าคงที่ $t(=2R/c)$ ซึ่งเป็นเวลาที่ได้จากขอบปลายของสัญญาณเลเซอร์ (ในค่าความเร็วของแสง, c) ในย่าน R และสะท้อนกลับเป็นค่า LIDAR สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$P(\lambda, t) = \int_0^{t=\frac{ct}{2}} dR \int_{\lambda_0} d\lambda \int J(\lambda, R, r) p(\lambda, R, r) dA(R, r) \quad (14)$$

ในการหาค่าย่านระยะห่างของการแตกกระจายที่เวลา t นั้น ไม่เพียงแต่เราจะต้องรู้ค่าระยะทาง $\frac{ct}{2}$ จากจุดกำเนิด แต่เราจะต้องทราบค่าจากจุดใดๆ จากส่วนของเลเซอร์ที่มันแตกกระจายตกลงไปด้วย ย่านของความยาวคลื่นที่ขยายเหนือส่วนที่เครื่องรับสัญญาณ LIDAR $\Delta\lambda_0$ ที่มีจุดกลางอยู่ที่ λ จากสมการ 11 และ 12 เราจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$P(\lambda, t) = A_0 \int_0^{t=\frac{ct}{2}} \frac{dR}{R^2} \int_{\lambda_0} \xi(\lambda) d\lambda \int \beta(\lambda, \lambda, R, r) T(\lambda, R) \xi(R, r) I(R, r) dA(R, r) \quad (15)$$

ในกรณีแตกกระจายในตัวกลางนั้นมีค่าการกระจายที่น้อยมาก ถ้าเรากำหนดให้มันน้อยกว่าค่าการกระจายที่ค่าสเปกตรัมของเลเซอร์ $\Delta\lambda_0$ เพราะฉะนั้นค่า $\xi(\lambda)$ ไม่จำเป็นต้องใช้ ดังนั้น β จะเป็นฟังก์ชันผลต่าง และเราสมมติตัวกลางเป็นค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงที่แน่นอนระหว่างลำแสงเลเซอร์ เราจะได้สมการดังนี้

$$P(\lambda, t) = A_0 \xi(\lambda) \int_0^{t=\frac{ct}{2}} \beta(\lambda, \lambda, R) T(\lambda, R) \frac{dR}{R^2} \int \xi(R, r) I(R, r) dA(R, r) \quad (16)$$

การพิจารณาดังกล่าวข้างต้น เราสมมติให้ความน่าจะเป็น $\xi(R, r)$ คือความน่าจะเป็นเพียงพื้นที่เดียวของการเกิดลำแสงเลเซอร์ นอกจากนั้นเราจะถือว่าเป็น 0 ดังนั้นเราจะสมมติให้การกระจายของสัญญาณเลเซอร์มีรูปแบบที่แน่นอนภายใต้พื้นที่ $A_L(R)$ ที่ย่าน R ในกรณีนี้จะได้

$$\int \xi(R, r) I(R, r) dA(R, r) = \xi(R) I(R) A_L(R) \quad (17)$$

และ

$$P(\lambda, t) = A_0 \xi(\lambda) \int_0^{t=\frac{ct}{2}} \beta(\lambda, \lambda, R) T(\lambda, R) \xi(R) I(R) A_L(R) \frac{dR}{R^2} \quad (18)$$

นอกจากนี้เพื่อช่วยต่อการเรียนรู้ในการประมาณค่าของรูปร่างของสัญญาณเลเซอร์ ยังใช้การหาค่าของพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าของ λ_i ดังนั้นค่าจะถูกกำหนดในสมการ 18 คือ $\frac{c(t - \lambda_i)}{2}$ ถึง $\frac{ct}{2}$ ในส่วนย่านที่สนใจในการวัดสัญญาณแสงเลเซอร์นั้น โดยทั่วไปแล้วความยาวของสัญญาณจะยาวกว่า $c\lambda_i$ (นอกนั้นเราถือว่าไม่ใช่) เราจะยังคงค่าผลกระทบที่มีต่อย่านของสัญญาณเป็นค่าคงที่ ที่มีค่ามากกว่าระยะห่างของย่านที่เรารวมได้ ดังนั้นผลรวมของการแตกกระจายกำลังของแสงเลเซอร์ที่รับได้ในเวลา $t = \frac{2R}{c}$ สามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P(\lambda, t) = A_o \xi(\lambda) \beta(\lambda_i, \lambda, R) T(\lambda, R) \xi(R) I(R) A_i(R) \frac{c\lambda_i/2}{R^2} \quad (19)$$

เพื่อความถูกต้องมากขึ้น เราจะให้เฟกเตอร์ตัวสุดท้ายเป็น $(c\lambda_i/2)/[R(R - c\lambda_i/2)]$ แต่จะกำหนดให้ค่า $R \gg c\lambda_i/2$

สำหรับรูปสัญญาณแสงเลเซอร์ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีระยะห่าง λ_i คือ

$$I(R) = \frac{E_i T(\lambda_i R)}{\lambda_i A_i(R)} \quad (20)$$

เมื่อ E_i คือ พลังงานเอาต์พุตของสัญญาณพัลส์เลเซอร์

$T(\lambda_i, R)$ คือเฟกเตอร์ที่มีผลต่อการรับส่งสัญญาณของชั้นบรรยากาศที่ความยาวของคลื่นแสงเลเซอร์ย่าน R ซึ่งได้จากกฎของ Beer-Lambert นั่นคือเฟกเตอร์ของระบบการส่งคือ

$$T(\lambda_i, R) \equiv e^{-\int_0^R K(\lambda_i, R) dR} \quad (21)$$

และ
$$T(\lambda, R) \equiv e^{-\int_0^R K(\lambda, R) dR} \quad (22)$$

เมื่อ $K(\lambda_i, R)$ และ $K(\lambda, R)$ คือประสิทธิภาพในการลดทอนในชั้นบรรยากาศของแสงเลเซอร์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ด้วยเหตุนี้มันจึงเป็นสิ่งที่ต้องนำมาพิสูจน์และรวมเข้ากับเฟกเตอร์ของระบบส่งสัญญาณในชั้นบรรยากาศ

$$T(R) \equiv T(\lambda, R)T(\lambda, R) = e^{-\int_0^R \{K(\lambda, R) + K(\lambda, R)\} dR} \quad (23)$$

ถึงแม้ว่าค่ากำลังที่ตกลงในช่วงเวลาทันทีทันใดที่ได้จากการตรวจพบเป็นค่าที่มีประโยชน์ต่อการคำนวณ นอกเหนือจากนี้ก็เป็นค่าความเป็นจริงที่การเพิ่มขึ้นของการกระจายพลังในความยาวคลื่น λ ที่รับได้จากการตรวจพบระหว่างระยะห่างของ $(t, t + \tau)$ เมื่อ τ คือผลรวมของความยาวที่ตรวจพบได้ และที่ค่า $t = \frac{2R}{c}$

$$E(\lambda, R) = \int_{2R/c}^{2R/c + \tau} P(\lambda, t) dt \quad (24)$$

รวมสมการที่ 19, 20 และ 23 เข้ากับ 24 จะได้

$$E(\lambda, R) = E_i \xi(\lambda) T(R) \xi(R) \frac{A_o}{R^2} \beta(\lambda, \lambda, R) \frac{c\tau}{2} \quad (25)$$

นี่คือการอ้างอิงสมการพื้นฐานในการแตกกระจายของ LIDAR ไม่ต้องสงสัยเลยว่าเราได้มาซึ่งสมการนี้มาจากการสมมติให้ $\tau < \frac{2R}{c}$ ผลกระทบต่อย่านความละเอียดของระบบกำหนดให้ถึง $\frac{c(\tau + \tau_i)}{2}$ ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 21 ถ้าส่วนใดๆ แตกกระจายและวิ่งตัดผ่านส่วนที่มีจำนวนอิเล็กตรอนแตกต่างกัน สมการของ LIDAR ก็สามารถแสดงได้ในรูปแบบของ

$$E(\lambda, R) = E_i \xi(\lambda) T(R) \xi(R) \frac{A_o}{R^2} N(R) \frac{\sigma^*(\lambda, \lambda)}{4\pi} \frac{c\tau}{2} \quad (26)$$

เมื่อ $\sigma^*(\lambda, \lambda)$ คือ ผลรวมของส่วนตัดขวางของการแตกกระจายที่ตำแหน่ง λ สำหรับเหตุการณ์การกระจายของส่วนความยาวคลื่น λ . สมการที่ 26 นี้ คือ สมการพื้นฐานของรูปแบบการแตกกระจายที่ต่อเนื่องรูปแบบเดียว ในสมการของ LIDAR

ส่วนใหญ่แล้วในกรณีของสัญญาณพัลส์ของแสงเลเซอร์เราจะใช้

$$I(R^*) = \frac{E_i T(\lambda, R^*)}{A_i(R^*)} I(i^*) \quad (27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

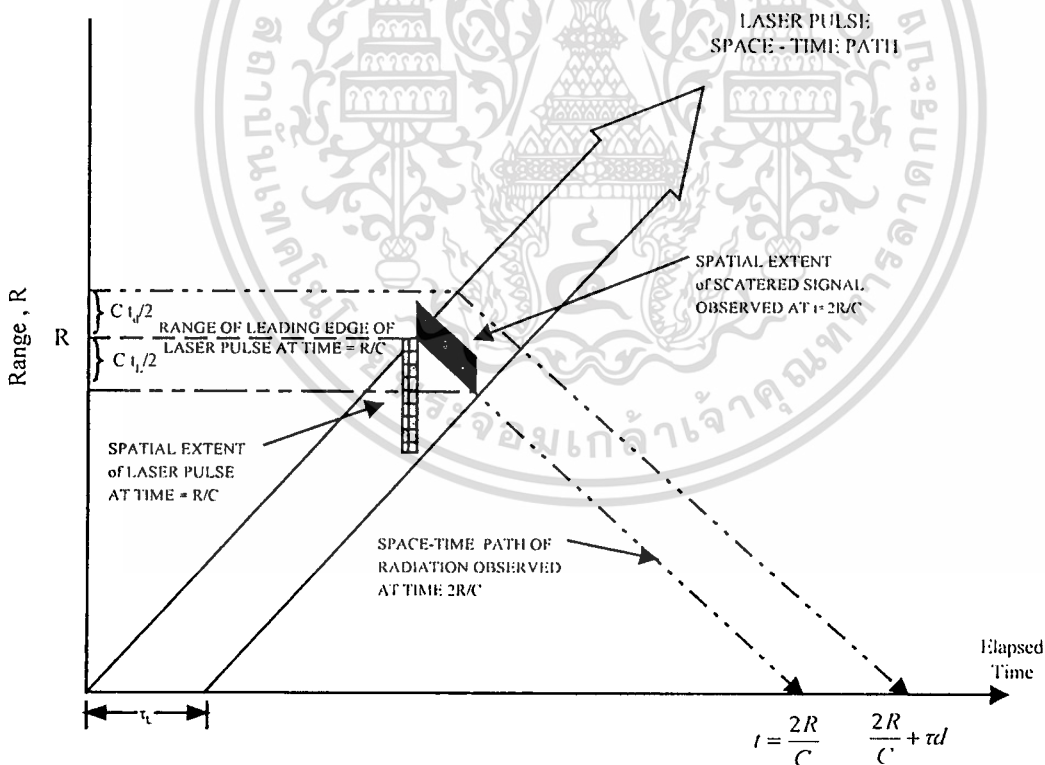
เมื่อ $I(r^*)$ แสดงถึงคุณสมบัติเกี่ยวกับเวลาของสัญญาณพัลส์ของเลเซอร์ ในส่วนที่อ้างอิงคงที่ถึงขอบของสัญญาณ เพื่อความเด่นชัด

$$r^* = \frac{2(R - R^*)}{c} \quad (28)$$

และแสดงที่ค่าเวลาที่กระทำ ณ ขอบของสัญญาณพัลส์เลเซอร์ ถึงการกระจายในแนว R^* ถึง R และการแตกกระจายย้อนกลับไปยัง R^* ในรูปทั่วไป

$$\int_0^\infty I(r^*) dr^* = 1 \quad (29)$$

ภาพที่ 21



แสดงข้อสรุปที่แน่นอนของช่องว่างในอากาศ ของเหตุการณ์การเกิดการกระจายที่ไม่แน่นอนของสัญญาณพัลส์ รูปของเลเซอร์ ที่ได้จากการมอง ผ่านทางช่องของเวลา (Measures, 1997)

ภายใต้ตัวแปรต่างๆ ผลรวมของกำลังสัญญาณที่วัดได้ หลังจากเวลาที่ผ่านไป t ถึงแนว R ตามสมการที่ 18 เราจะได้

$$P(\lambda, R) = E_{LAO} \xi(\lambda) \int_{R=0}^{R=ct/2} \beta(\lambda, \lambda, R^*) T(R^*) \xi(R^*) I(R^*) \frac{dR^*}{R^*} \quad (30)$$

เมื่อ $I(R^*)$ เคยใช้เป็น $I(r^*)$

ถ้าเราใช้การสมมติให้ค่าประสิทธิภาพของ ความยาวของสัญญาณพัลส์เลเซอร์ ct มีค่าเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่เราสนใจ ดังนั้นเราจะยังคงได้เฟกเตอร์

$\beta(\lambda, \lambda, R^*) T(R^*) \xi(R^*) / R^{*2}$ เป็นค่าคงที่ที่มีค่ามากกว่า ค่าแนวระยะห่างที่เล็กของแนวที่เราต้องการ สำหรับค่า $I(R^*)$ ที่มีค่าสั้นที่สุด

$$P(\lambda, R) = E_{LAO} \xi(\lambda) \beta(\lambda, \lambda, R) T(R) \xi(R) I(R) \int_{R=0}^{R=ct/2} I(r^*) \frac{cdt^*}{2} \quad (31)$$

เมื่อเราแทนจำนวนค่าลิมิตบนในการอินทิเกรต แสงของส่วนการแตกกระจาย ของขอบนำของแสงเลเซอร์เราจะได้

$$\int_0^{2R/c} I(r^*) dt^* \cong 1 \quad (32)$$

และเรายังสามารถที่จะเขียน สมการของการรับพลังงานการแตกกระจายของแสงเลเซอร์ ที่เวลาใดๆ ถึง ขอบนำของเลเซอร์ ในแนว R ได้คือ

$$P(\lambda, R) = P_{LAO} \xi(\lambda) \beta(\lambda, \lambda, R) \xi(R) \frac{ct}{2} e^{-\int_0^R K(r) dr} \quad (33)$$

จากสมการที่ 23 เราจะได้อยู่ในรูปของ

$$K(R) = K(\lambda, R) + K(\lambda, R) \quad (34)$$

เป็นค่าสัมประสิทธิ์ผลในการลดทอนในระบบการส่งแบบ 2 ทาง และค่า $P_L \equiv E_L/t$ เป็นค่าเฉลี่ยของกำลังในสัญญาณพัลส์เลเซอร์

ในกรณีที่การเกิดเหตุการณ์ของการแตกกระจายของแสงเลเซอร์ แบบ crastic (Mie or Rayleigh) เราจะเขียนอยู่ในรูปของ

$$P(\lambda_L, R) = P_L \frac{4\pi}{R^2} \xi(\lambda_L) \beta(\lambda_L, R) \xi(R) \frac{c\tau_L}{2} e^{-2 \int_0^R K'(\lambda_L, R) dr} \quad (35)$$

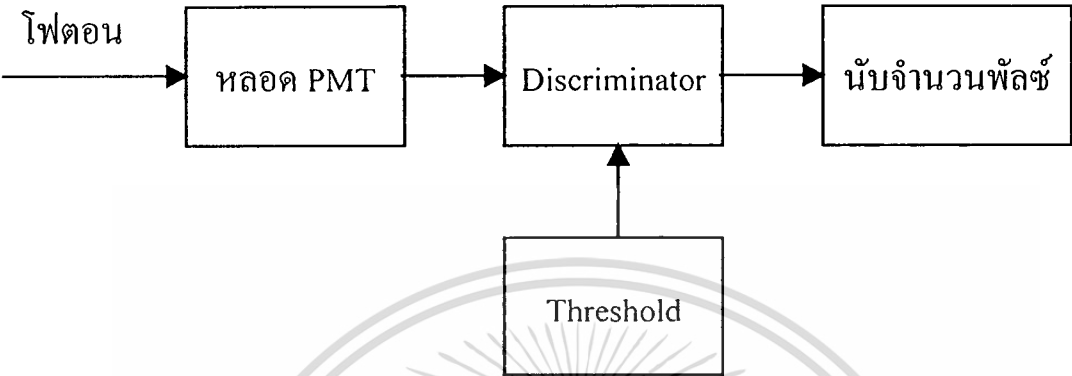
ผลสรุปเราจะได้ สมการที่ 33 สมการของการแตกกระจายของ LIDAR ที่ใช้กันมากที่สุดในการเรียนรู้ และสมการที่ 35 คือ สมการที่เป็นกรณีพิเศษในการหาค่าการเปลี่ยนแปลง ในส่วนที่เราสนใจ หรือการหาค่าการลดทอน ของการแตกกระจายสัญญาณ LIDAR

ในการตระหนักถึงพลังงานการแตกกระจายที่รับได้ในการตรวจพบค่าเวลาทั้งหมด สมการที่ 25 คือสมการที่แสดงการพิจารณาได้ตรงประเด็นของ สมการการแตกกระจายของสัญญาณ LIDAR [10],[7]

Photon counting

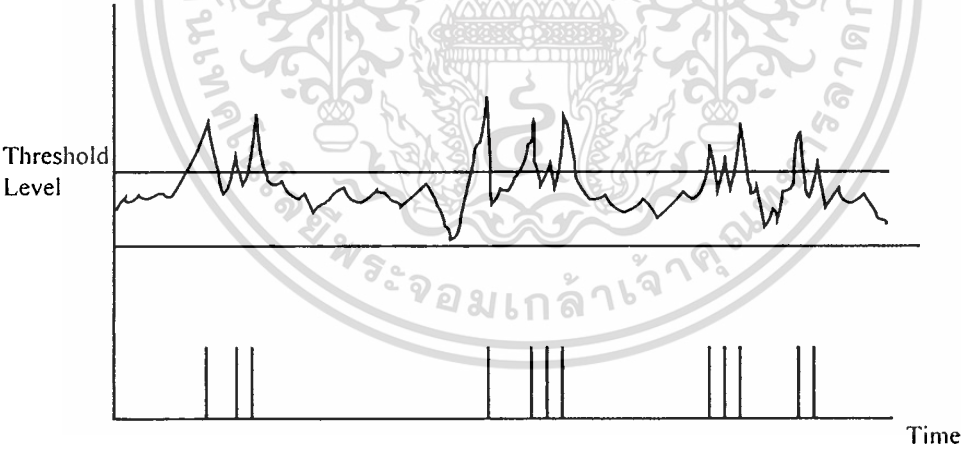
จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงสมการของ LIDAR จะเห็นได้ว่าระดับของสัญญาณมีการลดลงตามระยะทางกำลังสอง ซึ่งมีการลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งที่ระดับความสูงสัญญาณจะมีค่าน้อยมาก และประกอบกับความเป็นจริงที่ระยะทางสูงๆ จากพื้นดิน ปริมาณอะตอมหรือ โมเลกุลของก๊าซมีจำนวนเบาบางลง ทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นที่ส่งไปมีน้อยลง จึงมีการใช้งานเทคนิค Photon counting มาช่วยในการวัดที่ระดับสูงๆ โดยสัญญาณที่ได้จากการขยายของหลอด PMT แล้วส่งเข้าไปยัง Discriminator โดยแสดงให้เห็นดังภาพที่ 22 และเมื่อสัญญาณโฟตอนที่เข้ามาถูกขยาย และถ้าระดับสัญญาณมีระดับเกินค่า Threshold ของ Discriminator ก็จะปรากฏพัลส์ที่เอาต์พุตและทำการเก็บจำนวนพัลส์ในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนดดังที่เห็นได้จากภาพที่ 23

ภาพที่ 22



แสดงการทำงานของ Photon counting

ภาพที่ 23



แสดงระดับค่า Threshold และจำนวนพัลส์ที่ได้

การเก็บข้อมูลและประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์

ในระบบทำการจะส่งเลเซอร์เป็นพัลส์ที่มีความถี่ 10Hz และมีความกว้างพัลส์ 5×10^{-9} วินาที และในการเก็บข้อมูลจะเก็บหลังจากส่งเลเซอร์ออกไปแล้ว 2×10^{-3} วินาที โดยทำการแบ่งเป็นช่วงๆ ละ 2×10^{-6} วินาที โดยที่ 1×10^{-3} วินาที จะมีระยะทางในการเก็บข้อมูล 150 km จากพื้นดิน

และในการเก็บข้อมูลจะใช้การ์ด MCS (Multichannel Scaler) เป็นการ์ดที่เชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์โดยการ์ด MCS จะทำการนับจำนวนพัลส์ดังที่เห็นในภาพที่ 23 จะเห็นว่าสัญญาณเมื่อผ่าน Discriminator แล้วสัญญาณที่ได้จะเป็นรูปพัลส์ และจำนวนพัลส์เหล่านี้จะถูกส่งไปยัง Counter ใน MCS เพื่อทำการนับในแต่ละช่วงเวลา โดยช่วงเวลา (tr) ของการนับจะใช้เวลา 2×10^{-6} วินาที ดังที่เห็นในภาพที่ 24 และข้อมูลเวลาของการนับจะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำในคอมพิวเตอร์ และในการเก็บข้อมูลจะทำการเก็บทั้ง Parallel polarization (P-pol) และ Perpendicular polarization (S-pol)

$$T = 100 \times 10^{-3}$$

โดยที่ T คือระยะความห่างของเลเซอร์พัลส์ที่ส่งออกไป

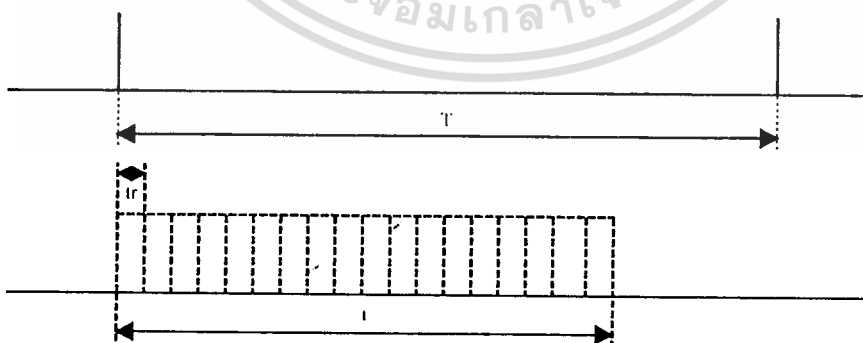
$$t = 200 \times 10^{-6}$$

โดยที่ t คือระยะเวลา (tr) ทั้งหมดในการเก็บข้อมูลในแต่ละพัลส์ของเลเซอร์ที่ส่งออกไป

$$tr = 2 \times 10^{-6}$$

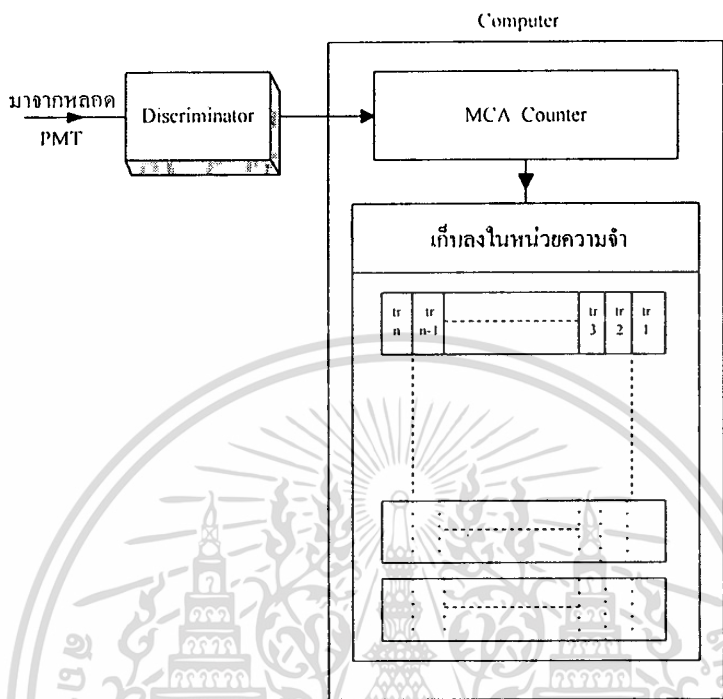
โดยที่ tr คือค่าระยะเวลาในแต่ละช่วงของการเก็บข้อมูล

ภาพที่ 24



แสดงช่วงเวลาของการเก็บข้อมูล

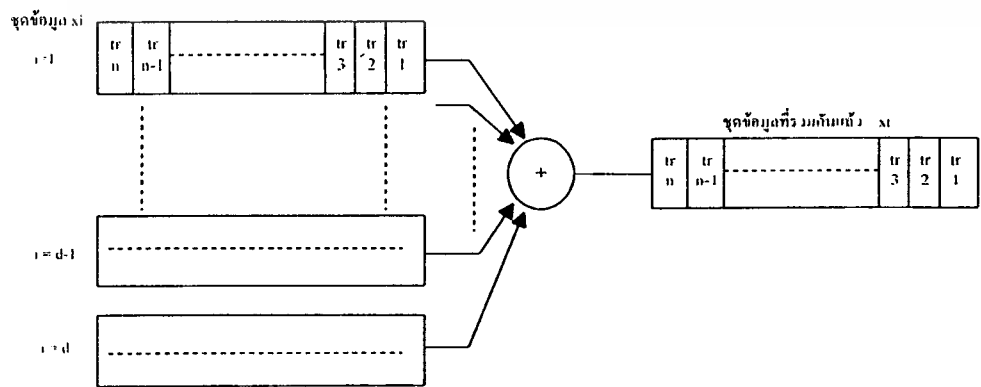
ภาพที่ 25



แสดงการเก็บข้อมูล โดยคอมพิวเตอร์

โดยการนับแต่ละครั้งจะทำการเก็บข้อมูลลงในไฟล์ โดยที่ไฟล์ข้อมูล แต่ละข้อมูลจะถูกนำมา
มารวมกัน ดังที่เห็นในภาพที่ 26

ภาพที่ 26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน แสดงการรวมชุดข้อมูลของชุดข้อมูล Xi ต่างๆ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถเขียนได้เป็น

$$x_{tir} = \sum_{i=1}^d X_{tir} \quad (36)$$

โดยที่ X_{tir} คือ ข้อมูลที่อยู่ในชุดข้อมูลที่ i และอยู่ในตำแหน่งที่ ir
 x_{tir} คือ ข้อมูลที่อยู่ในตำแหน่งที่ ir และเป็นข้อมูลที่ถูกรวมแล้ว
 d คือ จำนวนชุดของข้อมูล
 n คือ จำนวนตำแหน่งของข้อมูลทั้งหมด

และค่า x_i ในแต่ละตำแหน่ง ir คือค่าของจำนวนพัลส์ที่นับได้จากการสะท้อนของอนุภาคที่อยู่ในอากาศ และเมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับลักษณะการลดลงของอนุภาค เมื่อมีระยะความสูงขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$N(h) = Ae^{-\gamma h} \quad \text{โมเดกุล} \quad (37)$$

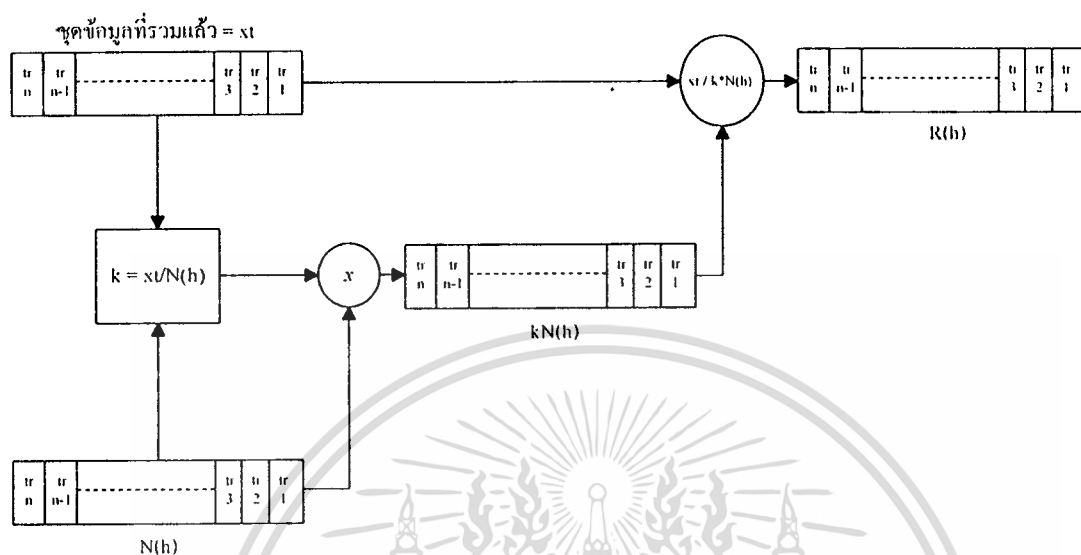
โดยที่ $N(h)$ คือ ปริมาณของอนุภาคในอากาศที่มีความสูง h
 γ คือ ค่าคงที่ในการลดลงโดยจะมีค่า 0.1-0.2
 h คือ ค่าระยะความสูง
 A คือ ปริมาณของอนุภาคในอากาศที่ระดับพื้นดิน

โดยที่มีการเปรียบเทียบค่า x_i ในแต่ละตำแหน่ง ir ที่ได้จากการสะท้อนของอนุภาคที่อยู่ในอากาศ กับลักษณะการลดลงของอนุภาค $N(h)$ โดยสามารถหาอัตราส่วนระหว่างจำนวนทั้งสองได้ดังนี้

$$k = \frac{x_i}{N(h)} \quad (38)$$

ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นดังในภาพที่ 27

ภาพที่ 27



แสดงการหาค่า k และอัตราส่วน $R(h)$

โดยที่เมื่อหาได้ค่า k แล้ว ก็จะนำค่า k ไปคูณกับค่าของอนุภาคในอากาศ $N(h)$ และหลังจากนั้นก็ให้นำค่า xI มาหาอัตราส่วนกับค่า $N(h)$ ดังที่แสดงในภาพที่ 27 โดยผลที่ได้จากอัตราส่วนเปรียบเทียบ $R(h)$ จะมีค่าเป็นหนึ่ง เมื่อข้อมูลที่ได้จาก xI ที่ได้จากการเก็บผลกับค่าจำนวนอนุภาค $k * N(h)$ มีค่าเท่ากัน

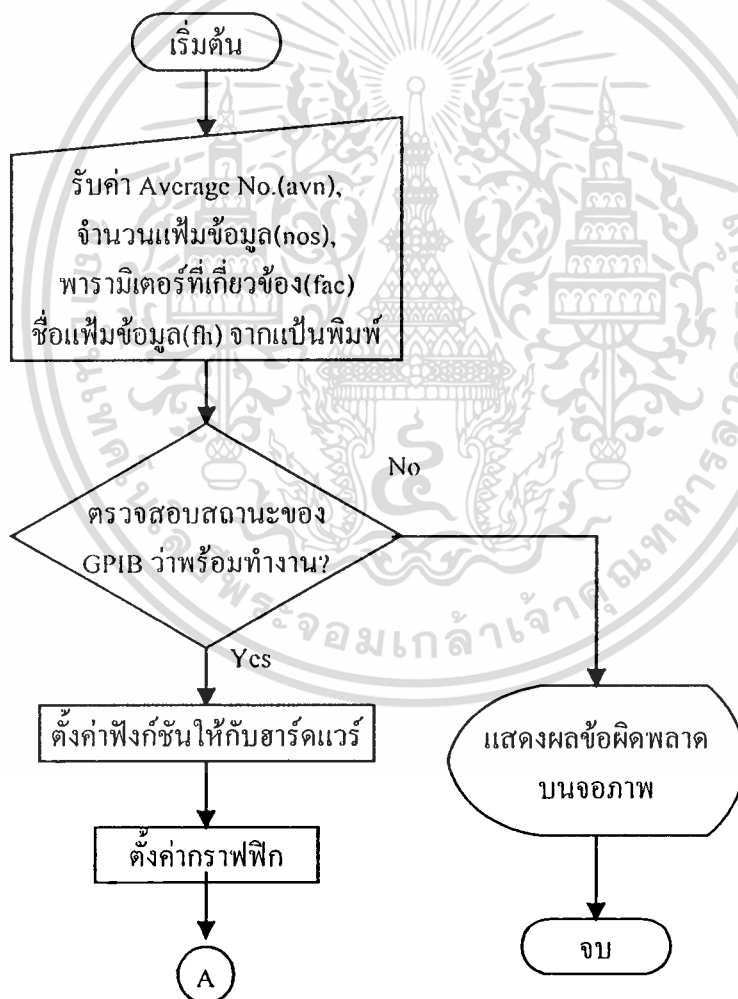
$$R(h) = \frac{xI}{k * N(h)} \quad (39)$$

แต่ในความเป็นจริง บริเวณของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มีอนุภาคที่มีลักษณะผลึกของเกล็ดน้ำแข็งอยู่ ดังนั้นอัตราส่วน $R(h)$ ที่บริเวณนี้จะมีค่าไม่เท่ากับหนึ่ง จึงทำให้ทราบถึงระยะทางความสูงของชั้นบรรยากาศนี้ได้

การวิเคราะห์ข้อมูล

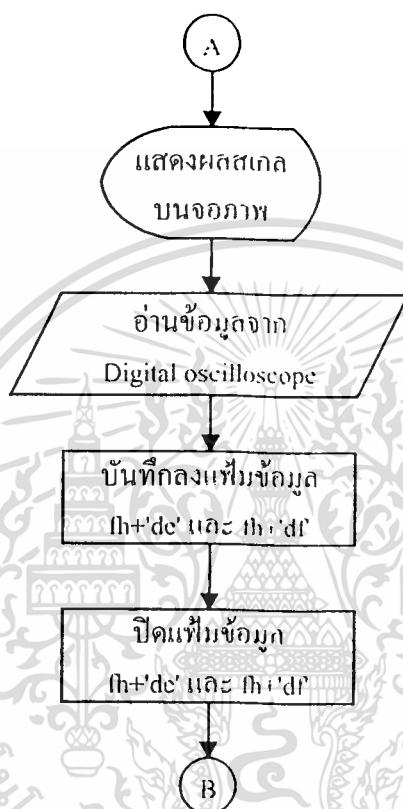
การจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลอง จะใช้เทคนิคของ Photon counting มาทำการเก็บข้อมูล โดยใช้การนับจำนวนพัลส์ที่ได้มาจากหลอด PMT และใช้การ์ด MCS เพื่อทำการบันทึกข้อมูลที่ได้อิงในเครื่องคอมพิวเตอร์ และใช้โปรแกรม LE93AT3.C ในการจัดเก็บข้อมูลแต่ละชุด ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานดังแผนผังการทำงานในภาพที่ 28 ถึง 30

ภาพที่ 28



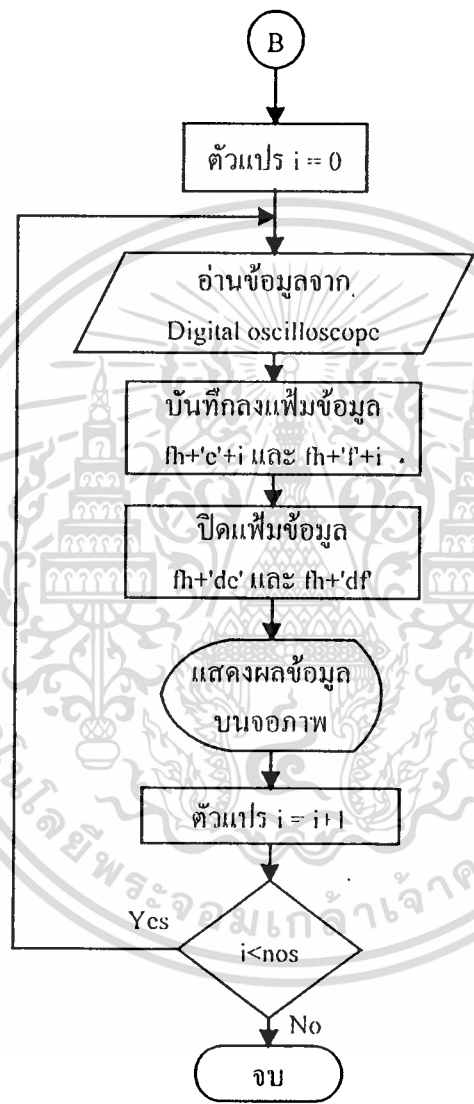
แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมบันทึกข้อมูล

ภาพที่ 29



แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมบันทึกข้อมูล (ต่อ)

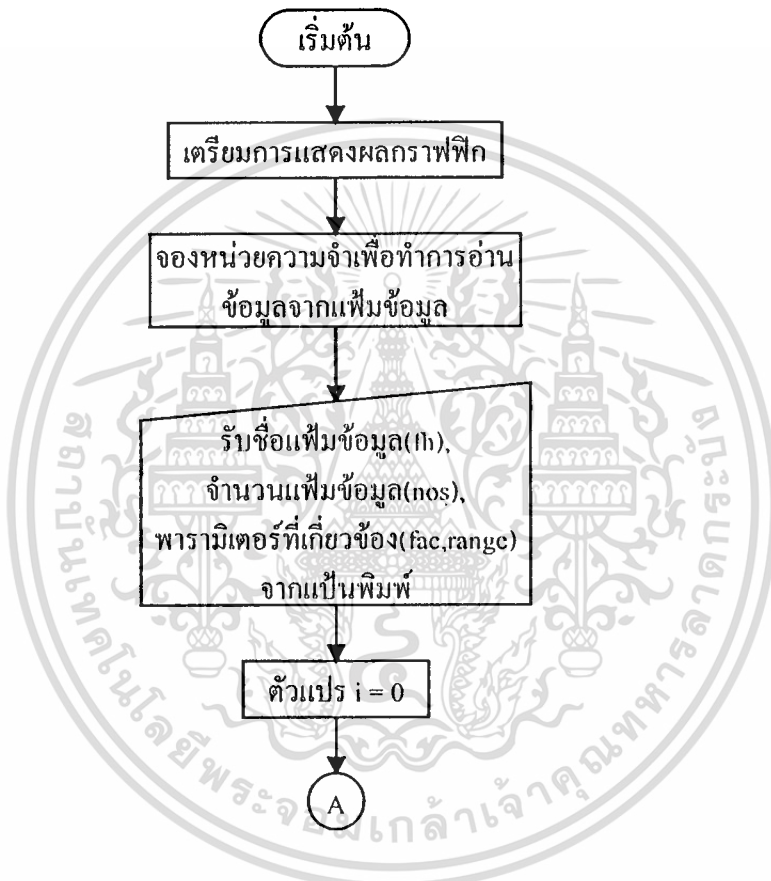
ภาพที่ 30



แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมบันทึกข้อมูล (ต่อ)

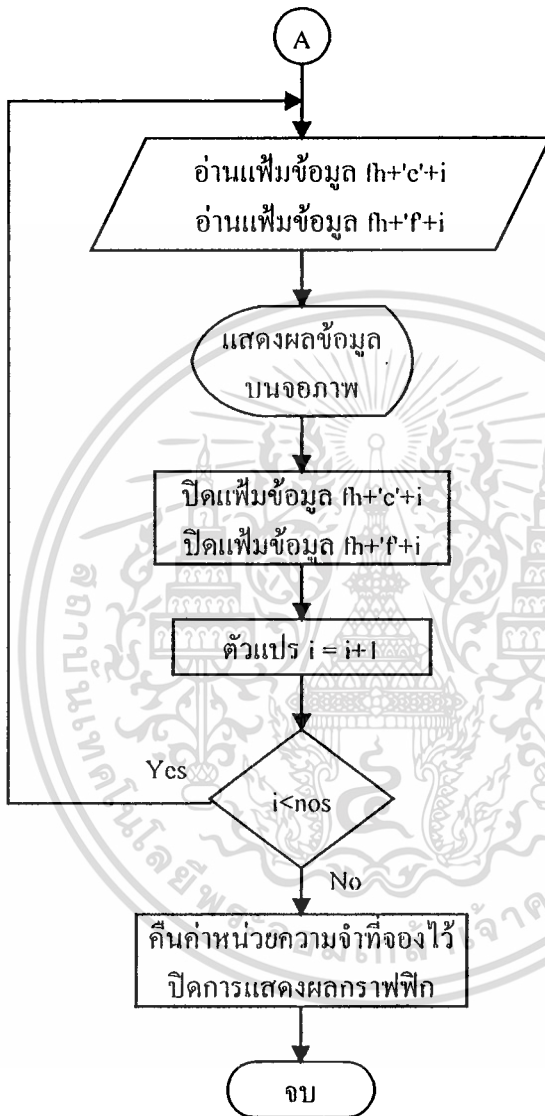
หลังจากได้ทำการจัดเก็บบันทึกข้อมูลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์แล้ว สามารถนำข้อมูลที่ได้จัดเก็บไว้มาแสดงผลบนจอภาพใหม่โดยใช้โปรแกรม LE93AT3R.C ซึ่งมีแผนผังการทำงานดังภาพที่ 31 ถึง 32

ภาพที่ 31



แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมแสดงผลบนจอภาพ

ภาพที่ 32



แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมแสดงผลบนจอภาพ (ต่อ)

บทที่ 6

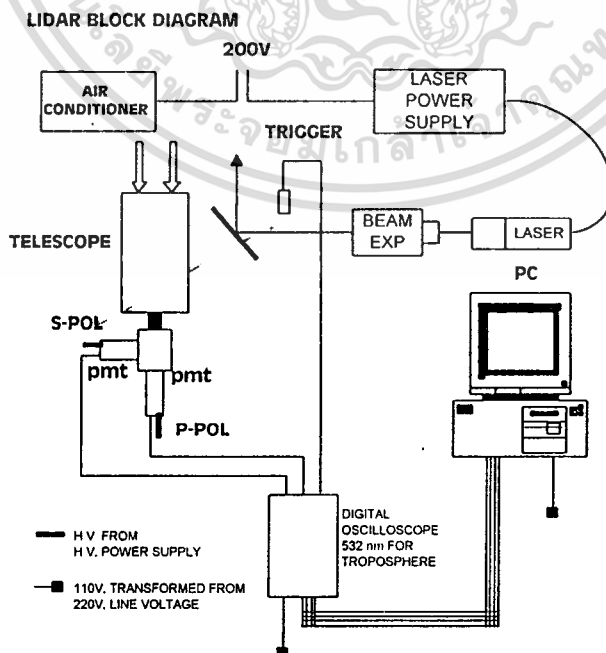
โครงสร้างของอุปกรณ์การทดลอง

กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดโครงสร้างของอุปกรณ์การทดลอง บล็อกไดอะแกรมของระบบ LIDAR การทำงานของระบบ รายละเอียดทางเทคนิคของระบบ ตลอดจนวิธีการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล

บล็อกไดอะแกรมของระบบ LIDAR

ภาพที่ 33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบ LIDAR อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของระบบ LIDAR

จากบล็อกไดอะแกรมของระบบ LIDAR ในภาพที่ 33 มีขั้นตอนการทำงานดังนี้ ในภาคส่ง Laser power supply ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้กับตัวกำเนิดแสงเลเซอร์ซึ่ง Nd:YAG Laser ในการผลิตแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 532nm แล้วนำมาขยายลำปี่มโดย Laser beam expander ส่งต่อไปสะท้อนกระจกขึ้นไปยังชั้นบรรยากาศในแนวตั้งฉากกับพื้นดิน ส่วนในภาครับ จะทำการรับสัญญาณที่แตกกระจายกลับจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ด้วยเทเลสโคป แล้วนำสัญญาณที่รับได้มาทำการแยกโพลาไรซ์เซชันเป็น Parallel polarization (p-pol) และ Perpendicular polarization (s-pol) แล้วทำการขยายโดยหลอด PMT ส่งไปยังดิจิตอลออสซิลโลสโคปและไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลต่อไป

เลเซอร์

ตัวกำเนิดแสงเลเซอร์แบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ตามลักษณะของสารเลเซอร์คือ

1. Solid state Lasers เลเซอร์ชนิดนี้มีสารที่ใช้กำเนิดแสงเลเซอร์อยู่ในสถานะของแข็ง เช่น ผลึกรูบี้, YAG, Semiconductor Laser
2. Liquid Lasers เลเซอร์ชนิดนี้มีสารที่ใช้กำเนิดแสงเลเซอร์อยู่ในสถานะของเหลว
3. Gas Lasers เลเซอร์ชนิดนี้มีสารที่ใช้กำเนิดแสงเลเซอร์อยู่ในสถานะก๊าซเช่น CO_2 , He-Ne, Ar, Kr เป็นต้น

แต่ละชนิดจะใช้ผลิตแสงเลเซอร์ที่ความถี่ต่างๆ กันตามคุณสมบัติของสารนั้น ซึ่งมีหลักการทำงานที่คล้ายกันในการผลิตแสงเลเซอร์ โดยปกติองค์ประกอบหลักของระบบเลเซอร์มี 3 อย่างด้วยกันคือ

1. สารตัวกลางเลเซอร์ (Laser medium) เป็นสารที่กำเนิดความถี่ของแสงเลเซอร์ และการเรียกชนิดของเลเซอร์จะนิยมเรียกตามชื่อของสารนี้
2. Optical resonator เป็นระบบทางออปติคซึ่งจะเป็นกระจก 2 บานอยู่ด้านหน้าและด้านหลังของสารตัวกลางเลเซอร์ โดยกระจกหลังจะมีเปอร์เซ็นต์การสะท้อน 99.9% และกระจกหน้าจะมีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนอยู่ระหว่าง 65-95% มีรัศมีความโค้งประมาณ 5-10 เท่าของความยาวของสารตัวกลางเลเซอร์

3. แหล่งจ่ายพลังงาน เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้สารตัวกลางเลเซอร์ เพื่อให้สารเลเซอร์อยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้นและขณะที่กลับสภาวะเดิมจะปลดปล่อยพลังงานออกมาตามค่าที่ต้องการ

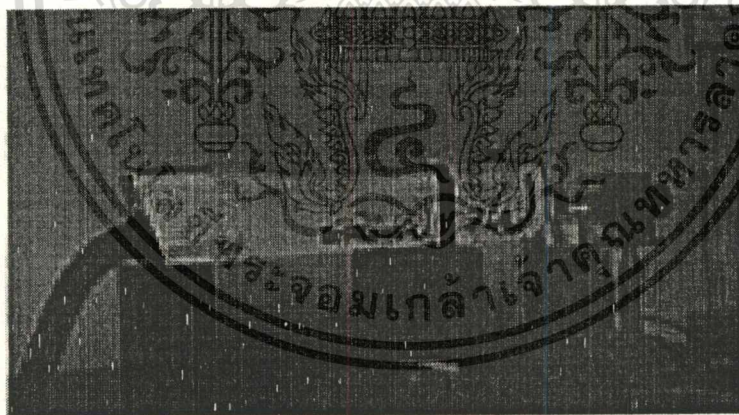
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปจะเรียกว่าการ Pumping ซึ่งแหล่งจ่ายพลังงานนี้อาจมาจากหลอดแฟลช สนามไฟฟ้าจาก สักคาไฟฟ้าแรงสูง การใช้ลำอิเล็กตรอน เป็นต้น

การกำเนิดแสงเลเซอร์มีขั้นตอนดังนี้ เมื่ออะตอมของสารเลเซอร์ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายพลังงาน ทำให้อะตอมที่อยู่ในสถานะพื้นเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้น และเมื่ออยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้นได้ช่วงเวลาหนึ่งแล้ว อิเล็กตรอนจะกลับสู่สถานะพื้นและปลดปล่อยพลังงานออกมาตามความถี่ซึ่งขึ้นอยู่กับสารตัวกลางเลเซอร์ เรียกว่าการเกิด Spontaneous emission โดยพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาในทุกทิศทาง และพลังงานที่อยู่ในแนวของ Optical resonator จะมีการสะท้อนกลับไปมา และมีการให้พลังงานอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการคายพลังงานรวมกับของเดิม เรียกว่าการเกิด Stimulated emission จนกระทั่งความเข้มของพลังงานสูงขึ้นจนสามารถทะลุผ่านกระจกด้านหน้าออกมาเป็นแสงเลเซอร์

ในการทดลองนี้จะใช้ Nd:YAG Laser ในการกำเนิดแสงเลเซอร์ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 2 ที่ความยาวคลื่น 532nm ซึ่งตัวกำเนิดแสงเลเซอร์ที่ใช้งานจริงแสดงได้ดังภาพที่ 34

ภาพที่ 34

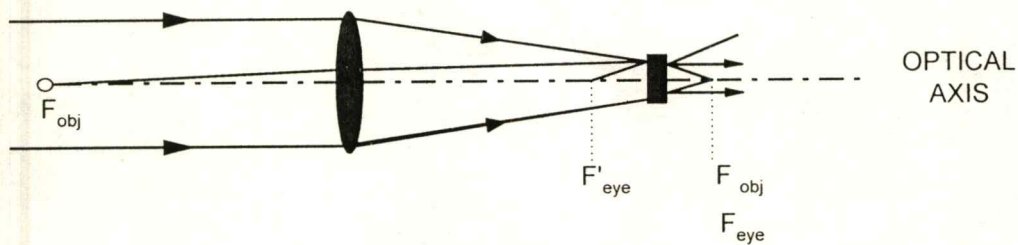


แสดงภาพถ่ายของตัวกำเนิดแสงเลเซอร์

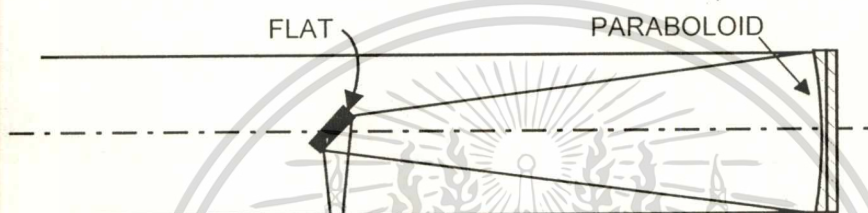
เทเลสโคป

การรับสัญญาณที่แตกกระจายกลับจากฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะใช้เทเลสโคปเป็นตัวรับ ซึ่งเทเลสโคปมีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นกระจกโค้งเว้าอยู่ 2 บาน เพื่อทำการรวมแสงที่เข้าสู่จุดโฟกัส เทเลสโคปสามารถแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะใหญ่ๆ แสดงได้ดังภาพที่ 35 ในการทดลองนี้จะใช้เทเลสโคปแบบ Cassegrain ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม. เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

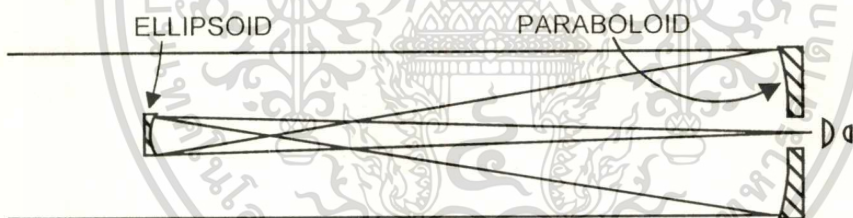
ภาพที่ 35



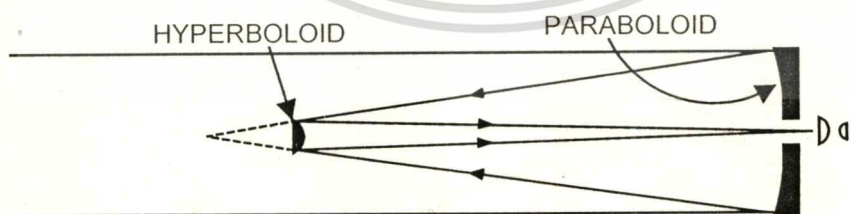
(a) GALILEAN



(b) NEWTONIAN



(c) GREGORIAN

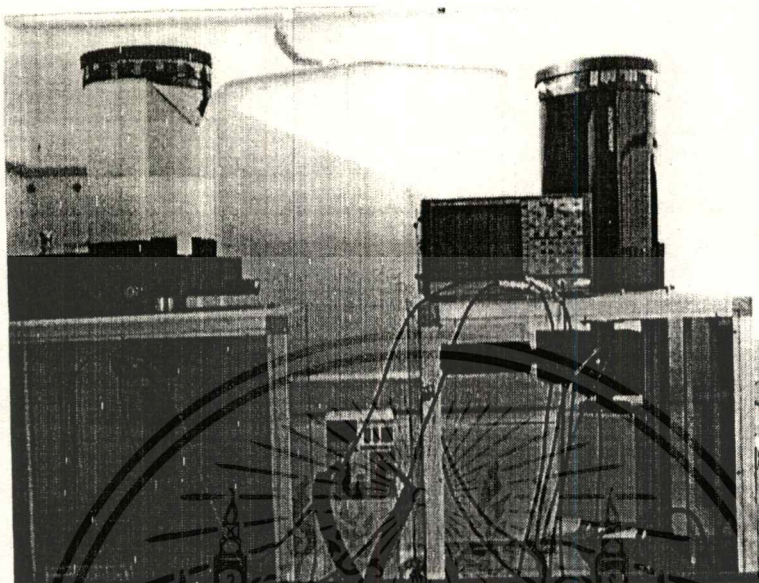


(d) CASSEGRIAN

แสดงชนิดของเทเลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 36

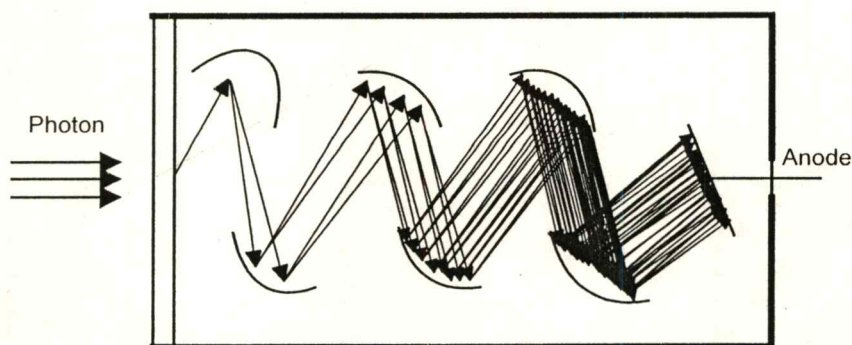


แสดงภาพถ่ายของเทเลสโคป

Photon multiplier tube (PMT)

หลอด PMT ทำหน้าที่เป็นเป็นเซนเซอร์ในการเปลี่ยนพลังงานโฟตอนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยจะรับพลังงานโฟตอนจาก Telescope และหลอด PMT จะทำหน้าที่ขยายอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากแอโนดเนื่องจากได้รับพลังงานจากโฟตอนที่เข้ามาชน โดยมีลักษณะการทำงานดังภาพที่ 37

ภาพที่ 37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีการทำงานที่จริงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของหลอด PMT จะใช้แรงดันค่าต่างๆ ที่เป็นสัดส่วนต่อเข้าที่ Node ต่างๆ เมื่อโฟตอนเข้ามาจะมีการขยายเพิ่มขึ้นเป็นช่วงๆ ทำให้ได้พลังงานโฟตอนที่เข้ามา แล้วเปลี่ยนรูปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า

ในการทดลองนี้จะใช้หลอด PMT 2 ตัว เพื่อใช้กับสัญญาณ 2 Polarization คือ Parallel polarization (p-pol) และ Perpendicular polarization (s-pol) ซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน

ภาพที่ 38

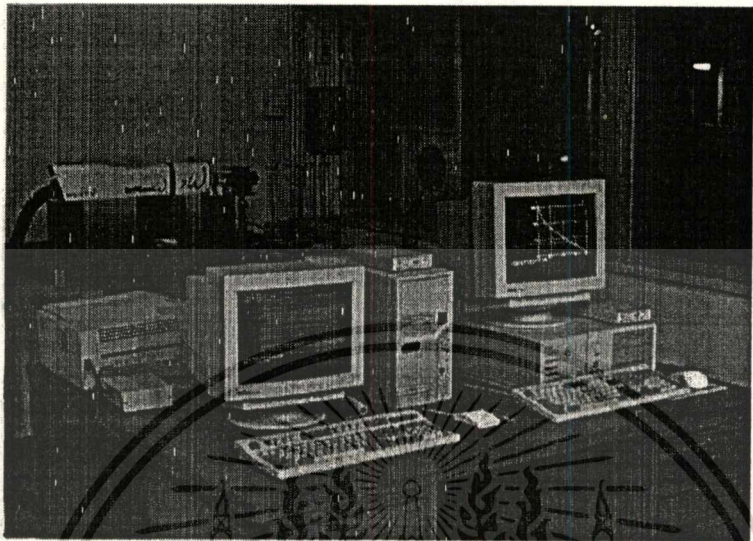


แสดงภาพถ่ายของหลอด PMT

Discriminator

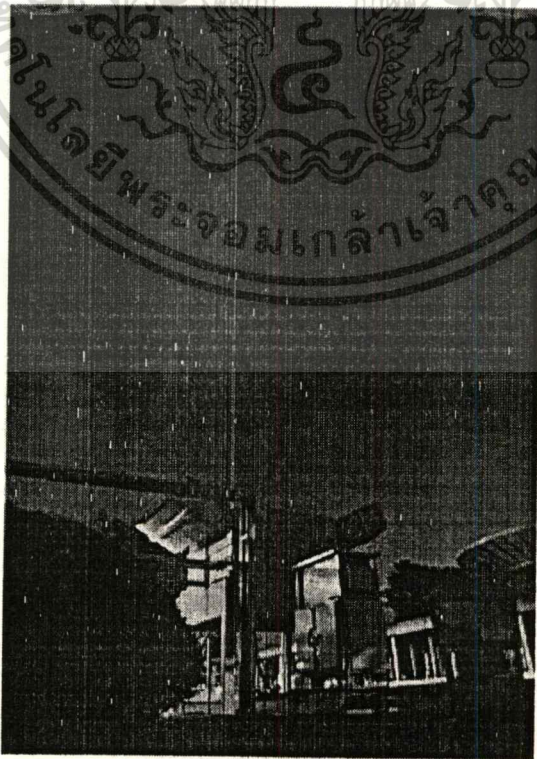
หลังจากผ่านการขยายโดยหลอด PMT แล้ว สัญญาณที่ได้จะนำมาทำการ Discriminator จะได้เอาต์พุตออกเป็นพัลส์ตามสัญญาณที่เข้ามาเกินระดับตรวจสอบที่ตั้งไว้ โดย Discriminator เป็นของ Lecroy 9310

ภาพที่ 39



แสดงภาพถ่ายภายในห้องที่ทำการทดลอง

ภาพที่ 40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MCA & PC

ส่วนสุดท้ายคือ สัญญาณพัลส์ที่ออกจาก Discriminator แล้วเข้าสู่ส่วน Counter เพื่อทำการนับตั้งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 5 โดยการนับจำนวนพัลส์ในแต่ละช่วงเวลาจะใช้การ์ด MCA ที่จะทำการเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ และเก็บข้อมูลต่างๆ ลงในแฟ้มข้อมูล และนำไปประมวลผลต่อไป

รายละเอียดทางเทคนิคของระบบ

ตารางที่ 5
รายละเอียดทางเทคนิคของระบบ LIDAR

Transmitter	
Laser	Nd:YAG
Wavelength	0.532μm (Second hamonic)
Output power	180mJ/p
Repetition frequency	10Hz
Transmission beam expansion	0.47mrad
Receiver	
Telescope type	Schmit Cassegrian
Telescope diameter	300mm
Detector	PMT
Outdoor roof	Swing roof
Size	2.5×2.5m
Data reduction	
Digital oscilloscope	
Personal computer	

บทที่ 7

การทดลองและผลการทดลอง

กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงลำดับขั้นตอนการทดลองของการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และผลที่ได้รับจากการทดลอง

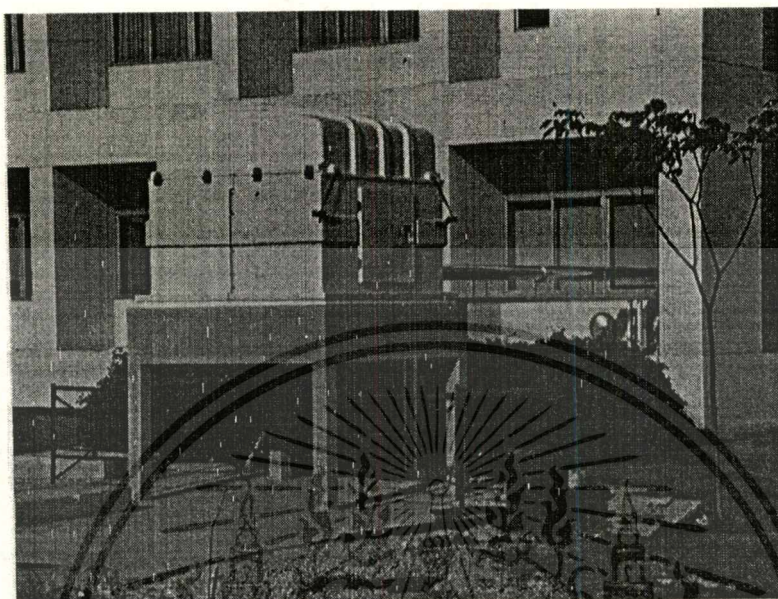
ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองการประยุกต์ใช้งานของ LIDAR เพื่อการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนั้น ได้ทำการติดตั้งทดลองบริเวณอาคารสมเด็จพระเทพฯ โดยสถานีส่งจะอยู่ภายในอาคาร และสถานีรับจะอยู่ภายนอกอาคารดังแสดงในภาพที่ 41 การทดลองจะกระทำการทดลองเฉพาะในช่วงเวลากลางคืนเท่านั้น ส่วนในช่วงเวลากลางวันนั้นไม่สามารถทำการทดลองได้ เพราะในช่วงเวลากลางวันสัญญาณที่รับได้จากการแตกกระจายกลับจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ด้วยเทเลสโคปจะมาจากแสงอาทิตย์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งไม่สามารถแยกความแตกต่างของแสงได้ และหากจะทำการทดลองให้ได้ผลดีนั้น ท้องฟ้าเหนือบริเวณนั้นควรปลอดโปร่งไม่มีเมฆบังเพราะจะทำให้สัญญาณที่รับได้ถูกคลุกกลืนด้วยก้อนเมฆบางส่วน แต่ทำให้รู้วาระดับความสูงของก้อนเมฆมีความสูงเท่าไร

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการเดินเครื่องเลเซอร์ในตอนเย็นหลังจากดวงอาทิตย์ตกแล้ว โดย Nd:YAG laser จะทำการผลิตแสงเลเซอร์ซึ่งมีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร แล้วนำมาขยายลำบีมโดย Laser beam expander ส่งต่อไปสะท้อนกระจกขึ้นไปยังชั้นบรรยากาศในแนวตั้งฉากกับพื้นดิน ซึ่งจะต้องทำการปรับกระจกสะท้อนแสงให้แนวของลำแสงเลเซอร์ตั้งฉากกับพื้นดินจริงๆ โดยจะทำการปรับแต่งทุกครั้งของการทดลอง และลำบีมของเลเซอร์กับเทเลสโคปจะต้องซ้อนทับกันดังภาพที่ 42 เพื่อสามารถรับสัญญาณได้ตลอดช่วงความสูงใดๆ และเมื่อต้องการให้ลำบีมซ้อนทับกันมากที่สุดในการติดตั้งจะต้องให้เทเลสโคปอยู่ใกล้กับแนวลำบีมของเลเซอร์ให้มากที่สุด

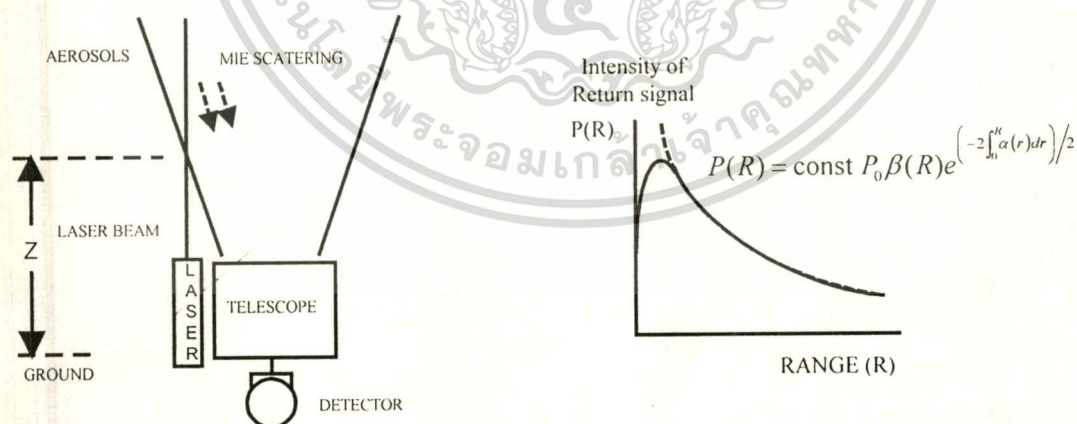
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 41



แสดงสถานีส่ง-รับบริเวณอาคารสมเด็จพระเทพฯ

ภาพที่ 42



แสดงลำบีมที่เกิดการซ้อนทับกัน

จากรูปที่ 42 จะเห็นว่าจุดที่ลำบีมของเลเซอร์กับเทเลสโคปเริ่มต้นซ้อนทับกันคือจุด z ดังนั้นเราสามารถรับสัญญาณได้ที่ความสูง z ขึ้นไปจากพื้นดินโดยความแรงของสัญญาณจะค่อยๆ ลดลงที่ความสูงเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อไปคือทำการ Run โปรแกรม LE93AT3.EXE พร้อมป้อนข้อมูล Average number ว่าต้องการที่ซัดต่อ 1 ครั้งของการบันทึกเพิ่มข้อมูล, ต้องการบันทึกทั้งหมดกี่ครั้งดังตัวอย่างใน ภาพที่ 43

ภาพที่ 43

C:\LECROY>LE93AT3

Input average number

0=>100, 1=>200, 2=>500, 3=>1000, 4=>2000, 5=>3000, 6=>5000, 7=>10000 shots

10, 20, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 sec

number = 1

number of records = 100

number / factor = 1

แสดงตัวอย่างการ Run โปรแกรม LE93AT3.EXE

จากภาพที่ 43 เป็นการเลือกค่า Average number เท่ากับ 1 นั่นคือ ในแต่ละครั้งของการเก็บข้อมูลเป็นเพิ่มข้อมูลจะต้องใช้พัลส์ของเลเซอร์เท่ากับ 200 ซัด และจะทำการบันทึกข้อมูลทั้งหมด 100 เพิ่มข้อมูลในแต่ละโพลาริเซชัน โดยแต่ละเพิ่มข้อมูลจะต้องใช้เวลาเท่ากับ 20 วินาที จากนั้นระบบจะทำการเก็บบันทึกข้อมูลลงในเพิ่มข้อมูลตามการทำงานที่ได้เขียนอธิบายไว้ในภาพแผนผังการทำงานของโปรแกรมในบทที่ 5 จะได้เพิ่มข้อมูลที่มีชื่อ Head file ตามที่กำหนดและตามด้วย de, df, e0, f0, e1, f1, e2, f2, ... , e99, f99 ตามลำดับ พร้อมแสดงผลบนจอภาพเป็น Profiles ของฝุ่นละออง ณ ความสูงต่างๆ จากพื้นดิน

หากต้องการนำข้อมูลที่เก็บบันทึกไว้มาแสดงผลบนจอภาพใหม่ ก็สามารถทำได้โดยการ Run โปรแกรม LE93AT3R.EXE ซึ่งมีการทำงานที่ได้เขียนอธิบายไว้ในภาพแผนผังการทำงานของโปรแกรมในบทที่ 5 ดังตัวอย่างในภาพที่ 44

ภาพที่ 44

C:\LECROY>LE93AT3R

Le93 file head (ex. LC2) = c:\lecroy\data96\feb10\tl0112

number of records = 100

number / factor = 1

display range (km) = 15

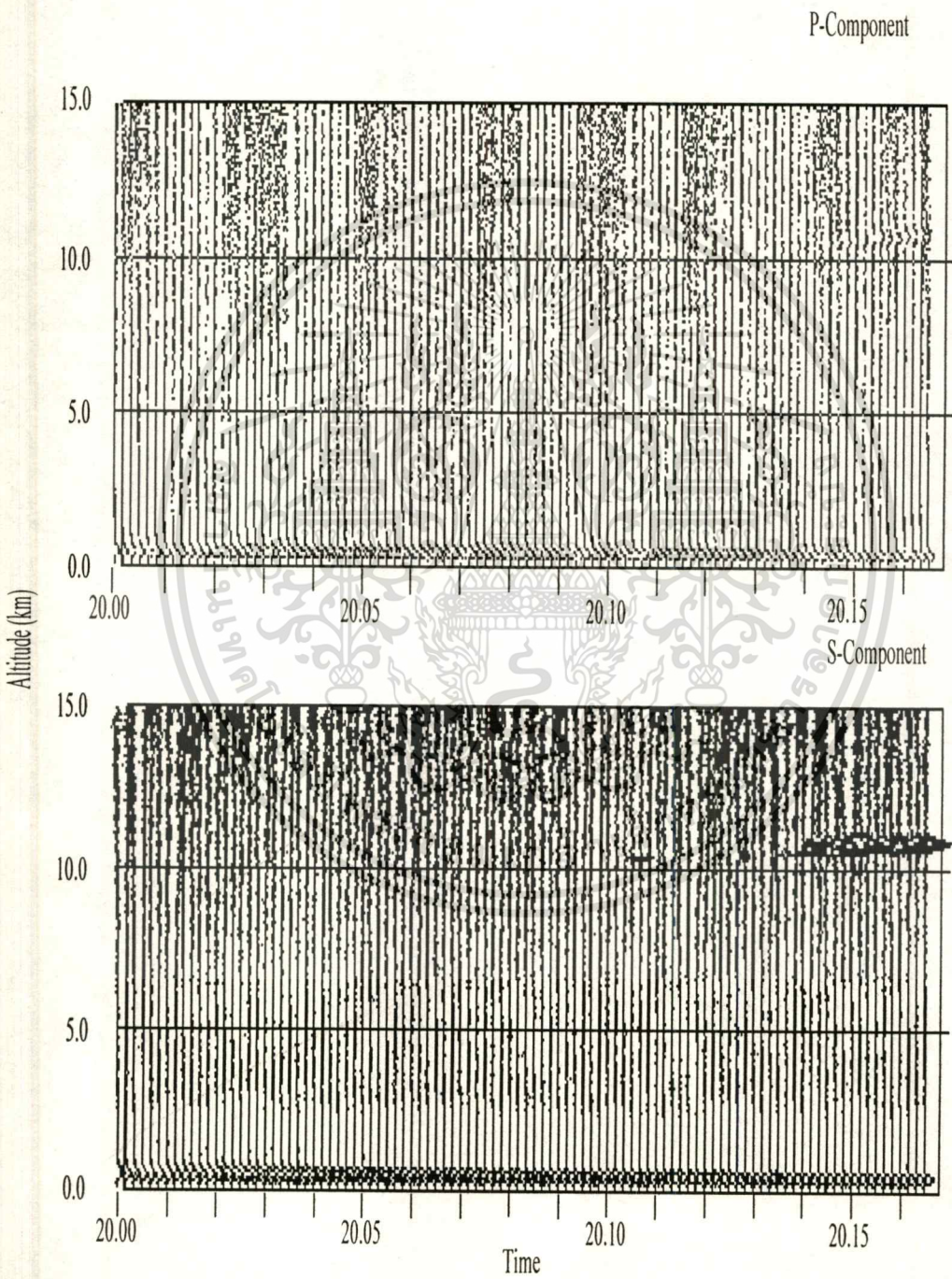
จากนั้นเครื่องคอมพิวเตอร์ก็จะทำการอ่านเพิ่มข้อมูลมาทำการแสดงผลใหม่บนจอภาพดังที่ได้แสดงไว้ในผลการทดลองซึ่งอยู่ในหัวข้อถัดไป

ผลการทดลอง

ภาพผลการทดลองของงานวิจัยที่แสดงให้เห็นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการประมวลผลข้อมูลจากดิจิตอลออสซิลโลสโคปด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นสัญญาณที่รับได้จากเทเลสโคป มีความยาว คลื่น 532 นาโนเมตร เป็นการสังเกตชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ เริ่มตั้งแต่เวลาประมาณ 20.00 น. เป็นต้นไป ซึ่งเป็นผลการทดลองในช่วงเวลาประมาณเกือบ 1 ปี โดยการอ่านค่าจาก Profiles นั้น ในแกนตั้งแสดงความสูงจากพื้นดินมีสองระยะคือ 0-15 กิโลเมตร ส่วนแกนนอนจะเป็นเวลาโดยเริ่มต้นประมาณ 20.00 น. โดยแกนเวลาเพิ่มขึ้นครั้งละเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับทางเลือก Average number เช่น ถ้าเลือก Average number = 100 จะใช้เวลาในการพล็อตต่อเส้นเท่ากับ 10 วินาที หรือถ้าเลือก Average number = 200 จะใช้เวลาในการพล็อตต่อเส้นเท่ากับ 20 วินาที เป็นต้น และในการพล็อตกราฟใน Profiles นั้น จะทำการพล็อตทั้ง 2 โพลาไรเซชัน คือ P-pol และ S-pol เปรียบเทียบกัน หากกราฟที่ได้ออกมาเป็นเส้นตรงที่ความสูงค่าใด แสดงว่าที่ความสูงนั้นๆ ไม่มีฝุ่นละอองอยู่หรือมีก็น้อยมาก แต่หากกราฟที่ได้ออกมาเป็นเส้นโค้งที่ความสูงค่าใด แสดงว่าที่ความสูงนั้นๆ มีฝุ่นละอองอยู่มากตามสัดส่วนของความโค้งนั้น ดังแสดงในภาพที่ 45 ถึง 52

1. ผลการทดลองเมื่อวันที่ 2 กันยายน 2538 โดยการกำหนดให้ Average number = 100, number of records = 100, number / factor = 1 และ filehead = tl0209 จะได้ Profiles ของฝุ่นละออง ดังแสดงในภาพต่อไปนี้

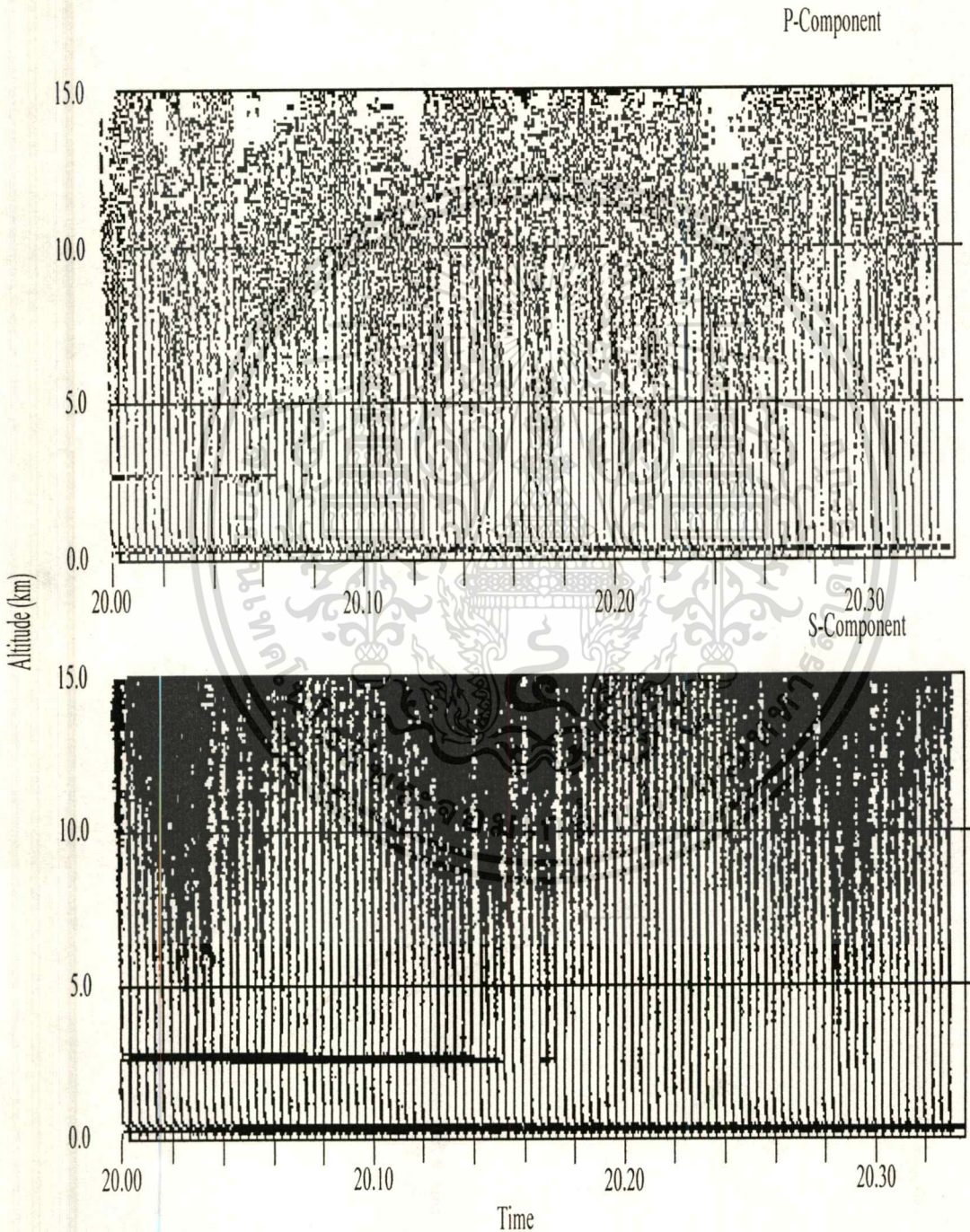
ภาพที่ 45



แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 2 กันยายน 2538
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลการทดลองเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2538 โดยการกำหนดให้ Average number = 200, number of records = 100, number / factor = 1 และ filehead = tl1010 จะได้ Profiles ของฝุ่นละออง ดังแสดงในภาพต่อไปนี้

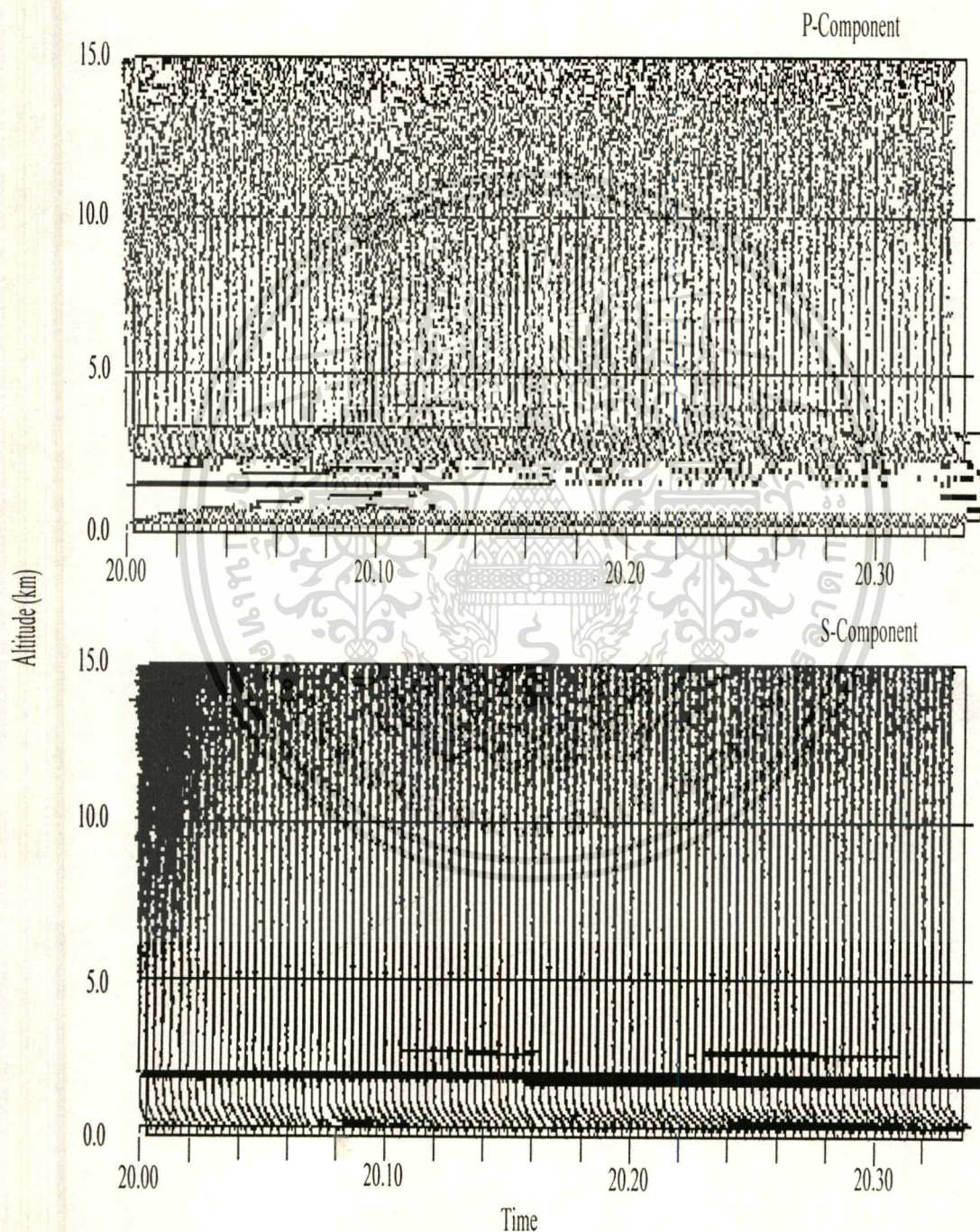
ภาพที่ 46



แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2538
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการทดลองเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน 2538 โดยการกำหนดให้ Average number = 200, number of records = 100, number / factor = 1 และ filehead = tl1511 จะได้ Profiles ของฝุ่นละออง ดังแสดงในภาพต่อไปนี้

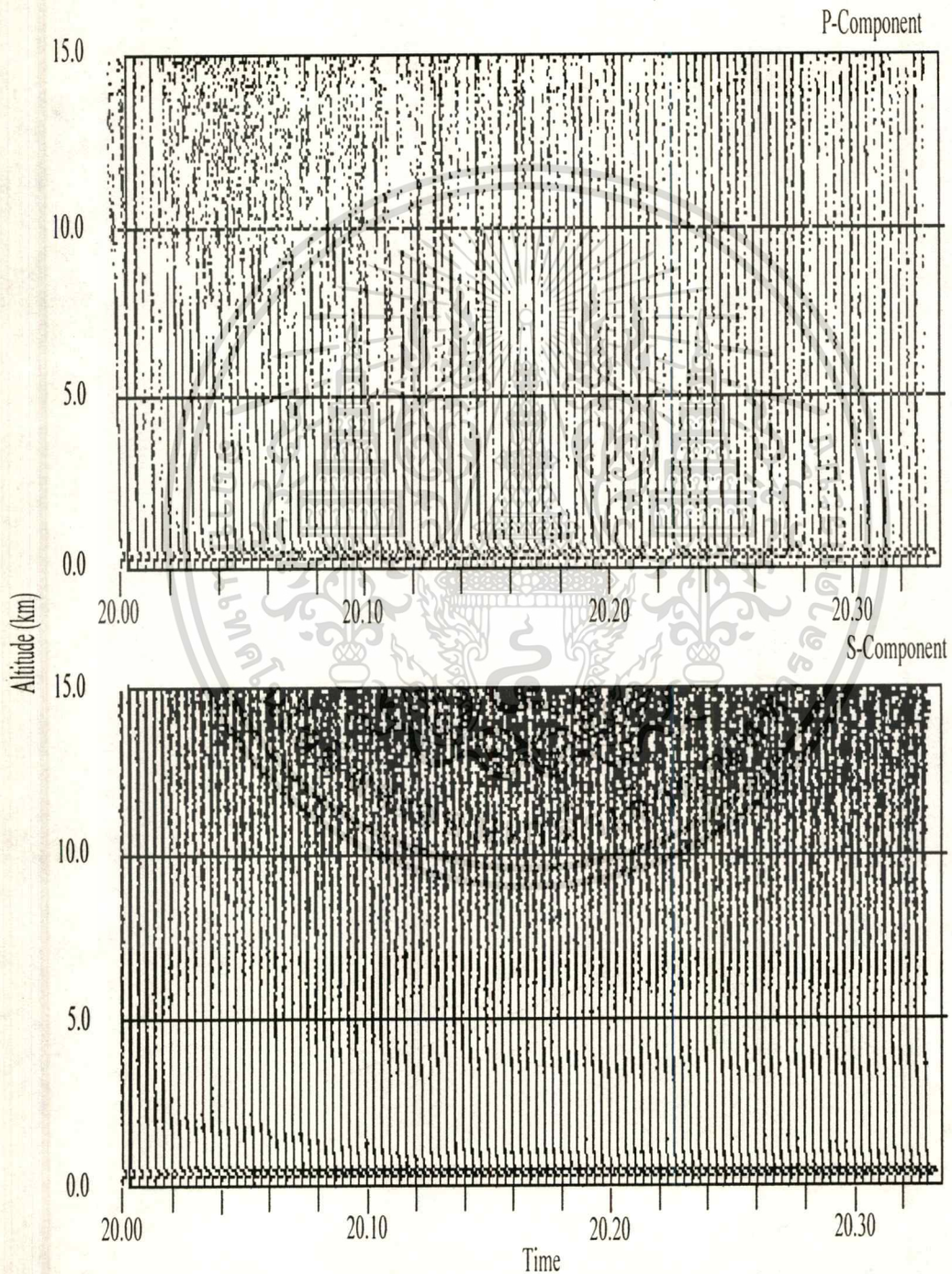
ภาพที่ 47



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลการทดลองเมื่อวันที่ 21 ธันวาคม 2538 โดยการกำหนดให้ Average number = 200, number of records = 100, number / factor = 1 และ filehead = tl2112 จะได้ Profiles ของฝุ่นละออง ดังแสดงในภาพต่อไปนี้

ภาพที่ 48



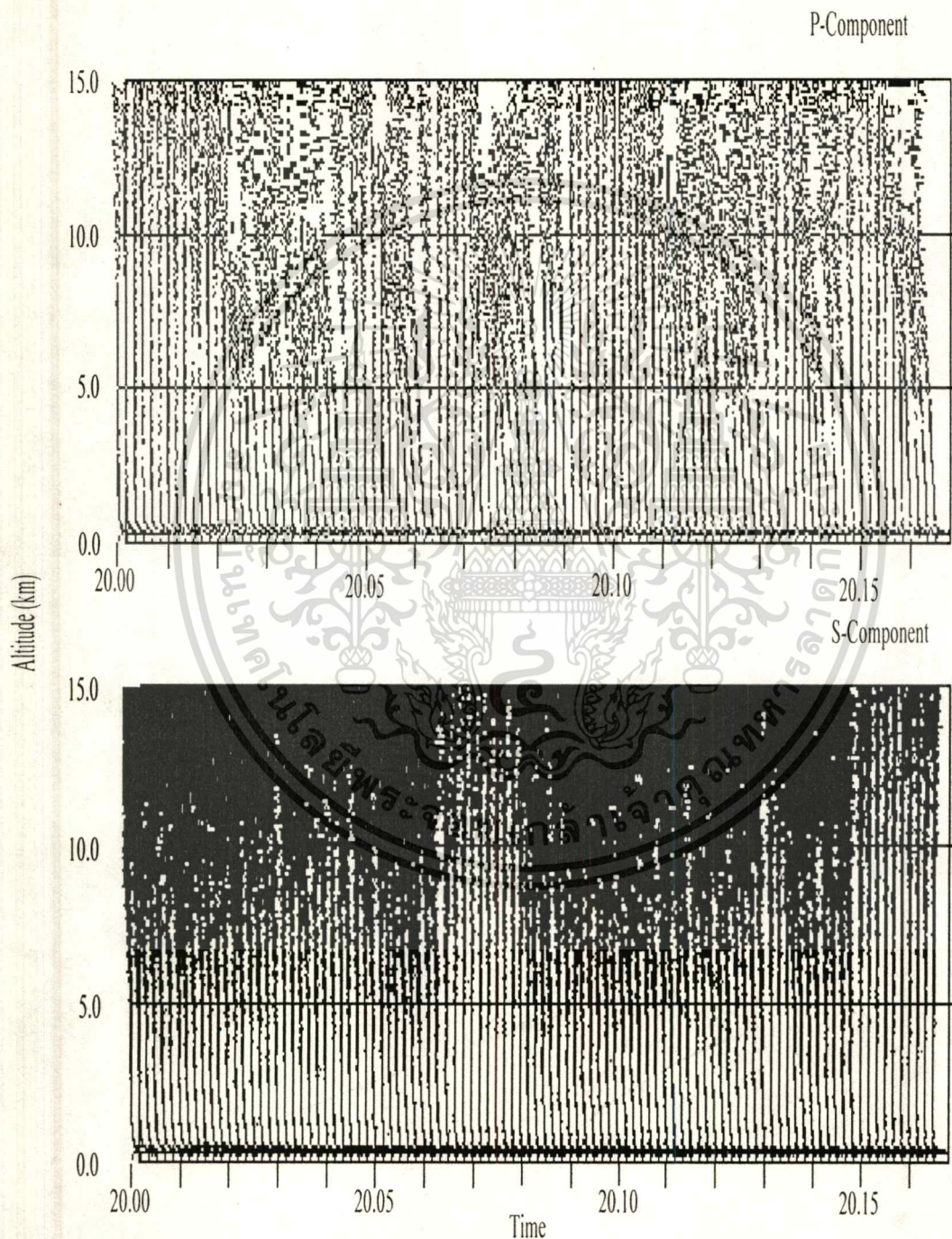
แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 21 ธันวาคม 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงงานเวลาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ผลการทดลองเมื่อวันที่ 11 มกราคม 2539 โดยการกำหนดให้ Average number = 100, number of records = 100, number / factor = 1 และ filehead = tl1101 จะได้ Profiles ของฝุ่นละออง ดังแสดงในภาพต่อไปนี้

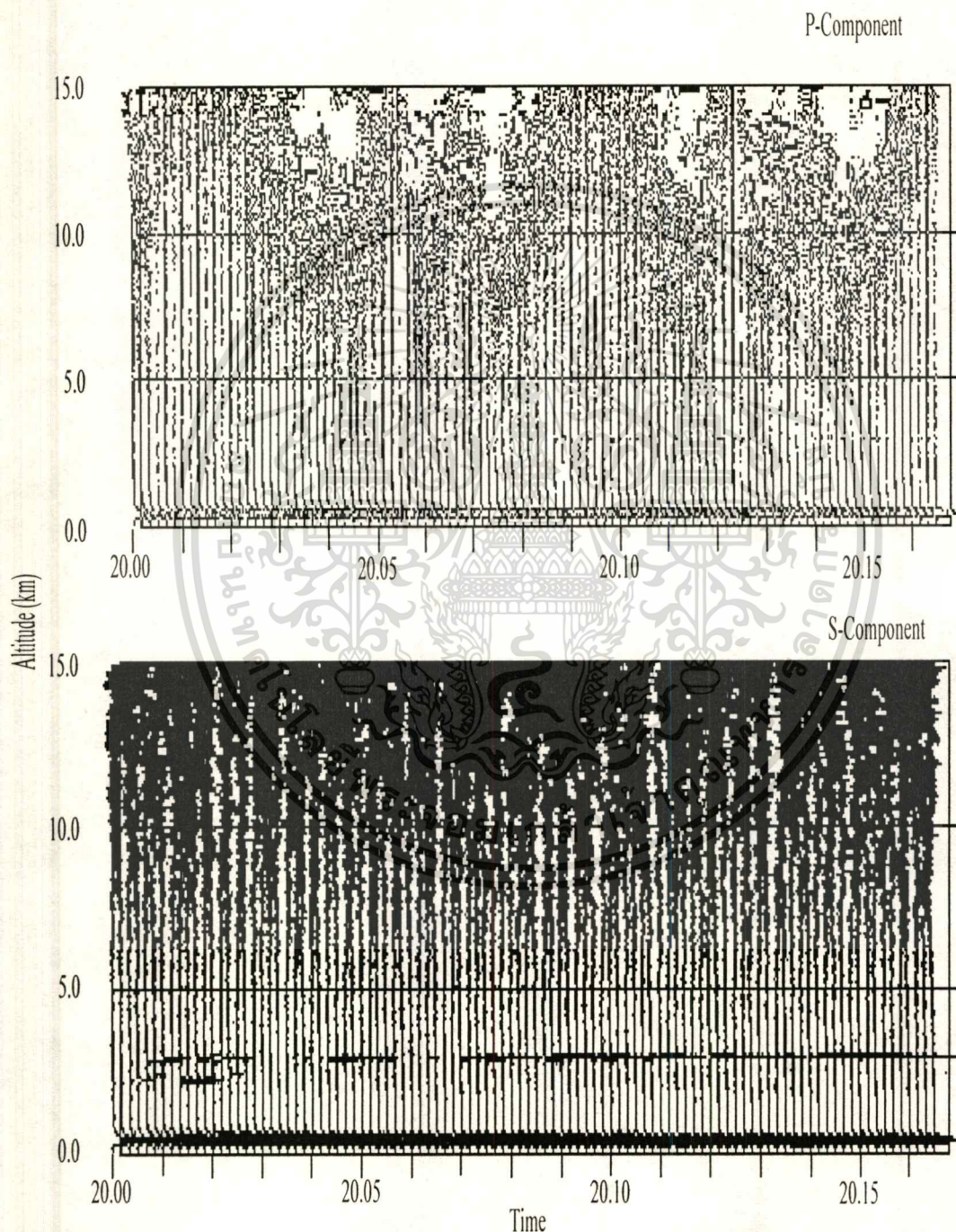
ภาพที่ 49



แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 11 มกราคม 2539
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ผลการทดลองเมื่อวันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2539 โดยการกำหนดให้ Average number = 100, number of records = 100, number / factor = 1 และ filehead = tl1602 จะได้ Profiles ของฝุ่นละออง ดังแสดงในภาพต่อไปนี้

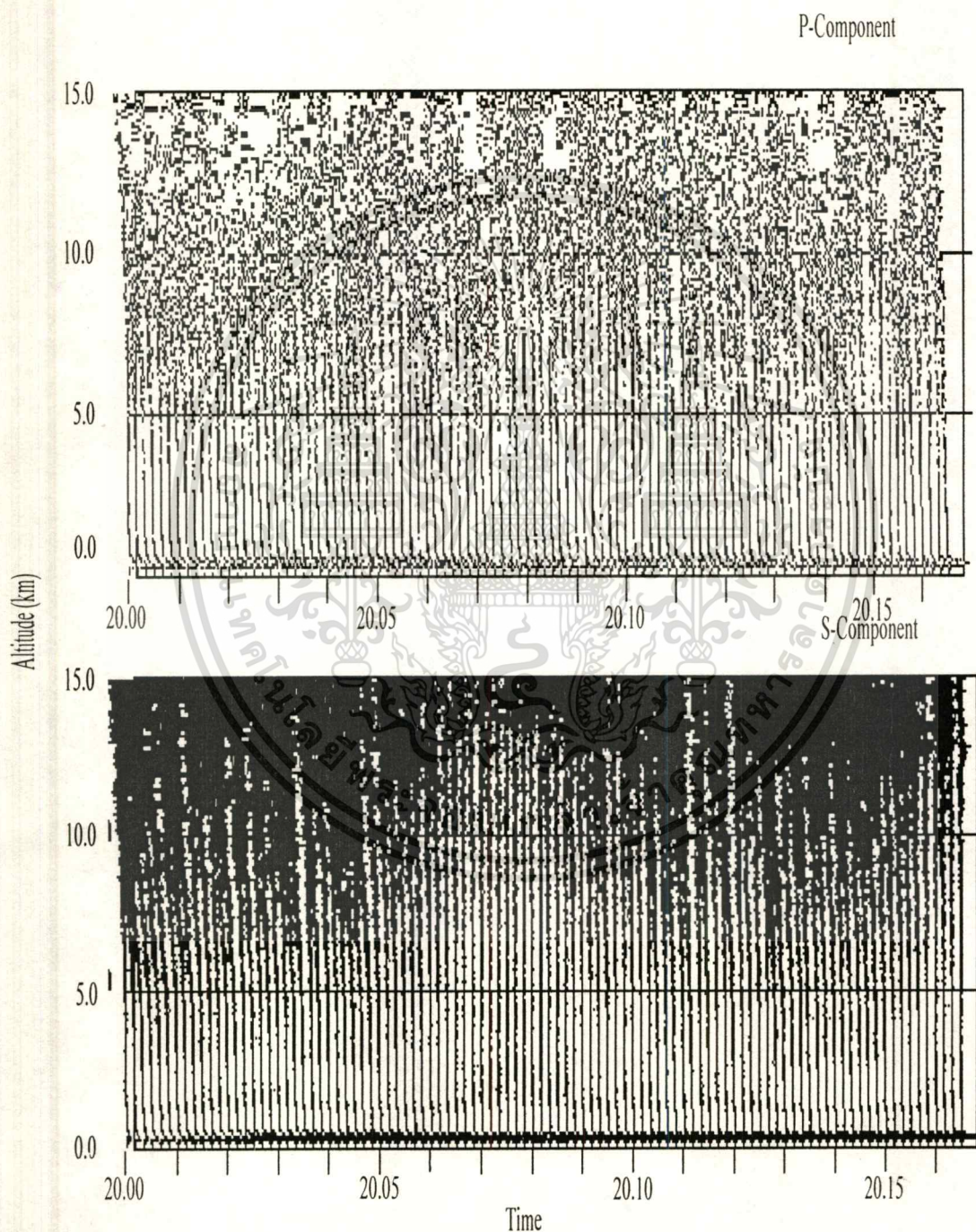
ภาพที่ 50



แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2539
เอกสารนี้เป็นเอกสารทสว.ส่วนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ผลการทดลองเมื่อวันที่ 25 มีนาคม 2539 โดยการกำหนดให้ Average number = 100, number of records = 100, number / factor = 1 และ filehead = tl2503 จะได้ Profiles ของฝุ่นละออง ดังแสดงในภาพต่อไปนี้

ภาพที่ 51

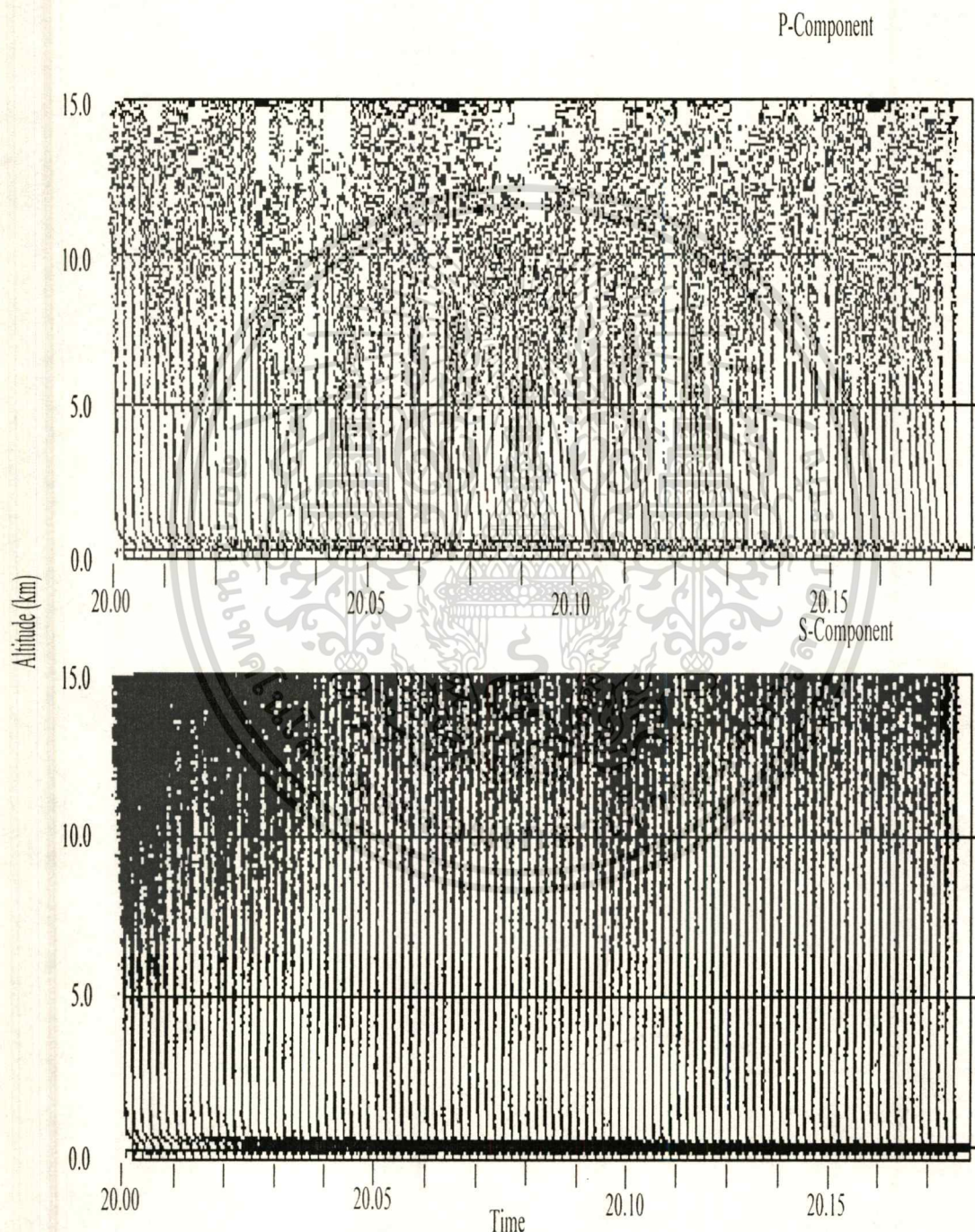


แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 25 มีนาคม 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ผลการทดลองเมื่อวันที่ 29 เมษายน 2539 โดยการกำหนดให้ Average number = 100, number of records = 100, number / factor = 1 และ filehead = tl2904 จะได้ Profiles ของฝุ่นละออง ดังแสดงในภาพต่อไปนี้

ภาพที่ 52



แสดง Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศเมื่อวันที่ 29 เมษายน 2539
เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

การเก็บข้อมูลเพื่อแสดงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เริ่มทำการเก็บข้อมูลเมื่อเดือนกันยายน พ.ศ.2538 จนถึง เดือนเมษายน พ.ศ.2539 ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 45 ถึงภาพที่ 52 โดยนำข้อมูลมาแสดงผลให้เห็นเพียงบางส่วนของผลการทดลองเท่านั้น ผลการทดลองที่ได้นี้เป็นการตรวจสอบปริมาณของฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ซึ่งมีความสูงจากพื้นดินประมาณ 15 กิโลเมตร [3]

ในช่วงเดือนกันยายนซึ่งเป็นเดือนแรกที่ทำกรเก็บข้อมูลนั้นเป็นช่วงฤดูฝนและมีพายุเข้าสู่ประเทศไทยอย่างหนักและต่อเนื่อง อันเป็นผลทำให้เกิดอุปสรรคในการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล เพราะไม่สามารถทำการทดลองในขณะที่มีฝนตกและมีเมฆปกคลุมท้องฟ้าบริเวณนั้นมากได้ โดยจะสังเกตได้จากผลการทดลองในภาพที่ 46 ในช่วงเวลาแรกๆ ของการทดลองจะมีกลุ่มเมฆปกคลุมอยู่ที่ความสูงประมาณ 3 กิโลเมตร ส่วนในช่วงเวลาประมาณ 21.30 น. ของการทดลองกลุ่มเมฆกลุ่มนั้นได้เคลื่อนตัวออกจากบริเวณที่ทำการทดลองไปแล้วจึงได้รับผลการทดลองซึ่งแสดงแต่เพียงฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ณ ความสูงต่างๆ ดังภาพที่ 46

ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่เดือนธันวาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ของการทดลองนั้นอยู่ในช่วงฤดูหนาว สังเกตผลการทดลองจะพบว่าปริมาณของฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะมีอยู่เป็นจำนวนมากดังภาพที่ 48 ถึง ภาพที่ 50 ทั้งนี้เพราะช่วงฤดูหนาวไม่มีฝนตก เพื่อช่วยในการชะล้างฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จึงทำให้ปริมาณของละอองที่ฟุ้งกระจายอยู่เหนือพื้นดินถูกลมพัดพาสูงขึ้นไปยังชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ จึงได้ผลการตรวจสอบปริมาณของฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์กระจายอยู่เป็นจำนวนมากที่ความสูงประมาณ 7 กิโลเมตรขึ้นไป

ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ปลายเดือนมีนาคมจะเข้าสู่ช่วงฤดูร้อน สังเกตผลการทดลองจะพบว่าปริมาณของฝุ่นละอองที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ มีปริมาณใกล้เคียงกันกับช่วงฤดูหนาวโดยสังเกตได้จากภาพที่ 51 ถึงภาพที่ 52

อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นเพียงผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้ LIDAR เพื่อใช้ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ซึ่งการวัดนี้จะให้ผลการทดลองออกมาเป็น Profiles ของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ณ ความสูงต่างๆ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบอัตราส่วนของปริมาณฝุ่นละอองที่ความสูงต่างๆ กัน เพื่อเป็นการตรวจสอบสภาพแวดล้อมที่ห่อหุ้มโลกบริเวณที่ทำการวัดว่ามีสภาพเช่นใดและมีผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่ต่างๆ อย่างไร

แนวทางการพัฒนา

ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์โดยใช้ LIDAR นั้นสามารถกระทำการทดลองวัดได้ ณ สถานที่ตั้งเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้นอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการทดลองนั้นมีจำนวนมากและจะต้องใช้ความถูกต้องแม่นยำในการติดตั้งระบบ อีกทั้งระบบมีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดปริมาณวัตถุชนิดอื่น จึงทำให้ได้ผลการทดลอง ณ สถานที่เดียว ในการปรับปรุงเพื่อพัฒนาระบบ อาจติดตั้งระบบทั้งหมดนี้ภายในรถยนต์เพื่อสามารถเคลื่อนที่ไปทำการทดลองวัด ณ ตำแหน่งอื่นๆ ได้อีกด้วย

บรรณานุกรม

- [1] บัณฑิต พกษามาธานันท์ “เรดาร์ : Radar” วารสารทางวิชาการสื่อสารโทรคมนาคม. ปีที่ 1, ฉบับที่ 2 (ตุลาคม 2536) : 125-143.
- [2] มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช. เอกสารการสอน ชุดวิชาวิทยาศาสตร์ 4 นนทบุรี : มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช, 2527.
- [3] สมเกียรติ ฤกษ์วัลบุญ, พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์, กอบชัยเดชหาญ, อภินันท์ มัณยานนท์ “การใช้Nd:YAG Laser ในการหาระดับความสูง และความหนาของ Tropopause โดยเทคนิคของออฟติคอลลีโมเทนซิ่ง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18, พฤศจิกายน 2538 : 229-233
- [4] American Chemical Society. Cleaning Our Environment The Chemical Basic for Action. Washington D.C., 1996.
- [5] B. J. Finlayson-Pitts and J. N. Pitts, Jr. Atmospheric Chemistry : Fundamental and Experimental Techniques. John Wiley & Sons, 1993.
- [6] Carlson, A. Bruce. Communication Systems. New York : McGraw-Hill, 1986
- [7] Jelaian, Albert V. Laser Radar Systems. London : Artech House, 1992.
- [8] Kobayashi, Takao. Techniques for Laser Remote Sensing of the Environment. Great Britain : Harwood Academic Publishers GmbH, 1987.
- [9] Miller, Albert. Meteorology 3rd ed. Columbus : Charles Merrill Publishing Company. A Bell & Howell Company, 1976.
- [10] Raymond, M. Measures. Laser Remote Sensing. New York : John Wiley & Sons, 1983.
- [11] Skolnik, I. Merrill. Introduction to Radar System. 2nd New York : McGraw-Hill, 1980.
- [12] T. G. Kyle. Atmospheric Transmission, Emission and Scattering. Pergamon Press, 1991
- [13] Williamson, Samuel J. Fundamentals of Air Pollution. U.S.A.: Addison-Wesley, 1973



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้ในการเก็บบันทึกและแสดงผลข้อมูล

```

/*****
/*          LIDAR DC observation program with LeCroy 9310          */
*****/

#include <stdio.h>

#include <stdlib.h>

#include <string.h>

#include <conio.h>

#include <math.h>

#include "decl.h"          /* AT-GPIB header file */

#include <graphics.h>

void main(void);

void mesr(void);

void grphe(void);

void grphl(void);

void gpiberr(char *msg);

int nqs;

int rps;

int i, j, k, sp, datanum;

int z, xi, yi, xe, ye, ya, yb;

double mz[1024], h, zi, ze;

double mro[1024], x, f;

float fac;

char fh[20], clf[100];

int bufa[2000+11+10], bufb[2000+11+10];

char tadata[2024], dsca[22+346+1], dscb[22+346+1];

int avn, wtn;

char mswp[10][10]={ "100", "200", "500", "1000", "2000", "3000", "5000", "10000"};

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

char rc1[50]="TA:DEF EQN,'AVGS(C1)',MAXPTS,2000,SWEEPS,";
char rc2[50]="TB:DEF EQN,'AVGS(C2)',MAXPTS,2000,SWEEPS,";
char fi[20], *fn, *fm, ff[10], *pf;
char *fg, *eg;
const int LE93GPADD=3;
int le93;
char stb;
int inr;
char dummy[101];

void main(void){
    printf(" input average number \n ");
    printf("0=>100,1=>200,2=>500,3=>1000,4=>2000,5=>3000,6=>5000,7=>10000 shots \n");
    printf(" 10, 20, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 sec \n");
    printf(" number = ");
    scanf("%d",&avn);
    printf(" number of records = ");
    scanf("%d",&nos);
    printf(" number / factor = ");
    scanf("%f",&fac);
    printf(" file head = ");
    scanf("%s",fh);
    mesr();
}

void mesr(void)
{
    FILE *fp,*ep;
    long int len, lem;
    unsigned int len_work;
    char intst[20];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

unsigned int lst;

int g_driv=DETECT,g_mode,ik;

le93=ibdev(0,LE93GPADD,0,T3s,1,0);

if (ibsta & ERR) gpiberr("ibdev error");

ibclr(le93);

ibwrt(le93,"ACAL OFF\n",9L);          /* auto calibration off */

ibwrt(le93,"C1:TRA OFF\n",11L);       /* trace channel 1 off */

ibwrt(le93,"C2:TRA OFF\n",11L);       /* trace channel 2 off */

ibwrt(le93,"TA:TRA ON\n",10L);         /* trace function E on */

ibwrt(le93,"TB:TRA ON\n",10L);         /* trace function F on */

ibwrt(le93,"TDIV 20US\n",10L);         /* time/div set to 20us/div */

ibwrt(le93,"ILVD OFF\n",9L);           /* interleaved sampling off */

ibwrt(le93,"TRDL 0.00PCT\n",13L);      /* trigger delay set to 0 */

ibwrt(le93,"CFMT DEF9,WORD,BIN\n",19L); /* trans Binary WORD */

ibwrt(le93,"CORD LO\n",8L);            /* trans Low Byte first */

ibwrt(le93,"TRMD STOP\n",10L);         /* set trigger mode stop */

ibwrt(le93,"WFSU SP,1,NP,2000,FP,0\n",23L); /* set wave form */

ibwrt(le93,"TA:SEL\n",7L);             /* select display trace A */

strcpy(fi,mswp[avn]);

fg=strcat(rc1,fi);

fg=strcat(rc1,"\n");

len=(long)strlen(fg);

ibwrt(le93,rc1,len);    /* set avr mode to function A */

                        /* summed average */

                        /* maxpoints 2000 */

                        /* source channel 1 */

                        /* set max num of sweep(shots) */

ibwrt(le93,"TB:SEL\n",7L);    /* select display trace func. B */

strcpy(fi,mswp[avn]);

```

```

fg=strcat(rc2,"\n");
len=(long)strlen(fg);
ibwrt(le93,rc2,len);    /* set avr mode to function B */

/* summed average */

/* maxpoints 2000 */

/* source channel 2 */

/* set max num of sweep(shots) */

ibwrt( le93,"*SRE 129\n",9L); /* SRE register set */
ibwrt( le93,"INE 768\n",8L); /* internal state enable reg. set */
ibwrt( le93,"*CLS",5L);      /* clear all the status registers */
i=ibrsp(le93, &stb);         /* serial poll */
printf(" i= %X initial stb(spoll)= %X \n",i,stb);
initgraph(&g_driv,&g_mode,"c:\\borlandc\\bgi");
setviewport(0,0,639,399,0);
cleardevice();
setcolor(7);
setlinestyle(SOLID_LINE,0,NORM_WIDTH);
rectangle(100, 39,600,191);
rectangle(100,199,600,351);
for(ik=0;ik<2;ik++)
{
    line(95, 90+ik*50,605, 90+ik*50);
    line(95,250+ik*50,605,250+ik*50);
}
for(ik=0;ik<2;ik++)
{
    gotoxy(8,6+ik*10);
    printf("10km");
    gotoxy(8,9+ik*10);
    printf(" 5km");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

gotoxy(1,23);

ibwrt(le93,"TA:WF? DESC\n",12L);    /* read TA descriptor */

lem = sizeof dsca;

ibrd(le93, dsca,lem);    /* input descriptor of TA */

ibwrt(le93,"TB:WF? DESC\n",12L);    /* read TB descriptor */

lem = sizeof dsca;

ibrd( le93, dsca,lem);    /* input descriptor of function F */

strcpy(fi,fh);

fn = strcat(fi,"de");

if((fp=fopen(fn,"wb"))==NULL)
{
    printf("Could not open file %s \n",fn);
    printf("Abnormal End\n");
    return;
}
else
{
    printf("writing on %s ",fn);
    sp=fwrite( dsca, sizeof(char), 369, fp);
}

strcpy(fi,fh);

fn = strcat(fi,"df");

if((fp=fopen(fn,"wb"))==NULL)
{
    printf("Could not open file %s \n",fn);
    printf("Abnormal End\n");
    return;
}
else

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    printf("writing on %s \n",fn);
    sp=fwrite( dscb, sizeof(char), 369, ep);
}

fcloscall();

ibwrt(le93,"TRMD STOP\n",10L);      /* trigger mode stop */
ibwrt(le93,"TA:SEL\n",7L);          /* select display A */
ibwrt(le93,"CLSW\n",5L);            /* averaging reset */
ibwrt(le93,"TB:SEL\n",7L);          /* select display B */
ibwrt(le93,"CLSW\n",5L);            /* averaging reset */
ibrsp(le93, &stb);
ibwrt(le93,"*CLS\n",5L);            /* clear all the status registers */
ibwrt(le93,"TRMD NORM\n",10L);      /* set trigger mode normal */
                                   /* to start averaging */

printf( "waiting SRQ\n");
ibwait(le93,RQS);
ibrsp(le93, &stb);                  /* serial poll */
ibwrt(le93,"*CLS\n",5L);
ibwrt( le93, "TA:WF? DAT1\n",12L);
lem = sizeof bufa;
ibrd(le93,bufa,lem);
printf("detect %5d bytes for bufa ",ibcntl);
if (ibsta & ERR)  gpiberr("ibrd bufa error");
ibwrt( le93, "TB:WF? DAT1\n",12L);
lem = sizeof bufb;
ibrd(le93,bufb,lem);
printf("detect %5d bytes for bufb ",ibcntl);
if (ibsta & ERR)  gpiberr("ibrd bufb error");
for( i=1; i<nos; i++)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ibwrt(1e93,"TRMD STOP\n",10L);      /* trigger mode stop */
ibwrt(1e93,"TA:SEL\n",7L);           /* select display A */
ibwrt(1e93,"CLSW\n",5L);             /* averaging reset */
ibwrt(1e93,"TB:SEL\n",7L);           /* select display B */
ibwrt(1e93,"CLSW\n",5L);             /* averaging reset */
ibwrt(1e93,"TRMD NORM\n",10L);       /* set trigger mode normal */
                                     /* to start averaging */

```

```

strcpy(fi,fh);
pf = itoa(i-1,ff,10);
fm = strcat(fi,"e");
fn = strcat(fm,ff);
if((fp=fopen(fn,"wb"))==NULL)
{
    printf("Could not open file %s \n",fn);
    printf("Abnormal End\n");
    return;
}
else
{
    gotoxy(1,23);
    printf("writing on %s ",fn);
    sp=fwrite((char *)bufa, sizeof(int), 2011, fp);
}
strcpy(fi,fh);
pf = itoa(i-1,ff,10);
fm = strcat(fi,"f");
fn = strcat(fm,ff);
if((fp=fopen(fn,"wb"))==NULL)
{
    printf("Could not open file %s \n",fn);

```

```

printf("Abnormal End\n\n");
return;
}
else
{
printf("writing on %s\n",fn);
sp=fwrite((char*)bufb, sizeof(int), 2011, ep);
}
fcloseall();
grphl();
printf( "waiting SRQ\n");
ibwait(le93,RQS);
ibrsp(le93, &stb); /* serial poll */
ibwrt(le93,"*CLS\n",5L);
ibwrt( le93, "TA:WF? DAT1\n",12L);
lem = sizeof bufa;
ibrd(le93,bufa,lem);
printf("detect %5d bytes for bufa ",ibcntl);
if (ibsta & ERR) gpiberr("ibrd bufa error");
ibwrt( le93, "TB:WF? DAT1\n",12L);
lem = sizeof bufb;
ibrd(le93,bufb,lem);
printf("detect %5d bytes for bufb ",ibcntl);
if (ibsta & ERR) gpiberr("ibrd bufb error");
}
strcpy(fi,fh);
pf = itoa(i-1,ff,10);
fm = strcat(fi,"e");
fn = strcat(fm,ff);
if((fp=fopen(fn,"wb"))==NULL)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    printf("Could not open file %s \n",fn);
    printf("Abnormal End\n\n");
    return;
}
else
{
    gotoxy(1,23);
    printf("writing on %s ",fn);
    sp=fwrite((char *)bufa, sizeof(int), 2011, fp);
}
strcpy(fi,fh);
pf = itoa(i-1,ff,10);
fm = strcat(fi,"f");
fn = strcat(fm,ff);
if((ep=fopen(fn,"wb"))==NULL)
{
    printf("Could not open file %s \n",fn);
    printf("Abnormal End\n\n");
    return;
}
else
{
    printf("writing on %s ",fn);
    sp=fwrite((char*)bufb, sizeof(int), 2011, ep);
}
fcloseall();
grphl();
ibwrt(le93, "TA:TRA OFF\n",11L);    /* trace function A off */
ibwrt(le93, "TB:TRA OFF\n",11L);    /* trace function B off */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ibwrt(1e93, "C1:TRA ON\n",10L);    /* trace channel 1 on */
ibwrt(1e93, "C2:TRA ON\n",10L);    /* trace channel 2 on */

clf[0]=1;

printf("Hit any key to close figure -----");

cgets( c f);

ibwrt(1e93,"ACAL ON\n",8L);

ibclr(1e93);

if (ibsta & ERR) gpiberr("ibclr off error");

ibonl(1e93,0);

if (ibsta & ERR) gpiberr("ibonl(1e93,0) error");

ibonl(0,0);

if (ibsta & ERR) gpiberr("ibonl(0,0) error");

grphe();

clf[0]=10;

printf("Hit return key to finish -----");

cgets( clf);

closegraph();

return;

}

void grphe(void)

{

cleardevice();

setcolor(WHITE);

rectangle(200,50,600,350);

for( j=0; j<1999; j++)

{

xi=(int)(200.-(float)j*0.2);

xe=(int)(200.+(float)(j+1)*0.2);

yi=(int)(200.-(float)bufa[j+11]*300./256./256.);

ye=(int)(200.-(float)bufa[j+12]*300./256./256.);

```

```

setcolor(BLUE);
line(xi,yi,xe,ye);
yi=(int)(200.-(float)bufb[j+11]*300./256./256.);
ye=(int)(200.-(float)bufb[j+12]*300./256./256.);
setcolor(RED);
line(xi,yi,xe,ye);
}
return;
}
void grphl(void)
{
int xj,xf,ik;
int n_noise;
long l_noisea, l_noiseb;
float f_noisea, f_noiseb,ec,ed,fc,fd;
n_noise = 0;
l_noisea = 0;
l_noiseb = 0;
for(j=1800; j<1990; j++)
{
l_noisea += bufa[j];
l_noiseb += bufb[j];
n_noise ++;
}
f_noisea = (float)l_noisea / (float)n_noise;
f_noiseb = (float)l_noiseb / (float)n_noise;
for(j=0;j<1000;j++)
{
xi=101+(i-1)*5;
xi=((i-1)*5)%500+101;

```

```

yi=(int)(350.-150.*(float)j/1000.);
ye=(int)(350.-150.*(float)(j+1)/1000.);
ya=(int)(190.-150.*(float)j/1000.);
yb=(int)(190.-150.*(float)(j+1)/1000.);
ec=((f_noisea-(float)bufa[j+1])*(float)j*(float)j*0.015*0.015);
fc=((f_noiseb-(float)bufb[j+1])*(float)j*(float)j*0.015*0.015);
ed=((f_noisea-(float)bufa[j+12])*(float)(j+1)*(float)(j+1)*0.015*0.015);
fd=((f_noiseb-(float)bufb[j+12])*(float)(j+1)*(float)(j+1)*0.015*0.015);
setcolor(RED);
xj=(int)((float)xi+(float)ec/fac/256.);
xf=(int)((float)xi+(float)ed/fac/256.);
line(xj,ya,xf,yb);
setcolor(GREEN);
xj=(int)((float)xi+(float)fc/fac/256.);
xf=(int)((float)xi+(float)fd/fac/256.);
line(xj,yi,xf,ye);
}
return;
}
/*=====
*           Function GPIBERR
* This function will notify you that a NI-488 function failed by
* printing an error message. The status variable IBSTA will also be
* printed in hexadecimal along with the mnemonic meaning of the bit position.
* The status variable IBERR will be printed in decimal along with the
* mnemonic meaning of the decimal value. The status variable IBCNT will
* be printed in decimal.
* The NI-488 function IBONL is called to disable the hardware and software.
* The EXIT function will terminate this program.
*=====*/

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void gpiberr(char *msg) {
    printf ("%s\n", msg);
    printf ("ibsta = &H%x <", ibsta);
    if (ibsta & ERR ) printf (" ERR");
    if (ibsta & TIMO) printf (" TIMO");
    if (ibsta & END ) printf (" END");
    if (ibsta & SRQI) printf (" SRQI");
    if (ibsta & RQS ) printf (" RQS");
    if (ibsta & SPOLL) printf (" SPOLL");
    if (ibsta & EVENT) printf (" EVENT");
    if (ibsta & CMPL) printf (" CMPL");
    if (ibsta & LOK ) printf (" LOK");
    if (ibsta & REM ) printf (" REM");
    if (ibsta & CIC ) printf (" CIC");
    if (ibsta & ATN ) printf (" ATN");
    if (ibsta & TACS) printf (" TACS");
    if (ibsta & LACS) printf (" LACS");
    if (ibsta & DTAS) printf (" DTAS");
    if (ibsta & DCAS) printf (" DCAS");
    printf (" >\n");
    printf ("iberr = %d", iberr);
    if (iberr == EDVR) printf (" EDVR <DOS Error>\n");
    if (iberr == ECIC) printf (" ECIC <Not CIC>\n");
    if (iberr == ENOL) printf (" ENOL <No Listener>\n");
    if (iberr == EADR) printf (" EADR <Address error>\n");
    if (iberr == EARG) printf (" EARG <Invalid argument>\n");
    if (iberr == ESAC) printf (" ESAC <Not Sys Ctrlr>\n");
    if (iberr == EABO) printf (" EABO <Op. aborted>\n");
    if (iberr == ENEB) printf (" ENEB <No GPIB board>\n");
    if (iberr == EOIP) printf (" EOIP <Async I/O in prg>\n");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (iberr == ECAP) printf (" ECAP <No capability>\n");
if (iberr == EFSO) printf (" EFSO <File sys. error>\n");
if (iberr == EBUS) printf (" EBUS <Command error>\n");
if (iberr == ESTB) printf (" ESTB <Status byte lost>\n");
if (iberr == ESRQ) printf (" ESRQ <SRQ stuck on>\n");
if (iberr == ETAB) printf (" ETAB <Table Overflow>\n");
printf ("ibcnt = %d\n", ibcnt);

printf ("\n");

/* Call the ibonl function to disable the hardware and software. */
ibonl (le93,0);
exit(1);
}

```



```

/*****
/*          LeCroy 9310 data display for PC          */
/*          LE93AT3R.C          */
*****/

#include<stdio.h>

#include<stdlib.h>

#include<string.h>

#include<math.h>

#include <alloc.h>

#include <conio.h>

#include <graphics.h>

void main(void);

void lecroy(double *r, double *pol, double *mza);

void grphl(int *bufa, int *bufb, double fac, int i, double range);

static char m93[]="c:\\lecroy\\data\\MRO93";
static char mn93[]="c:\\lecroy\\data\\MZ93";
char  sourcedir[25]="";
long int bufsa[1000],bufsb[1000];
double mro[1000];

void main(void)
{
char cpy[5];
int sp;
double *r4,*mza4,*pol;
int g_driv=DETECT,g_mode,ik;

    initgraph(&g_driv,&g_mode,"c:\\borlandc\\bgi");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

setviewport(0,0,639,419,0);

cleardevice();

setcolor(7);

r4=(double *)malloc( sizeof(double)*(1000));

mza4=(double *)malloc( sizeof(double)*(1000));

pol=(double *)malloc( sizeof(double)*(1000));

lecroy(r4,pol,mza4);

getch();

free(mza4);

free(r4);

free(pol);

closegraph();

return;

}

void lecroy(double *r, double *pol, double *mz)

{

int nos;

double fac,noisea[10],noiseb[10];

char fh[30];

int i, j, k,kz, sp,ik;

FILE *fp,*ep,*gp;

int *bufa, *bufb;

char fi[40], *fn, *fm, ff[10],ch[5],cpy[5];

int n_noise,inum,ig[20];

long l_noisea, l_noiseb, *bufsa,*bufsb;

double f_noisea, f_noiseb,*bufsaa,*bufsbb,f,f1,f2,*mro,range;

printf("Le93 file head (ex. LC2) = ");

scanf("%s",fh);

printf(" number of records = ");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

scanf("%d",&nos);

printf(" number / factor = ");

scanf("%lf",&fac);

printf(" display range (km) = ");

scanf("%lf",&range);

bufa=(int *)malloc( sizeof(int)*(2000+11));

bufb=(int *)malloc( sizeof(int)*(2000+11));

if (!(bufsaa=(double*)malloc( sizeof(double)*(1000))))
{
    printf("bufsaa allocation error");
    printf("Hit any key -- ");
    cgets( cpy);
    exit(1);
}
if (!(bufsbb=(double *)malloc( sizeof(double)*(1000))))
{
    printf("bufsbb allocation error");
    printf("Hit any key -- ");
    cgets( cpy);
    exit(1);
}

bufsa=(long int *)calloc( 2000,sizeof(long int));
bufsb=(long int *)calloc( 2000,sizeof(long int));

if (!(mro=(double *)farmalloc( sizeof(double)*(1000))))
{
    printf("mro allocation error");
    printf("Hit any key -- ");
    cgets( cpy);
    exit(1);
}

```

```

if((gp=fopen(rn93,"rb"))==NULL)
{
    printf("Could not open %s\n", rn93);
    exit(1);
}
sp=fread(mro,sizeof(double),1000,gp);
fclose(gp);
if((gp=fopen(mn93,"rb"))==NULL)
{
    printf("Could not open %s\n",mn93);
    exit(1);
}
sp=fread(mz,sizeof(double),1000,gp);
fclose(gp);
for(k=0;k<1000;k++)
    mro[k]=mro[k]/mz[k]/mz[k];
cleardevice();
setcolor(7);
setlinestyle(SOLID_LINE,0,NORM_WIDTH);
rectangle(100, 39,600,191);
rectangle(100,199,600,351);
for(ik=0;ik<2;ik++)
{
    line(95, 90+ik*50,605, 90+ik*50);
    line(95,250+ik*50,605,250+ik*50);
}
for(ik=0;ik<2;ik++)
{
    gotoxy(6,6+ik*10);
    printf("%4.1fkm",range*2/3);

```

```

gotoxy(6,9+ik*10);

printf("%4.1fkm",range*1/3);

}

gotoxy(1,1);

printf(" %s 0->%d\n",fh,nos);

printf(" factor=%5.1f",fac);

for( i=0; i<nos; i++)

{

strcpy(fi,sourcedir);

strcat(fi,fh);

itoa(i,ff,10);

fm = strcat(fi,"e");

fn = strcat(fm,ff);

if((fp=fopen(fn,"rb"))==NULL)

{

printf("Could not open file %s \n",fn);

printf("Abnormal End\n\n");

return;

}

else

{

gotoxy(1,23);

printf("%s \n",fn);

sp=fread(bufa, sizeof(int), 2011, fp);

}

strcpy(fi,sourcedir);

strcat(fi,fh);

itoa(i,ff,10);

fm = strcat(fi,"f");

fn = strcat(fm,ff);

```

```

if((ep=fopen(fn,"rb"))==NULL)
{
    printf("Could not open file %s \n",fn);
    printf("Abnormal End\n");
    return;
}
else
{
    gotoxy(1,23);
    printf("%s \n",fn);
    sp=fread(bufb, sizeof(int), 2011, ep);
}
fcloseall();
grphl(bufa, bufb, fac, i, range);
}
for(ik=0;ik<20;ik++) ig[ik]=200;
gotoxy(1,3);
printf("scan number to be ignore = ");
scanf("%d",&inum);
for(ik=0;ik<inum;ik++) {
    printf("No%d= ",ik+1);
    scanf("%d",ig+ik);
}
cleardevice();
setcolor(7);
setlinestyle(SOLID_LINE,0,NORM_WIDTH);
rectangle(100, 39,600,191);
rectangle(100,199,600,351);
for(ik=0;ik<2;ik++)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

line(95, 90+ik*50,605, 90+ik*50);

line(95,250+ik*50,605,250+ik*50);

}

for(ik=0;ik<2;ik++)
{

    gotoxy(6,6+ik*10);

    printf("%4.1fkm",range*2/3);

    gotoxy(6,9+ik*10);

    printf("%4.1fkm",range*1/3);

}

gotoxy(1,1);
printf(" %s 0->%d\n",fh,nos);
printf(" factor=%5.1f",fac);
ik=0;
for( i=0; i<nos; i++)
{
    if(ig[ik]==i) {
        ik=ik+1;
        itoa(i+1,ff,10);
    } else itoa(i,ff,10);
    strcpy(fi,sourcedir);
    strcat(fi,fh);

    fm = strcat(fi,"e");

    fn = strcat(fm,ff);

    if((fp=fopen(fn,"rb"))==NULL)
    {

        printf("Could not open file %s \n",fn);

        printf("Abnormal End\n");

        return;

    }

    else

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    gotoxy(1,23);
    printf("%s \n",fn);
    sp=fread(bufa, sizeof(int), 2011, fp);
}
strcpy(fi,sourcedir);
strcat(fi,fh);
fm = strcat(fi,"f");
fn = strcat(fm,ff);
if((cp=fopen(fn,"rb"))==NULL)
{
    printf("Could not open file %s \n",fn);
    printf("Abnormal End\n\n");
    return;
}
else
{
    gotoxy(1,23);
    printf("%s \n",fn);
    sp=fread(bufb, sizeof(int), 2011, cp);
}
fcloseall();
grphl(bufa, bufb, fac, i, range);
for(j=0;j<2000;j++)
{
    bufbsa[j]+=(long)(-bufa[j+1]);
    bufbsb[j]+=(long)(-bufb[j+1]);
}
}
}

```

free(bufa);

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

free(bufb);
free(bufsa);
free(bufsb);
free(bufsaa);
free(bufsbb);
free(mro);
return;
}

```

```

void grphl(int *bufa, int *bufb, double fac, int i, double range)

```

```

{
int j, k, sp;
int z, xi, yi, xe, ye, ya, yb;
double ec,ed,fc,fd;
int xj,xf,ik;
int n_noise,irange;
long l_noisea, l_noiseb;
double f_noisea, f_noiseb;
    n_noise = 0;
    l_noisea = 0;
    l_noiseb = 0;
    for( j=1800; j<1990; j++)
    {
        l_noisea += bufa[j];
        l_noiseb += bufb[j];
        n_noise ++;
    }
    f_noisea = (double)l_noisea / (double)n_noise;
    f_noiseb = (double)l_noiseb / (double)n_noise;
    irange=(int)(2000.*range/30.);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(j=0;j<irange;j++)
{
    xi=((i-1)*5)%500+101;
    yi=(int)(350.-150.*(float)j/(float)irange);
    ye=(int)(350.-150.*(float)(j+1)/(float)irange);
    ya=(int)(190.-150.*(float)j/(float)irange);
    yb=(int)(190.-150.*(float)(j+1)/(float)irange);
    ec=((f_noisea-(float)bufa[j+11])*(float)j*(float)j*0.015*0.015);
    fc=((f_noiseb-(float)bufb[j+11])*(float)j*(float)j*0.015*0.015);
    ed=((f_noisea-(float)bufa[j+12])*(float)(j+1)*(float)(j+1)*0.015*0.015);
    fd=((f_noiseb-(float)bufb[j+12])*(float)(j+1)*(float)(j+1)*0.015*0.015);
    setcolor(RED);
    xj=(int)((float)xi+(float)ec/fac/256.);
    xf=(int)((float)xi+(float)ed/fac/256.);
    line(xj,ya,xf,yb);
    setcolor(CYAN);
    xj=(int)((float)xi+(float)fc/fac/256.);
    xf=(int)((float)xi+(float)fd/fac/256.);
    line(xj,yi,xf,ye);
}
return;

```

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายพีระวุฒิ สุวรรณจันทร์
วันเดือนปีเกิด	วัน พฤหัสบดี ที่ 30 เดือน เมษายน พ.ศ. 2513
ภูมิลำเนา	อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา
ที่อยู่ปัจจุบัน	72/515 หมู่ 16 ซอยประภาวรรณ 31 ถนนสุวินทวงศ์ แขวงแสนแสบ เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510 โทร.914-9961
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 1) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถานที่สำเร็จการศึกษา	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถานที่ทำงาน	ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โทร.326-8503-4 ต่อ 411
ตำแหน่ง	อาจารย์ ระดับ 4
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ :	(1) เรื่อง <u>“การใช้ Nd:YAG Laser ในการหาระดับความสูง และความหนาของ Tropopause โดยเทคนิคของออฟติคอลรีโมทเซนซิง”</u> , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18, จัดโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ณ โรงแรมแอมบาสเดอร์ จอมเทียน พัทยา, หน้า 229-233, พฤศจิกายน 2538 (2) เรื่อง <u>“การวัดฝุ่นละอองด้วย LIDAR”</u> , วิศวกรรมลาดกระบัง, หน้า 56-61, กรกฎาคม 2539