

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Phạm Đồng Bằng

**NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN KỸ THUẬT LIDAR
CÓ KHẨU ĐỘ THU LỚN
CHO NGHIÊN CỨU THÔNG SỐ KHÍ QUYỂN TẦNG CAO**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Hà Nội – 2025

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM
HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Phạm Đồng Bằng

**NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN KỸ THUẬT LIDAR
CÓ KHẨU ĐỘ THU LỚN
CHO NGHIÊN CỨU THÔNG SỐ KHÍ QUYỂN TẦNG CAO**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Chuyên ngành: Quang học

Mã số: 9440110

Người hướng dẫn 1

(Ký, ghi rõ họ tên)

Người hướng dẫn 2

(Ký, ghi rõ họ tên)

PGS.TS Đinh Văn Trung

PGS.TS Phạm Hồng Minh

Hà Nội – 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án: " Nghiên cứu phát triển kỹ thuật lidar có khẩu độ thu lớn cho nghiên cứu thông số khí quyển tầng cao " là công trình nghiên cứu của chính mình dưới sự hướng dẫn khoa học của tập thể hướng dẫn. PGS. TS Đinh Văn Trung và PGS. TS Phạm Hồng Minh cùng sự cộng tác của các thành viên nghiên cứu trong nhóm. Luận án sử dụng thông tin trích dẫn từ nhiều nguồn tham khảo khác nhau và các thông tin trích dẫn được ghi rõ nguồn gốc. Các kết quả nghiên cứu của tôi được công bố chung với các tác giả khác đã được sự nhất trí của đồng tác giả khi đưa vào luận án. Các số liệu, kết quả được trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nào khác ngoài các công trình công bố của tác giả. Luận án được hoàn thành trong thời gian tôi làm nghiên cứu sinh tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Tôi xin chịu hoàn toàn trách nhiệm với lời cam đoan trên.

Hà Nội, ngày tháng năm 2025

Tác giả luận án

Phạm Đồng Bằng

LỜI CẢM ƠN

Lời cảm ơn đến người hướng dẫn, người giúp đỡ, Đơn vị chuyên môn thực hiện luận án, Ban Lãnh đạo, phòng Đào tạo, các phòng chức năng của Học viện Khoa học và Công nghệ.

Để hoàn thành chương trình nghiên cứu sinh và luận án Tiến sĩ tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học - Công nghệ Việt Nam tôi đã nhận được sự hướng dẫn, chỉ bảo tận tình của các Thầy hướng dẫn, thầy giảng dạy, cán bộ trong Viện Vật Lý, cũng như sự giúp đỡ nhiệt tình của Học viện Khoa học và Công nghệ, các đồng nghiệp trong Viện, tôi xin chân thành cảm ơn tất cả sự hướng dẫn và sự giúp đỡ này.

Đặc biệt, tôi xin chân thành cảm ơn PGS. TS Đinh Văn Trung người thầy, người hướng dẫn trực tiếp của tôi. Người đã truyền cho tôi lòng say mê khoa học, kinh nghiệm nghiên cứu quý báu cũng như phong cách làm việc chuyên nghiệp.

Tôi cũng xin chân thành cảm ơn PGS.TS Phạm Hồng Minh, người thầy, người đồng hướng dẫn tôi. Người đã có những chỉ dạy sâu sắc và những kinh nghiệm quý giá trong công việc nghiên cứu của tôi.

Tôi cũng muốn gửi lời cảm ơn tới TS. Bùi Văn Hải, TS. Trần Ngọc Hưng, TS. Vũ Dương và rất nhiều đồng nghiệp trong Viện Vật Lý đã cộng tác, giúp đỡ, chia sẻ với tôi trong công việc nghiên cứu.

Tôi cũng xin cảm ơn những ý kiến đóng góp quý báu và các ý kiến phản biện của các thành viên trong hội đồng chấm luận án cấp cơ sở để bản luận án được hoàn thiện hơn.

Tôi cũng xin cảm ơn Trường Đại học Hàng hải Việt Nam nơi tôi công tác đã cho phép và tạo điều kiện cho tôi được tham gia chương trình nghiên cứu sinh này.

Xin chân thành cảm ơn!

Tác giả luận án

Phạm Đồng Bằng

MỤC LỤC

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT	i
DANH MỤC HÌNH VẼ	ii
DANH MỤC BẢNG BIỂU	v
Chương 1.TỔNG QUAN VỀ KHÍ QUYỂN TẦNG CAO VÀ KỸ THUẬT LIDAR	6
1.1. Tổng quan khí quyển Trái Đất	6
1.1.1. Đặc trưng chung của khí quyển Trái Đất	6
1.1.2. Phân bố mật độ và nhiệt độ khí quyển	8
1.1.3. Mây tầng cao.....	10
1.1.4. Các kỹ thuật khảo sát khí quyển	18
1.2. Kỹ thuật lidar.....	20
1.2.1. Tương tác của ánh sáng với khí quyển.....	20
1.2.2. Tán xạ Rayleigh	22
1.2.3. Tán xạ Mie.....	24
1.2.4. Cơ sở lý thuyết xác định phân bố nhiệt độ	27
1.2.5. Đo đạc khoảng cách lớn	32
1.3. Ứng dụng kỹ thuật lidar trong nghiên cứu khí quyển.	33
1.3.1. Trên thế giới.....	33
1.3.2. Tại Việt Nam.....	36
1.4. Kết luận chương 1	39
Chương 2. NGHIÊN CỨU VÀ PHÁT TRIỂN HỆ LIDAR KHẨU ĐỘ THU LỚN	40
2.1. Hệ đo lidar.....	40
2.1.1. Cấu trúc cơ bản của hệ đo lidar	40
2.1.2. Cấu hình hệ lidar đàn hồi sử dụng kính thiên văn Schmidt-Cassegrain ..	42
2.1.3. Cấu hình hệ lidar đàn hồi sử dụng gương cầu khẩu độ lớn.....	44
2.2. Thông số đặc trưng của các bộ phận, linh kiện trong hệ lidar khẩu độ thu lớn.	46
2.2.1. Nguồn laser.....	46
2.2.2. Bộ thu và lọc tín hiệu quang.....	47
2.2.3. Ống nhân quang điện.....	50

2.2.4. Bộ xử lý tín hiệu.....	52
2.3. Quy trình chế tạo gương cầu.....	54
2.3.1. Cơ sở lý thuyết tính toán lựa chọn thông số kích thước gương cầu	54
2.3.2. Chế tạo gương cầu.....	62
2.3.3. Đánh giá biên dạng bề mặt gương cầu.....	66
2.4. Đánh giá hệ lidar khẩu độ thu lớn	72
2.4.1. Lắp đặt hệ lidar khẩu độ thu lớn.....	72
2.4.2. Mô phỏng quá trình thu tín hiệu lidar	74
2.4.3. So sánh kết quả mô phỏng và tín hiệu lidar tại mặt phẳng tiêu của hệ thu lidar	87
2.5. Kết luận chương 2	88
Chương 3. ĐẶC TRƯNG THÔNG SỐ KHÍ QUYỂN TẦNG CAO	90
3.1. Khảo sát mây Ti tại Hà Nội	90
3.1.1. Cơ sở vật lý xác định các thông số mây Ti.....	90
3.1.2. Độ cao đám mây Ti	93
3.1.3. Độ dày hình học và độ sâu quang học của mây Ti	94
3.1.4. Tỷ số lidar của mây Ti.....	97
3.1.5. Kết quả khảo sát thông số nhiệt độ mây Ti.	99
3.1.6. Thống kê phép đo lidar khảo sát mây Ti.....	101
3.2. Xác định thông số vật lý khí quyển tầng cao	106
3.2.1. Thuật giải xác định phân bố nhiệt độ.....	106
3.2.2. Đánh giá chất lượng tín hiệu lidar thu được từ hệ lidar gương khẩu độ	108
3.2.3. Xác định mật độ phân tử từ tín hiệu lidar hiệu dụng	110
3.2.4. Sai số trong xác định nhiệt độ khí quyển từ các phép đo lidar.....	115
3.2.5. Phân bố nhiệt độ và sai số nhiệt độ của phép đo lidar khảo sát khí quyển tầng cao.	117
3.3. Kết luận chương 3	122
KẾT LUẬN.....	123
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ	125
TÀI LIỆU THAM KHẢO	126

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

Ký hiệu	Tiếng Anh	Tiếng Việt
Lidar	light detection and ranging	Kỹ thuật lidar
WMO	World Meteorology rganization	Tổ chức khí tượng thế giới
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation	Khuếch đại ánh sáng bằng phát xạ cưỡng bức
PMT	Photomultiplier Tube	Ống nhân quang điện
APD	Avalanche photodiode	Photo diode thác lũ
ADC	Analog-to-digital converter	Bộ biến đổi tương tự-số
FOV	Field of view	Trường nhìn
DMLP	Dichroic mirror longpass	Gương lưỡng sắc
OD	Optical Depth	Độ sâu quang học
FWHM	Full width at half maximum	Độ rộng ở nửa cực đại
IF	Interference Filter	Phin lọc giao thoa
ND	Neutral Density	Phin lọc trung tính
L	Lens	Thấu kính
IC	Intergrated Circuit	Vi mạch tích hợp
BNC	Bayonet Neill–Concelman	Đầu nối BNC
USB	Universal Serial Bus	Cổng kết nối
SNR	Signal Noise Ratio	Tỉ số tín hiệu trên nhiễu
SIN	Signal Induced Noise	Nhiều gây bởi tín hiệu
TTL	Transistor-Transistor Logic	Mức điện áp TTL
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor	Transistor hiệu ứng trườn

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Cấu trúc nhiệt độ theo phương thẳng đứng của khí quyển Trái Đất dựa trên nhiệt độ trung bình của mô hình MSISE-90	8
Hình 1.2. Hình ảnh các loại mây và tên gọi của chúng	12
Hình 1.3. Tần suất xuất hiện toàn cầu hàng năm của các đám mây Ti từ các phép đo radar kết hợp các phép đo lidar từ vệ tinh	16
Hình 1.4. Dạng hàm hệ số suy hao của một hạt nước hình cầu đồng nhất	26
Hình 2.1. Sơ đồ cấu tạo cơ bản của một hệ lidar	41
Hình 2.2. Cấu hình hệ đo lidar đàn hồi 1 kênh sử dụng kính thiên văn Schmidt-Cassegrain đã được phát triển tại Viện Vật Lý	42
Hình 2.3. Hệ đo lidar sử dụng kính thiên văn loại Schmidt-Cassegrain	43
Hình 2.4. Cấu hình hệ đo lidar đàn hồi 1 kênh sử dụng gương cầu khẩu độ lớn.	44
Hình 2.5. Laser xung Nd:YAG (Brilliant model, hãng Quantel, Pháp).....	47
Hình 2.6. Chỉ số kích thước cơ bản của gương cầu.	48
Hình 2.7. Bộ lọc tín hiệu quang.	49
Hình 2.8. Phin lọc giao thoa FL532-3 nm và phổ truyền qua của phin lọc (hãng Thorlabs).	49
Hình 2.9. Cấu trúc của ống nhân quang điện	50
Hình 2.10. Ảnh chụp màn hình phần mềm Labview đang thu tín hiệu lidar.	53
Hình 2.11. Biểu diễn số photon thu được của hệ lidar ở các độ cao khác nhau khi sử dụng bộ thu quang học gương cầu có đường kính từ 25 đến 100 cm.	57
Hình 2.12. Biểu diễn tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) ở độ cao trên 40 km với các đường kính gương cầu có kích thước từ 25 đến 100 cm.	58
Hình 2.13. Biểu diễn ảnh hưởng của trường nhìn đến nhiễu nền thu nhận của hệ lidar sử dụng gương cầu 60 cm.	60
Hình 2.14. Biểu diễn ảnh hưởng của tiêu cự gương thu đến nhiễu nền thu nhận của hệ lidar sử dụng gương cầu 60 cm.	61
Hình 2.15. Lò nung sử dụng điện: a) Mô hình lò nung; b) Lò nung thực tế.	63
Hình 2.16. Đường nhiệt nung phơi gương	64
Hình 2.17. Sản phẩm phơi gương đường kính 60 cm.	64
Hình 2.18. Thông số cơ bản sử dụng tính độ sâu tâm gương.	65
Hình 2.19. Mài gương quang học bằng máy.	65
Hình 2.20. Sơ đồ nguyên lý phương pháp Foucault kiểm tra bề mặt gương cầu	66

Hình 2.21. Sơ đồ quá trình đo Foucault.	67
Hình 2.22. Sơ đồ bố trí các dụng cụ sử dụng trong thí nghiệm đo kiểm gương cầu bằng phương pháp Foucault	67
Hình 2.23.a) Kết quả mô phỏng lý thuyết ... ; b) Kết quả chụp ảnh thực tế	68
Hình 2.24. Sơ đồ nguyên lý Hartmann	69
Hình 2.25. Biểu diễn độ lệch mặt cầu thực tế và lý tưởng.	69
Hình 2.26. kết quả đo Hartman: a) Ảnh mặt gương trước khi chụp; b) Ảnh mặt Hartman chụp thực tế; c) Phần mềm Matlab dựng lại các chấm sáng từ ảnh chụp Hartman; d) Kết quả đo độ lệch so với mặt cầu chuẩn.	70
Hình 2.27. Gương cầu đường kính 60 cm sau khi mạ nhôm.....	72
Hình 2.28. Sơ đồ thiết kế và hệ lidar thực tế với gương cầu đường kính 60 cm.....	73
Hình 2.29. Ảnh hưởng của hàm chông chấp lên tín hiệu lidar.....	76
Hình 2.30. Sơ đồ hệ hai trục mô phỏng thu tín hiệu lidar.	79
Hình 2.31. Sự chông chấp của trường nhìn máy phát Laser và kính thiên văn thu ánh sáng tán xạ.....	80
Hình 2.32. Hàm overlap.....	81
Hình 2.33. Kết quả mô phỏng hình ảnh thu được tại mặt phẳng tiêu trở lên của a) gương cầu và b) gương parabol, đường tròn biểu diễn cho pinhole chặn trường.....	82
Hình 2.34. Mô phỏng số photon tán xạ đàn hồi ngược thu được tại hệ thu quang điện a) Hàm truyền $T = 0,96$ b) Hàm truyền $T = 0,93$	83
Hình 2.35. Quá trình truyền ánh sáng qua đám mây Ti a) Đường mô phỏng lý thuyết.	86
Hình 2.36. Ảnh Mặt trời thu ở mặt phẳng tiêu cự.....	87
Hình 2.37. Ảnh mặt cắt tia laser thu ở mặt phẳng cách mặt phẳng tiêu cự.....	88
Hình 3.1. Tín hiệu lidar đã hiệu chỉnh khoảng cách. Các tín hiệu lidar màu đỏ, đường mô phỏng nét chấm và gạch ngang thể hiện cho biên dạng các lớp khí quyển bên trên và bên dưới đám mây.	93
Hình 3.2. Quan sát đám mây Cirrus, Cường độ được mã hóa màu đại diện cho cường độ tín hiệu lidar đã hiệu chỉnh theo khoảng cách.....	94
Hình 3.3. (a) Sự thay đổi theo thời gian thực của độ dày hình học của mây Ti (b) sự thay đổi theo thời gian của độ sâu quang học mây Ti thu được từ cùng một dữ liệu	95

Hình 3.4. (a) Độ dày hình học mây ti theo độ cao; (b) Độ sâu quang học theo độ dày hình học của mây Ti.	96
Hình 3.5. Tỷ số lidar không hiệu chỉnh và có hiệu chỉnh theo chiều cao trung bình đám mây của các đám mây Ti.....	98
Hình 3.6. Kết quả khảo sát nhiệt độ của mây Ti năm 2018.	99
Hình 3.7. Biểu đồ thống kê về số lần xuất hiện của các lớp Ti và tổng số các phép đo lidar từ năm 2011 đến năm 2017.....	102
Hình 3.8. Sơ đồ khối thuật giải nhiệt độ.....	107
Hình 3.9. Tín hiệu lidar 22h ngày / 25 tháng 8 năm 2018 / tại 18 Hoàng Quốc Việt- Nghĩa đô – Cầu giấy – Hà Nội.	109
Hình 3.10. Tín hiệu lidar 23 h ngày 28 tháng 8 năm 2018 tại 18 Hoàng Quốc Việt- Nghĩa đô – Cầu giấy – Hà Nội.	110
Hình 3.11. Mật độ khí ô dôn và quá trình truyền qua khí ô dôn với đường truyền một vòng đi và về hệ thu lidar.....	111
Hình 3.12. Sơ đồ khối vòng lặp xác định mật độ phân tử.....	112
Hình 3.13. Đường mật độ phân tử của phép đo lidar 23 h ngày 25 tháng 8 năm 2018 tại 18 Hoàng Quốc Việt- Nghĩa đô – Cầu giấy – Hà Nội.....	113
Hình 3.14. Tín hiệu lidar 20h50' ngày 28 tháng 8 năm 2018 tại 18 Hoàng Quốc Việt- Nghĩa đô – Cầu giấy – Hà Nội.	117
Hình 3.15. Sai số và độ lệch nhiệt độ so với mô hình	117
Hình 3.16. Tín hiệu lidar 21h00' ngày 5 tháng 12 năm 2018 tại 18 Hoàng Quốc Việt- Nghĩa đô – Cầu giấy – Hà nội. Phân bố nhiệt độ trong miền quan trắc từ 20 km tới 55 km, tín hiệu lidar là đường màu xanh, đường nét chấm là phân bố nhiệt độ theo mô hình lý thuyết	118
Hình 3.17. Tín hiệu lidar 21h00' ngày 5 tháng 12 năm 2018 tại 18 Hoàng Quốc Việt- Nghĩa đô – Cầu giấy – Hà nội, phân bố nhiệt độ và sai số.....	119

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1. Thành phần khí quyển Trái Đất	7
Bảng 1.2. Phân hạng mây quốc tế theo hình dạng và độ cao của mây	11
Bảng 1.3. Giá trị tiết diện tán xạ ngược và công nghệ khảo sát tương ứng	23
Bảng 1.4. Bảng thông số hệ lidar nhóm nghiên cứu ở Mỹ.....	35
Bảng 2.1. Thông số kỹ thuật hệ lidar khảo sát khí quyển tại Hà nội	44
Bảng 2.2. Một số thông số cơ bản của laser Nd:YAG @ 532 nm	47
Bảng 2.3. Thông số gương cầu.	48
Bảng 2.4. Thông số của PMT R7400U và H6780-20	51
Bảng 2.5. Các thông số chính của hệ đếm photon picoscope 5204	52
Bảng 2.6. Các thông số cơ bản trong mô phỏng lựa chọn kích thước gương cầu....	56
Bảng 2.7. Kết quả đo tiêu cự gương cầu.	68
Bảng 2.8. Các thông số chính của hệ lidar đàn hồi.....	73
Bảng 3.1. Số liệu nhiệt độ lớp phân tầng Tropopause và mây Ti.....	101
Bảng 3.2 Bảng tổng hợp các đặc trưng vật lý của mây Ti tại Hà nội.....	103
Bảng 3.3. Kết quả thống kê của một số nhóm nghiên cứu mây Ti trên thế giới trong những năm gần đây.....	104

MỞ ĐẦU

Khí quyển là lớp khí bao phủ xung quanh Trái Đất, có vai trò vô cùng thiết yếu trong việc duy trì sự sống và bảo vệ mọi hệ sinh thái trên hành tinh. Khí quyển không chỉ cung cấp các loại khí cần thiết như oxy và carbon dioxide để duy trì sự sống, mà còn đóng vai trò như một lớp chắn bảo vệ Trái Đất khỏi các tia bức xạ cực tím có hại từ Mặt Trời và các thiên thể khác [1]. Các thông số vật lý và hóa học của khí quyển như nhiệt độ, mật độ không khí, độ ẩm, vận tốc gió và thành phần hóa học của các khí vi lượng ảnh hưởng trực tiếp đến các điều kiện thời tiết, khí hậu toàn cầu, chất lượng không khí và môi trường sống trên Trái Đất [2].

Trong những thập kỷ gần đây, vấn đề biến đổi khí hậu toàn cầu đã trở thành một trong những thách thức lớn nhất đối với nhân loại, thu hút sự quan tâm đặc biệt của các nhà khoa học và chính phủ trên toàn thế giới [3, 4]. Biến đổi khí hậu không chỉ dẫn đến các hiện tượng thời tiết cực đoan như bão mạnh, hạn hán kéo dài, lũ lụt diện rộng, mà còn tác động mạnh mẽ đến đời sống kinh tế-xã hội, sức khỏe con người và đa dạng sinh học toàn cầu. Một trong những yếu tố quan trọng gây nên biến đổi khí hậu là sự biến đổi bất thường trong cấu trúc của khí quyển, đặc biệt là tại các tầng khí quyển cao như tầng bình lưu và tầng trung lưu. Các tầng khí quyển này đóng vai trò quan trọng trong việc điều hòa khí hậu toàn cầu bằng cách hấp thụ và phản xạ bức xạ mặt trời, đồng thời điều tiết luồng khí lưu chuyển giữa các vùng khí hậu trên Trái Đất [5]. Đặc biệt là mây tầng cao, tồn tại chủ yếu trong tầng đối lưu trên và tầng bình lưu dưới, có vai trò then chốt trong việc điều chỉnh cân bằng bức xạ khí quyển [6, 7]. Mây tầng cao thường bao gồm các tinh thể băng nhỏ, mỏng và phân bố không đồng đều, điều này làm cho việc quan trắc và đo đạc chúng trở nên vô cùng khó khăn bằng các phương pháp truyền thống [8].

Các kỹ thuật quan trắc khí quyển trực tiếp bằng cách sử dụng các dụng cụ đo được gắn trên các thiết bị bay lên khí quyển như bóng thám không (balloon-borne radiosonde), tên lửa thám không (rocketsonde), hay các thiết bị đo từ vệ tinh mặc dù đã cung cấp nhiều thông tin hữu ích nhưng đều có những hạn chế riêng như: bóng thám không bị hạn chế về độ cao đo ở ngưỡng từ 30-35 km, tên lửa thám không có thể khảo sát ở độ cao trên 80 km nhưng ngược lại chi phí đắt đỏ và không thể sử dụng thường xuyên, trong khi các phép đo từ vệ tinh thường bị hạn chế bởi độ phân giải không gian và thời gian (không gian 0,2-20 km, thời gian vài lần trên ngày) [9, 10]. Trong bối cảnh đó, kỹ thuật sử dụng ánh sáng để xác định khoảng cách và phân tích đối tượng (Light Detection and Ranging- Lidar) ra đời và trở thành công cụ hữu hiệu trong nghiên cứu khí quyển [11]. Kỹ thuật lidar khảo sát khí quyển hoạt động dựa trên nguyên lý phát các xung laser vào khí quyển và phân tích ánh sáng tán xạ ngược,

giúp đo đạc và thu thập dữ liệu với độ chính xác cao về cấu trúc khí quyển, các loại son khí (aerosol), mây, nhiệt độ và mật độ khí ở các tầng khí quyển [12 - 14]. Kỹ thuật lidar có khả năng cung cấp số liệu với độ phân giải không gian và thời gian rất cao, khả năng đo liên tục theo thời gian thực, đặc biệt hữu ích trong các nghiên cứu khí quyển tầng cao, nơi tín hiệu thu được thường rất yếu và khó đo bằng các kỹ thuật khác. Một trong những yếu tố quyết định khả năng đo đạc chính xác và hiệu quả của hệ lidar chính là kích thước khẩu độ của hệ thu tín hiệu quang học. Khẩu độ lớn giúp tăng cường đáng kể khả năng thu nhận các tín hiệu tán xạ yếu từ tầng khí quyển cao, từ đó cải thiện chất lượng dữ liệu, mở rộng độ cao quan sát và nâng cao độ phân giải không gian của các phép đo [11].

Trên thế giới, công nghệ lidar có bộ thu khẩu độ lớn đã được phát triển mạnh mẽ từ cuối thế kỷ 20, đóng vai trò quan trọng trong nghiên cứu khí quyển tầng cao. Những hệ thống này sử dụng các gương phản xạ lớn, giúp tăng đáng kể khả năng thu nhận tín hiệu tán xạ yếu từ các lớp khí quyển cao như tầng bình lưu và trung lưu. Việc sử dụng các bộ thu có đường kính từ vài chục cm đến vài mét không chỉ nâng cao độ nhạy mà còn cải thiện độ phân giải không gian và thời gian trong đo đạc khí quyển [15]. Các trung tâm nghiên cứu hàng đầu như NASA, ESA, đài quan sát khí quyển Mauna Loa (Mỹ), Haute-Provence (Pháp), và nhiều tổ chức tại Trung Quốc, Nhật Bản đã phát triển và vận hành các hệ thống lidar mặt đất với bộ thu lớn nhằm khảo sát son khí, mây tầng cao, nhiệt độ, hơi nước, CO₂ và O₃ trong khí quyển. Các nghiên cứu gần đây còn tích hợp lidar khẩu độ lớn với công nghệ ảnh 3D, silicon photonics và cảm biến đơn photon, cho phép khảo sát khí quyển ở khoảng cách xa hàng trăm kilô mét [16 - 18]. Ngoài ra, các hệ lidar di động tích hợp cảm biến gió, nhiệt độ, hơi nước và CO₂ cũng được phát triển nhằm cung cấp hình ảnh 3D động lực học của khí quyển, phục vụ các nghiên cứu khí tượng và khí hậu chính xác hơn [19].

Tại Việt Nam, công nghệ lidar trong nghiên cứu khí quyển đã trở thành lĩnh vực nghiên cứu quan trọng và được phát triển mạnh trong hơn một thập kỷ qua. Các nghiên cứu tiêu biểu đã ứng dụng công nghệ lidar trong các lĩnh vực như: khảo sát cấu trúc mây tầng cao tại viện Vật lý Địa cầu [20]; phát triển và thử nghiệm hệ thống lidar nghiên cứu về son khí và đặc trưng khí quyển tại viện Vật lý, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam; và xây dựng các hệ lidar mặt đất để quan trắc son khí và theo dõi chất lượng không khí tại các khu vực đô thị [21 - 23]. Ngoài ra, công nghệ lidar cũng đã được ứng dụng để theo dõi ô nhiễm không khí và nghiên cứu khí quyển ở nhiều đô thị và khu vực ven biển, qua đó thể hiện tiềm năng sử dụng rộng rãi kỹ thuật này tại Việt Nam [24]. Các nghiên cứu phát triển ứng dụng này đã đạt được nhiều thành tựu, nhưng vẫn gặp nhiều thách thức lớn về công nghệ chế tạo,

những hạn chế về độ phân giải không gian cũng như thời gian trong khảo sát do giới hạn về khẩu độ thu quang học.

Trên cơ sở nhận thức được tầm quan trọng và sự cần thiết phát triển kỹ thuật lidar khẩu độ lớn, tôi chọn đề tài "*Nghiên cứu phát triển kỹ thuật lidar có khẩu độ thu lớn cho nghiên cứu thông số khí quyển tầng cao*" là đề tài nghiên cứu tiên sĩ của mình. Mục tiêu của luận án là tập trung nghiên cứu sâu hơn, kết hợp giữa các lĩnh vực vật lý, quang học và công nghệ chế tạo và gia công vật liệu. Từ đó phát triển công nghệ chế tạo gương cầu khẩu độ lớn, tích hợp vào các hệ lidar, và tiến hành quan trắc, đo đạc các đặc trưng vật lý của khí quyển tầng cao tại khu vực Hà Nội. Những kết quả thu được từ nghiên cứu này không chỉ giúp làm chủ công nghệ lidar tiên tiến mà còn cung cấp thêm nhiều dữ liệu quý báu cho việc nghiên cứu khí hậu, môi trường, và ứng phó hiệu quả với các biến đổi khí hậu tại Việt Nam.

Luận án có mục tiêu và đối tượng nghiên cứu cụ thể như sau:

Mục tiêu của luận án:

- Xây dựng và phát triển kỹ thuật chế tạo gương quang học khẩu độ lớn và hệ đo kiểm chất lượng gương quang học.
- Tập trung nghiên cứu, thiết kế và tích hợp hệ thu quang học có khẩu độ thu lớn vào hệ lidar.
- Sử dụng hệ lidar của các nghiên cứu trước và hệ lidar thay đổi bộ thu quang học khẩu độ lớn thực hiện quan trắc và khảo sát phân bố nhiệt độ khí quyển tầng cao, đặc trưng mây Ti tầng cao tại Hà Nội.

Đối tượng nghiên cứu của luận án:

- ✓ Phân tích cấu tạo và nguyên lý hoạt động của một hệ lidar trong ứng dụng đo đạc các thông số khí quyển theo không gian và thời gian với độ phân giải cao.
- ✓ Kỹ thuật chế tạo, đo kiểm chất lượng gương quang học khẩu độ lớn.
- ✓ Sử dụng hệ lidar có hệ thu quang học khẩu độ lớn trong phân tích, khảo sát khí quyển tầng cao tại Hà Nội.

Từ mục tiêu và đối tượng nghiên cứu trên, luận án đưa ra các giải pháp kỹ thuật nhằm tối ưu hóa hiệu suất của hệ, giảm chi phí vận hành, và nâng cao chất lượng của các số liệu đo đạc.

Phương pháp nghiên cứu được triển khai trong luận án bao gồm cả mô phỏng và thực nghiệm. Trước hết, các phương trình mô hình hóa quá trình truyền ánh sáng trong khí quyển, tán xạ Rayleigh và hấp thụ bởi các thành phần khí quyển đã được xây dựng để mô phỏng tín hiệu thu được từ hệ lidar. Từ đó, các yếu tố như đường kính gương thu, tiêu cự, trường nhìn và hàm chồng chập giữa trường phát và trường thu được tối ưu hóa bằng các thuật toán ray-tracing. Bên cạnh đó, luận án tiến hành chế tạo thực tế gương cầu kích thước lớn, triển khai đo kiểm bằng phương pháp Foucault và Hartmann để đảm bảo độ chính xác hình học và quang học. Hệ lidar với gương cầu thu lớn sau khi được tích hợp đã được thử nghiệm đo đạc thực tế, từ đó thu thập tín hiệu lidar tại các độ cao lớn và xử lý bằng các thuật toán xác định nhiệt độ dựa trên mô hình khí quyển và phương pháp lặp.

Ý nghĩa khoa học của nghiên cứu là đã làm chủ được kỹ thuật mô phỏng, thiết kế và chế tạo gương cầu quang học kích thước lớn – một thành phần then chốt trong các hệ lidar tầng cao. Luận án cũng góp phần phát triển thuật toán xử lý tín hiệu lidar đàn hồi để xác định chính xác các thông số vật lý như phân bố nhiệt độ, mật độ khí quyển và đặc trưng quang học của mây Ti. Những kết quả này có thể mở rộng ứng dụng cho các nghiên cứu khí quyển tầng cao, giúp bổ sung dữ liệu quan trọng cho các mô hình khí hậu.

Ý nghĩa thực tiễn thể hiện ở việc hệ thống lidar được phát triển trong nghiên cứu có thể vận hành tại Việt Nam, sử dụng thiết bị tự chế tạo, giảm thiểu phụ thuộc vào thiết bị nhập khẩu. Hệ thống này có khả năng ứng dụng để giám sát môi trường không khí tại đô thị, quan trắc khí quyển trong điều kiện thời tiết cực đoan, và đặc biệt hữu ích trong bối cảnh biến đổi khí hậu đang ngày càng ảnh hưởng sâu rộng đến Việt Nam. Công nghệ này cũng có tiềm năng chuyển giao cho các cơ sở nghiên cứu, đào tạo và sản xuất trong nước, thúc đẩy tự chủ công nghệ cao trong lĩnh vực quang học – khí tượng.

Luận án có bố cục gồm 3 chương:

Chương 1: Tổng quan về khí quyển tầng cao và kỹ thuật lidar

Chương 1 trình bày khái quát về cấu trúc, phân tầng khí quyển Trái Đất và một số đặc trưng của khí quyển tầng cao, sự ảnh hưởng của các thông số khí quyển đến thời tiết và môi trường trên Trái Đất. Cơ sở lý thuyết về tương tác của ánh sáng với các phân tử trong khí quyển dựa trên tán xạ đàn hồi Rayleigh và tán xạ Mie. Ngoài ra, các công nghệ và kỹ thuật được sử dụng để khảo sát khí quyển cũng được đề cập tới. Phần cuối chương 1, cập nhật tình hình phát triển trên thế giới và tại Việt Nam về công nghệ lidar trong khảo sát khí quyển.

Chương 2: Nghiên cứu và phát triển hệ lidar khẩu độ thu lớn

Chương 2 trình bày về cấu tạo và nguyên lý hoạt động của hệ lidar nói chung. Thiết kế và phát triển hệ lidar với gương cầu khẩu độ lớn. Việc phát triển khối thu quang học với gương cầu có đường kính 60 cm gồm có quá trình chế tạo gương và đo kiểm biên dạng bề mặt gương.

Để đánh giá chất lượng tín hiệu của hệ lidar đã được nâng cấp khẩu độ thu lớn Chúng tôi tiến hành mô phỏng và đo đạc thực nghiệm để so sánh kết quả.

Chương 3: Đặc trưng thông số khí quyển tầng cao

Chương cuối của luận án trình bày các kết quả khảo sát khí quyển tầng cao. Các kết quả khảo sát đối tượng mây Ti xác định được độ cao đỉnh, đáy đám mây, đặc trưng vật lý là nhiệt độ, độ sâu quang học và tỉ số lidar. Phân kết quả này chúng tôi thực hiện trên hệ lidar có bộ thu là kính quang học loại Schmidt-Cassegrain.

Phân kết quả tiếp theo là khảo sát thông số nhiệt độ của khí quyển tầng cao, thực hiện trên hệ lidar nâng cấp bộ thu sử dụng gương cầu khẩu độ lớn, có đường kính 60 cm đã được chế. Kết quả đo tín hiệu thu được rất phù hợp với đường tín hiệu mô phỏng của MSISE-90 cho thấy hệ lidar hoạt động tốt và kết quả đáng tin cậy. Từ các tín hiệu lidar đàn hồi thu được chúng tôi đã xác định được phân bố nhiệt độ bằng thuật toán xác định phân bố nhiệt độ. Các đường biểu diễn phân bố nhiệt độ của chúng tôi được so sánh và đánh giá sai số với các phép đo radiosonde và đường mô phỏng MSISE-90, kết quả cho thấy chúng có biên dạng đường nhiệt độ tương tự nhau.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ KHÍ QUYỂN TẦNG CAO VÀ KỸ THUẬT LIDAR

Trong chương này, khái quát về cấu trúc, phân tầng khí quyển Trái Đất và một số đặc trưng của khí quyển tầng cao, sự ảnh hưởng của các thông số khí quyển đến thời tiết và môi trường trên Trái Đất sẽ được trình bày và phân tích chi tiết. Cơ sở lý thuyết về tương tác của ánh sáng với các phân tử trong khí quyển dựa trên tán xạ đàn hồi Rayleigh và tán xạ Mie sẽ được đưa ra. Ngoài ra, các công nghệ và kỹ thuật được sử dụng để khảo sát khí quyển cũng được đề cập tới. Phần cuối chương 1, cập nhật tình hình phát triển trên thế giới và tại Việt Nam về công nghệ lidar trong khảo sát khí quyển.

1.1. Tổng quan khí quyển Trái Đất

1.1.1. Đặc trưng chung của khí quyển Trái Đất

Khí quyển là lớp vỏ khí bao quanh Trái Đất, tồn tại dưới dạng hỗn hợp khí và hơi nước, bao phủ toàn bộ bề mặt Trái Đất với độ dày lên tới vài trăm kilômét. Khí quyển đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì sự sống trên hành tinh thông qua việc cung cấp khí oxy (O_2) cho sinh vật, bảo vệ các loài khỏi bức xạ mặt trời có hại, và duy trì cân bằng nhiệt độ cần thiết để sự sống phát triển [25].

Thành phần chính của khí quyển bao gồm Nitơ (N_2) chiếm khoảng 78%, O_2 khoảng 21%, Argon (Ar) khoảng 0,93%, và một lượng nhỏ các khí vi lượng khác như Carbon dioxide (CO_2), Neon (Ne), Helium (He), Methane (CH_4), Krypton (Kr), Xenon (Xe), và Hydrogen (H_2). Trong đó, các khí như CO_2 và CH_4 là các khí nhà kính quan trọng có khả năng hấp thụ và phát xạ bức xạ hồng ngoại, góp phần điều tiết khí hậu và nhiệt độ toàn cầu [26]. Tỷ lệ theo thể tích và khối lượng phân tử của các loại khí phổ biến nhất trong khí quyển được trình bày trong Bảng 1.1.

Khí quyển Trái Đất được chia thành nhiều tầng khác nhau dựa trên sự thay đổi nhiệt độ và mật độ khí theo độ cao. Các tầng này bao gồm tầng đối lưu, tầng bình lưu, tầng trung lưu và tầng nhiệt quyển [25]:

- *Tầng đối lưu (Troposphere)*: Tầng khí quyển gần nhất với bề mặt Trái Đất, có độ cao khoảng 8-17 km. Nhiệt độ giảm dần theo độ cao với mức trung bình khoảng $6,5^\circ C$ mỗi km, là nơi tập trung hầu hết hơi nước, xảy ra các hiện tượng thời tiết như mưa, bão, tuyết và sương mù. Đây cũng là tầng chứa các chất ô nhiễm do hoạt động tự nhiên và con người [26].

Bảng 1.1. Thành phần khí quyển Trái Đất [26].

Các loại khí	Tỉ lệ theo thể tích	Khối lượng phân tử (kg.kmol ⁻¹)
N ₂ (Nitrogen)	0,78	28
O ₂ (Oxygen)	0,21	32
Ar (Argon)	0,0093	40
CO ₂ (Carbon dioxide)	$3,1 \times 10^{-4}$	44
Ne (Neon)	$1,8 \times 10^{-5}$	20
He (Helium)	$5,2 \times 10^{-6}$	4
CH ₄ (Methane)	2×10^{-6}	16
Kr (Krypton)	$1,1 \times 10^{-6}$	84
Xe (Xenon)	$8,7 \times 10^{-8}$	131
H ₂ (Hydrogen)	5×10^{-8}	2

• *Tầng bình lưu (Stratosphere)*: Nằm ở độ cao khoảng 10-50 km, tầng bình lưu có nhiệt độ tăng dần theo độ cao do sự hấp thụ bức xạ cực tím bởi ô dôn (O₃). Đây là tầng ổn định, ít xảy ra các hiện tượng thời tiết và đóng vai trò quan trọng trong việc bảo vệ các sinh vật sống trên Trái Đất khỏi tia cực tím [27].

• *Tầng trung lưu (Mesosphere)*: Tầng này kéo dài từ khoảng 50-85 km với nhiệt độ giảm mạnh, xuống dưới -90°C. Tầng trung lưu là nơi xảy ra hiện tượng sao băng, có mật độ khí thấp và chịu ít ảnh hưởng trực tiếp từ các hoạt động của con người [25].

• *Tầng nhiệt quyển (Thermosphere)*: Bắt đầu từ độ cao trên 85 km, tầng này hấp thụ mạnh bức xạ mặt trời khiến nhiệt độ tăng rất cao, lên đến 2000°C. Không khí ở đây rất loãng, chủ yếu là các khí nhẹ như He và H₂ [26]. Tầng nhiệt quyển cũng là nơi xảy ra hiện tượng cực quang (aurora borealis và aurora australis), do các hạt mang điện từ gió Mặt Trời va chạm với khí quyển Trái Đất.

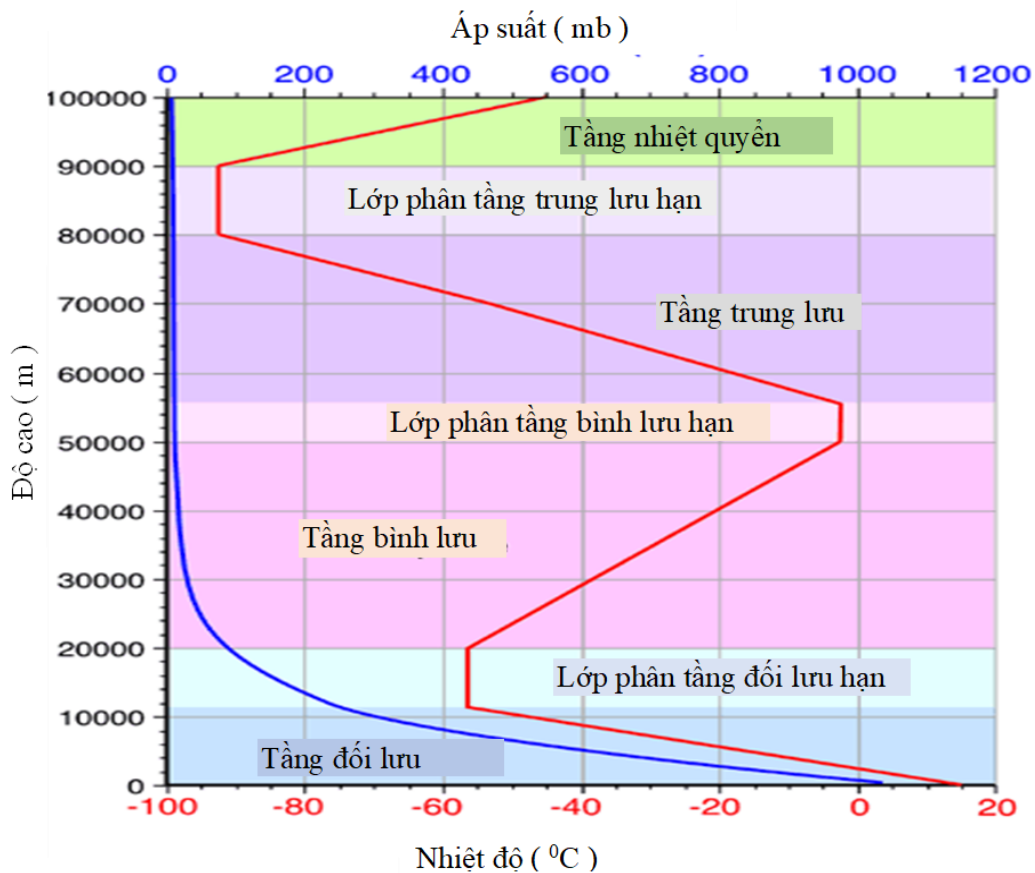
Ngoài bốn tầng chính trên, khí quyển còn có một khu vực gọi là tầng ngoài (exosphere), kéo dài từ 500 km đến 10.000 km. Đây là ranh giới giữa khí quyển Trái Đất và không gian vũ trụ, nơi mật độ không khí rất thấp và các phân tử khí có thể thoát ra ngoài không gian [25].

Khí quyển Trái Đất là một hệ phức tạp, với sự phân tầng rõ rệt và sự thay đổi thành phần khí theo độ cao. Thành phần chính bao gồm N₂, O₂, và argon (Ar), nhưng các khí vi lượng như CO₂, CH₄, O₃ đóng vai trò quan trọng trong các quá trình khí

hậu và môi trường. Sự phân tầng của khí quyển ảnh hưởng trực tiếp đến thời tiết, khí hậu và các hiện tượng vật lý [26].

1.1.2. Phân bố mật độ và nhiệt độ khí quyển

Khí quyển không có ranh giới trên rõ ràng mà dần dần chuyển tiếp vào không gian vũ trụ. Sự phân bố mật độ khí quyển và nhiệt độ trong từng tầng khí quyển không đồng đều và phụ thuộc vào nhiều yếu tố như hấp thụ bức xạ Mặt Trời, chuyển động đối lưu, thành phần khí và tác động của lực hấp dẫn. Nhiệt độ trong khí quyển thay đổi theo độ cao với những khoảng tăng và giảm khác nhau trong từng tầng. Điều này là do tác động của bức xạ Mặt Trời, sự hấp thụ và phát xạ năng lượng của các thành phần khí quyển, cũng như sự phân tầng theo động lực khí quyển [25, 26]. Để minh họa cho sự thay đổi nhiệt độ theo độ cao. Hình 1.1 đường màu đỏ thể hiện biểu đồ nhiệt độ khí quyển theo mô hình MSISE-90 là một mô hình thực nghiệm về phân bố nhiệt độ và các thành phần khí quyển theo độ cao. Mô hình này dựa trên dữ liệu thu được từ các vệ tinh khác nhau và dữ liệu radar tán xạ được đặt ở nhiều địa điểm trên thế giới.



Hình 1.1. Cấu trúc nhiệt độ theo phương thẳng đứng của khí quyển Trái Đất dựa trên nhiệt độ trung bình của mô hình MSISE-90 [28].

Sự biến đổi nhiệt độ theo độ cao

Trong tầng đối lưu, nhiệt độ giảm dần theo độ cao với tốc độ trung bình khoảng $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Nguyên nhân chính là do bề mặt Trái Đất hấp thụ năng lượng từ Mặt Trời và sau đó phát xạ nhiệt vào khí quyển, làm ấm không khí bên dưới, trong khi lớp không khí phía trên không được bề mặt Trái Đất làm nóng trực tiếp. Khi lên đến độ cao khoảng 10-17 km, nhiệt độ ngừng giảm tại tropopause, tạo thành ranh giới với tầng bình lưu [25].

Ở tầng bình lưu, nhiệt độ tăng dần theo độ cao do sự hấp thụ bức xạ cực tím bởi lớp ô dôn. Điều này tạo ra một lớp ổn định, ngăn chặn sự đối lưu không khí, giúp tầng bình lưu ít có sự xáo trộn hơn so với tầng đối lưu [27].

Tầng trung lưu có nhiệt độ giảm mạnh theo độ cao, đạt mức thấp nhất khoảng -90°C ở ranh giới trên cùng gọi là mesopause. Sự giảm nhiệt độ này xảy ra do không còn đủ lượng ô dôn để hấp thụ bức xạ, đồng thời các phân tử khí ở tầng này phát xạ nhiệt ra ngoài không gian [25].

Tầng nhiệt quyển có nhiệt độ tăng mạnh trở lại, có thể đạt tới 2.000°C hoặc cao hơn do sự hấp thụ bức xạ có năng lượng cao từ Mặt Trời. Tuy nhiên, do mật độ khí quyển ở tầng này rất thấp, số lượng phân tử khí quá ít để truyền nhiệt đáng kể, nên con người sẽ không cảm nhận được nhiệt độ này theo cách thông thường [25, 26].

Sự biến đổi mật độ khí quyển theo độ cao

Mật độ khí quyển giảm dần theo độ cao do lực hấp dẫn của Trái Đất giữ lại phần lớn không khí ở các tầng thấp. Ở mực nước biển (0 km), mật độ không khí khoảng $1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$. Khi lên đến 10 km, mật độ giảm còn $0,41 \text{ kg}/\text{m}^3$. Ở tầng trung lưu và nhiệt quyển, mật độ không khí cực kỳ thấp, gần như chân không ở độ cao trên 500 km. Khi độ cao tăng lên, khí quyển trở nên loãng hơn và các phân tử khí có xu hướng di chuyển theo hướng của áp suất thấp hơn. Điều này tạo ra sự phân tầng về mật độ, với các khí nặng hơn (như O_2 , N_2) tập trung nhiều ở tầng thấp và các khí nhẹ hơn (như He, H_2) chiếm ưu thế ở độ cao trên 100 km. Trong biểu đồ Hình 1.1 đường màu xanh, ta thấy sự thay đổi áp suất khí quyển theo độ cao để phản ánh rõ hơn sự giảm mạnh của mật độ khi lên cao [28].

Ảnh hưởng của sự thay đổi nhiệt độ và mật độ khí quyển

Sự thay đổi nhiệt độ và mật độ trong khí quyển có ảnh hưởng lớn đến hiện tượng thời tiết, chuyển động của gió, sự hình thành mây và sóng khí quyển. Một số tác động quan trọng bao gồm: Với thời tiết và khí hậu, sự chênh lệch nhiệt độ giữa các tầng khí quyển ảnh hưởng đến sự hình thành bão, gió mùa và luồng khí phản lực. Các vùng

có mật độ không khí cao hơn thường có xu hướng tạo điều kiện thuận lợi cho sự ngưng tụ hơi nước và hình thành mây [25, 26]. Tác động đến hàng không và vũ trụ: Ở độ cao trên 80 km, mật độ không khí rất thấp, giảm lực cản đối với vệ tinh và tàu vũ trụ. Tuy nhiên, ở độ cao từ 90-500 km, sự thay đổi mật độ khí quyển có thể ảnh hưởng đến quỹ đạo của các vệ tinh nhân tạo [28]. Tầng điện ly và viễn thông: Tầng nhiệt quyển chứa một lượng lớn các hạt mang điện do bức xạ Mặt Trời ion hóa, tạo nên tầng điện ly (ionosphere), quan trọng trong việc truyền sóng vô tuyến và liên lạc vô tuyến tầm xa [27].

1.1.3. Mây tầng cao

Mây tầng cao là thuật ngữ khí tượng dùng để chỉ các loại mây xuất hiện và tồn tại chủ yếu ở độ cao lớn trong khí quyển, thường là từ khoảng 6 km đến 12 km ở vùng khí hậu ôn đới và nhiệt đới, và có thể thấp hơn ở vùng cực do đặc điểm khí quyển ở các vĩ độ này. Các đám mây tầng cao nằm ở tầng trên cùng của tầng đối lưu và đôi khi lan sang phần dưới của tầng bình lưu, là các tầng khí quyển nơi nhiệt độ thường rất thấp, phổ biến dưới -40°C [25]. Do ở độ cao lớn và nhiệt độ cực thấp như vậy, các loại mây tầng cao hầu như chỉ được cấu tạo từ các tinh thể băng nhỏ, khác biệt hoàn toàn với các tầng mây thấp và trung thường cấu tạo chủ yếu từ giọt nước lỏng. Những tinh thể băng này có kích thước rất nhỏ, hình dạng đa dạng như hình kim, hình lục giác, hoặc dạng viên đạn và phân bố rải rác, làm cho các đám mây tầng cao thường có đặc điểm là rất mỏng, trong suốt hoặc bán trong suốt. Đây cũng chính là lý do khiến các đám mây tầng cao thường có khả năng tạo ra những hiện tượng quang học đặc biệt như quầng sáng (halo) hay các vệt sáng quanh Mặt trời và Mặt trăng, thường được quan sát thấy từ mặt đất [29].

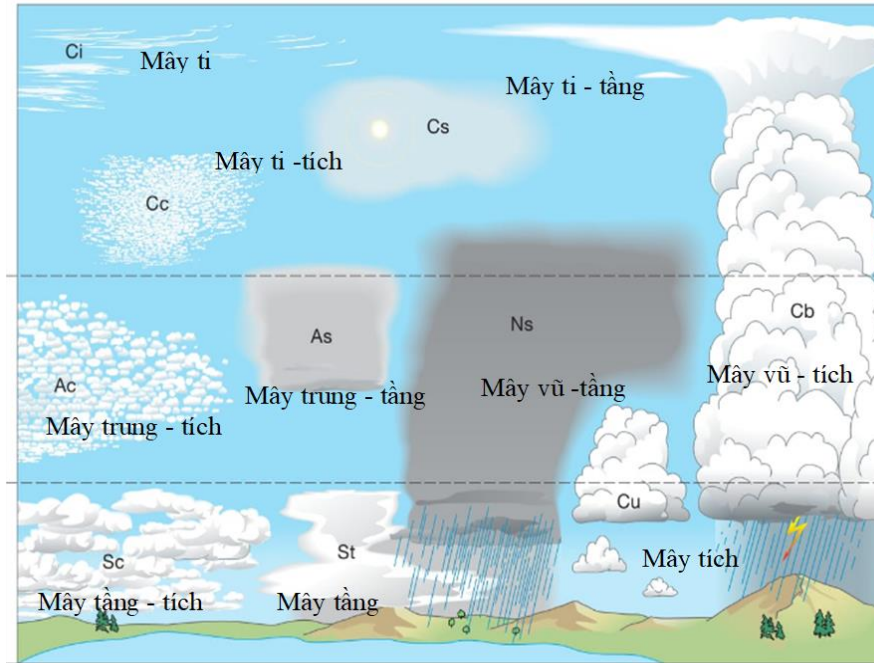
Mặc dù có mật độ vật chất tương đối thấp và độ che phủ không dày đặc như các loại mây tầng thấp hơn, nhưng vai trò của mây tầng cao đối với khí hậu toàn cầu rất quan trọng. Chúng tác động mạnh mẽ đến cân bằng bức xạ khí quyển, nhờ khả năng vừa phản xạ một lượng lớn bức xạ mặt trời ra ngoài không gian, đồng thời cũng hấp thụ và giữ lại bức xạ nhiệt phát ra từ bề mặt Trái Đất. Chính vì vậy, sự xuất hiện và biến đổi về đặc điểm vật lý của các đám mây tầng cao ngày càng được quan tâm nghiên cứu, nhằm hiểu rõ hơn các cơ chế khí hậu, các hiện tượng thời tiết, và đặc biệt là những tác động lâu dài liên quan đến vấn đề biến đổi khí hậu [30].

Phân loại mây tầng cao

Bảng 1.2. Phân hạng mây quốc tế theo hình dạng và độ cao của mây [29, 31].

Hạng mây		Ký hiệu	Độ cao trung bình của mây ở vĩ độ trung bình (km)
Tên gọi bằng tiếng việt	Tiếng la tinh		
Họ mây tầng thấp có độ cao đáy dưới 2 km			
Mây tầng - tích	Stratocumulus	Sc	0,3 - 1,5
Mây tầng	Stratus	St	0,05 - 0,5
Mây vũ – tầng	Nimbostratus	Ns	0,1 - 1,0
Họ mây phát triển thẳng đứng (độ cao chân mây dưới 2 km)			
Mây tích	Cumulus	Cu	0,3 - 1,5
Mây vũ – tích	Cumulonimbus	Cb	0,4 - 1,0
Họ mây tầng trung (độ cao chân mây 2-6 km)			
Mây trung – tích	Alto cumulus	Ac	2 - 6
Mây trung – tầng	Altostratus	As	3 - 5
Họ mây tầng cao (trên 6 km)			
Mây Ti	Cirrus	Ci	7 - 10
Mây Ti – tích	Cirrocumulus	Cc	6 - 8
Mây Ti – tầng	Cirrostratus	Cs	6 - 8

Bảng 1.2 cung cấp thông tin phân hạng mây quốc tế, trong đó mây được phân loại theo hình dạng bề ngoài và độ cao nơi chúng tồn tại. Dựa theo tiêu chuẩn phân loại quốc tế của Tổ chức Khí tượng Thế giới (WMO), mây tầng cao được chia thành ba loại chính là mây Ti (Cirrus - Ci), mây Ti-tầng (Cirrostratus - Cs) và mây Ti-tích (Cirrocumulus - Cc). Các loại mây này đều hình thành chủ yếu từ tinh thể băng, tuy nhiên chúng có những đặc điểm riêng về hình dạng, cấu trúc và ý nghĩa khí tượng khác nhau [29, 31].



Hình 1.2. Hình ảnh các loại mây và tên gọi của chúng [24].

Mây Ti (Cirrus - Ci): Mây Ti là loại mây phổ biến nhất trong nhóm mây tầng cao, thường xuất hiện dưới dạng những sợi mây rất mỏng, thanh mảnh, có hình dáng như những sợi tóc, lông chim hoặc các sợi len kéo dài. Các sợi mây Ti thường xuất hiện đơn lẻ hoặc tạo thành từng cụm nhỏ, đôi khi được kéo dài thành dải mây mảnh do tác động của các luồng gió mạnh ở tầng cao khí quyển. Đặc điểm dễ nhận biết nhất của mây Ti là chúng thường trong suốt hoặc bán trong suốt, phản xạ ánh sáng mặt trời một cách hiệu quả, đôi khi tạo ra các hiện tượng quang học như hào quang hoặc quầng sáng (halo) xung quanh Mặt trời và Mặt trăng. Sự xuất hiện của mây Ti thường được xem như dấu hiệu thời tiết ổn định, nhưng trong một số trường hợp, sự xuất hiện dày đặc và kéo dài của mây Ti có thể báo trước sự tiếp cận của một hệ thời tiết mới như front lạnh hoặc bão đang đến gần [29, 31].

Mây Ti-tầng (Cirrostratus - Cs): Mây Ti-tầng là loại mây tầng cao đặc trưng bởi cấu trúc như một lớp màng mỏng và đồng nhất phủ rộng trên một phần lớn hoặc toàn bộ bầu trời. Loại mây này cũng có cấu tạo chủ yếu từ các tinh thể băng nhỏ, khiến chúng thường có vẻ ngoài mờ ảo và trong suốt. Chính đặc điểm này giúp mây Ti-tầng tạo ra các hiện tượng quang học nổi bật nhất như quầng sáng rõ nét quanh Mặt trời hoặc Mặt trăng [29, 31]. Sự xuất hiện của mây Ti-tầng thường liên quan đến sự dịch chuyển các hệ thời tiết lớn như front lạnh hoặc áp thấp khí quyển, và thường là dấu hiệu dự báo chính xác về sự biến đổi thời tiết trong vòng từ 12 đến 24 giờ kế tiếp. Khi quan sát thấy lớp mây Ti-tầng ngày càng dày đặc và mở rộng, điều này thường báo hiệu thời tiết sắp trở nên xấu đi, như mưa hoặc bão [31].

Mây Ti-tích (Cirrocumulus - Cc): Mây Ti-tích là loại mây ít phổ biến hơn trong số các loại mây tầng cao. Chúng thường xuất hiện dưới dạng những đám mây nhỏ, mỏng, xếp thành từng lớp hoặc các gợn sóng nhẹ nhàng, đôi khi trông giống như những đám vảy cá xếp chồng lên nhau. Các đám mây này có cấu tạo từ các tinh thể băng nhỏ và phân bố rải rác trên bầu trời với mật độ không quá cao. Sự hiện diện của mây Ti-tích thường báo hiệu tình trạng khí quyển bất ổn định ở độ cao lớn. Dù không trực tiếp gây ra các hiện tượng thời tiết mạnh, nhưng chúng thường báo hiệu sắp có những thay đổi nhỏ trong thời tiết, như sự xuất hiện của những vùng nhiễu động không khí ở tầng cao, và đôi khi có thể báo hiệu một front lạnh hoặc front âm yếu sẽ tiến đến trong một hoặc hai ngày tới [31].

Cơ chế hình thành mây tầng cao

Mây tầng cao được hình thành thông qua một quá trình phức tạp, chủ yếu liên quan đến sự dịch chuyển lên cao của không khí chứa hơi nước trong điều kiện khí quyển phù hợp. Quá trình này chịu ảnh hưởng mạnh mẽ từ các yếu tố như nhiệt độ, áp suất, độ ẩm không khí, chuyển động đối lưu, và các hiện tượng khí tượng khác diễn ra trong tầng đối lưu và tầng thấp của tầng bình lưu [25, 26].

Quá trình nâng lên của khối khí ẩm: Cơ chế chính dẫn đến sự hình thành mây tầng cao bắt đầu từ việc các khối khí ẩm ở tầng thấp bị đẩy lên cao trong khí quyển. Quá trình này diễn ra do nhiều nguyên nhân, trong đó quan trọng nhất là chuyển động đối lưu và sự tương tác giữa các khối khí nóng và lạnh. Khi không khí gần bề mặt Trái Đất được làm nóng bởi bức xạ mặt trời, chúng trở nên nhẹ hơn và có xu hướng bốc lên. Khi khối khí này dịch chuyển lên cao, chúng sẽ gặp các điều kiện áp suất khí quyển giảm dần theo độ cao, gây ra hiện tượng giãn nở khí. Chính sự giãn nở này làm cho nhiệt độ khối khí giảm dần [25].

Sự giảm nhiệt độ và ngưng tụ hơi nước: Khi nhiệt độ của khối khí nâng lên cao giảm đến điểm mà hơi nước không còn giữ được trạng thái hơi, hơi nước bắt đầu ngưng tụ trực tiếp thành tinh thể băng nhỏ. Ở độ cao trên 6 km, nhiệt độ không khí thường thấp hơn -40°C , điều kiện lý tưởng để quá trình ngưng tụ hơi nước chuyển từ trạng thái hơi trực tiếp sang trạng thái rắn, bỏ qua trạng thái lỏng (quá trình ngưng tụ trực tiếp hay còn gọi là quá trình kết tinh hơi nước) [29, 32]. Trong điều kiện nhiệt độ rất thấp như vậy, các phân tử nước sẽ tạo thành các tinh thể băng siêu nhỏ, đa dạng về hình dạng và kích thước. Những tinh thể này dần dần kết hợp với nhau thành các đám mây tầng cao như mây Ti, mây Ti-tầng và mây Ti-tích [31].

Vai trò của hạt nhân ngưng kết và các tinh thể băng: Quá trình hình thành tinh thể băng trong mây tầng cao không diễn ra một cách ngẫu nhiên mà cần có sự hiện diện của các hạt nhân ngưng kết (son khí). Những hạt nhân này là các hạt rắn nhỏ

như bụi khoáng, bụi núi lửa, bụi công nghiệp, hoặc các loại hạt siêu nhỏ khác tồn tại trong khí quyển. Các hạt sơn khí đóng vai trò là các hạt nhân ngưng kết ban đầu để hơi nước có thể bám vào, kết tinh thành băng dễ dàng hơn [33]. Ở độ cao lớn, sự đa dạng về hình dạng của các tinh thể băng như dạng tấm, dạng cột, kim, hình lục giác, hoa thị hoặc dạng viên đạn phụ thuộc chủ yếu vào điều kiện nhiệt độ và độ ẩm không khí. Điều kiện nhiệt độ thấp hơn -40°C và độ ẩm cao sẽ tạo điều kiện thuận lợi nhất để hình thành các tinh thể băng dạng tấm và lục giác, đây là những dạng phổ biến nhất trong cấu trúc của mây tầng cao [29, 33].

Ảnh hưởng của dòng khí quyển và nhiễu động khí tượng: Ngoài các yếu tố trên, sự xuất hiện và hình dạng cụ thể của mây tầng cao còn bị ảnh hưởng mạnh bởi chuyển động ngang của các dòng khí mạnh trong tầng khí quyển cao. Những dòng khí mạnh này không chỉ vận chuyển và định hình các đám mây mà còn góp phần kéo giãn và lan rộng chúng trên diện rộng, tạo ra các cấu trúc mây đặc trưng như các dải mây Ti mỏng và dài hoặc các cấu trúc gợn sóng đặc biệt của mây Ti-tích [25, 30]. Hơn nữa, các nhiễu động khí tượng, chẳng hạn như sự dịch chuyển của các front khí nóng hoặc lạnh, cũng thúc đẩy mạnh mẽ quá trình hình thành các đám mây tầng cao. Các nhiễu động này có thể đẩy các khối khí ẩm từ tầng thấp lên cao một cách đột ngột, dẫn đến sự hình thành nhanh chóng của các đám mây tầng cao, báo hiệu trước những thay đổi thời tiết trong ngắn hạn [31].

Vai trò của mây tầng cao trong hệ khí hậu toàn cầu

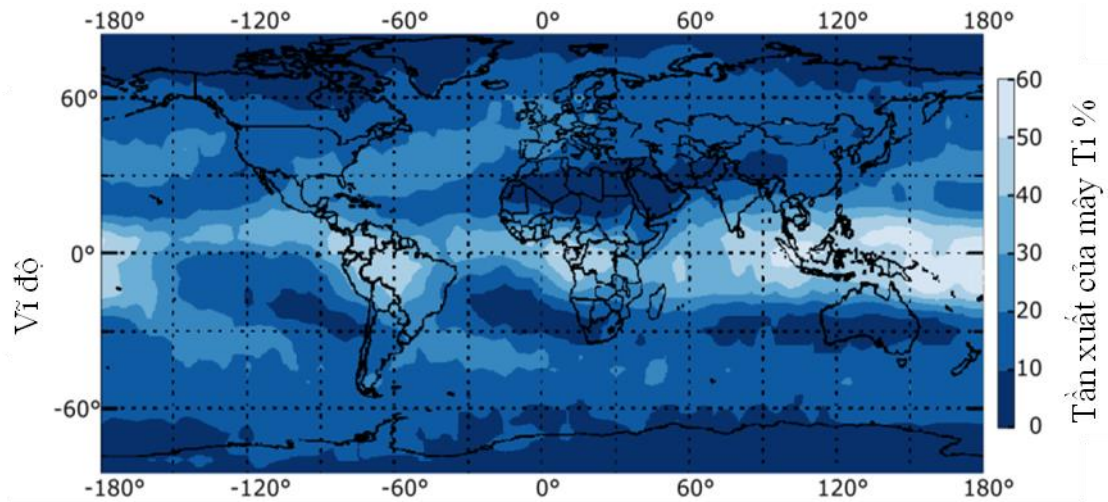
Mây tầng cao đóng một vai trò rất quan trọng và phức tạp trong hệ khí hậu toàn cầu, đặc biệt thông qua tác động đến sự cân bằng bức xạ khí quyển và chu trình nước toàn cầu. Chúng có thể đồng thời phản xạ một lượng lớn bức xạ mặt trời ra khỏi bầu khí quyển, làm mát khí hậu Trái Đất, hấp thụ, giữ lại bức xạ hồng ngoại từ bề mặt Trái Đất, gây hiệu ứng nhà kính và làm ấm tầng khí quyển bên dưới [30, 34].

Tác động làm mát khí quyển (phản xạ bức xạ mặt trời): Do đặc điểm cấu tạo chủ yếu từ các tinh thể băng, mây tầng cao (đặc biệt là mây Ti và mây Ti-tàn) có khả năng phản xạ rất hiệu quả lượng lớn bức xạ mặt trời trở lại không gian. Đây là tác động chính gây ra hiệu ứng làm mát khí hậu toàn cầu. Theo các nghiên cứu khoa học, mây tầng cao có thể phản xạ từ 20% đến 40% tổng bức xạ mặt trời chiếu vào khí quyển [30, 34]. Điều này làm giảm lượng nhiệt năng mà bề mặt Trái Đất hấp thụ, giúp duy trì nhiệt độ ổn định và hạn chế sự tăng nhanh của nhiệt độ khí quyển. Khả năng phản xạ bức xạ mặt trời của mây tầng cao phụ thuộc rất lớn vào diện tích che phủ, độ dày và đặc tính quang học của các đám mây. Ví dụ, mây Ti-tàn với cấu trúc lớp mỏng trải rộng sẽ phản xạ bức xạ mặt trời hiệu quả hơn nhiều so với các đám mây mỏng và rải rác như mây Ti-tích [31].

Tác động làm ấm khí quyển (hiệu ứng nhà kính): Mặc dù phản xạ mạnh bức xạ mặt trời, mây tầng cao cũng đồng thời hấp thụ mạnh bức xạ hồng ngoại phát ra từ bề mặt Trái Đất, từ đó gây hiệu ứng nhà kính. Các tinh thể băng trong mây tầng cao có khả năng hấp thụ bức xạ nhiệt rất hiệu quả và sau đó phát xạ một phần năng lượng này trở lại bề mặt Trái Đất, giữ nhiệt lại bên trong khí quyển và làm tăng nhiệt độ tổng thể [29, 34]. Do đó, vào ban đêm hoặc những thời điểm mặt trời không chiếu sáng trực tiếp, sự xuất hiện của các đám mây tầng cao có thể làm tăng nhiệt độ không khí gần mặt đất bằng cách ngăn cản sự thất thoát nhiệt từ bề mặt Trái Đất ra ngoài không gian. Đây là lý do khiến các đêm nhiều mây tầng cao thường ấm hơn đáng kể so với các đêm trời quang mây. Hiệu ứng này giúp cân bằng một phần sự biến đổi nhiệt độ giữa ngày và đêm, giữa các mùa trong năm [29].

Vai trò trong chu trình nước khí quyển: Mặc dù bản thân mây tầng cao ít khi trực tiếp gây ra hiện tượng mưa do cấu tạo từ tinh thể băng nhỏ và mật độ thấp, nhưng chúng có vai trò gián tiếp quan trọng trong chu trình nước toàn cầu. Mây tầng cao có thể tạo điều kiện thuận lợi cho việc hình thành các hạt nhân ngưng kết, từ đó hỗ trợ cho sự phát triển của các loại mây thấp hơn, mây trung tầng hoặc các loại mây có khả năng gây mưa như mây Vũ Tích (Cumulonimbus) [33, 34]. Bên cạnh đó, các tinh thể băng từ mây tầng cao khi rơi xuống các tầng thấp hơn có thể tan chảy, góp phần bổ sung độ ẩm và hình thành các giọt nước, tạo thành điều kiện thích hợp để hình thành các loại mây thấp và trung tầng có khả năng gây mưa.

Ảnh hưởng tới thời tiết và khí hậu toàn cầu: Sự thay đổi trong đặc điểm vật lý, diện tích bao phủ và phân bố của mây tầng cao có tác động đáng kể đến mô hình thời tiết và khí hậu toàn cầu. Các nghiên cứu về tinh khí tượng cho thấy, sự thay đổi nhỏ về lượng mây tầng cao cũng có thể làm biến đổi đáng kể sự phân bố năng lượng trên Trái Đất, từ đó tác động đến các dòng hải lưu, chuyển động không khí và các hiện tượng thời tiết cực đoan như bão, hạn hán hoặc các đợt nắng nóng kéo dài [30, 34]. Hơn nữa, các thay đổi khí hậu toàn cầu, đặc biệt là hiện tượng nóng lên toàn cầu, được cho là nguyên nhân gây ra sự biến đổi mạnh về diện tích, mật độ, và đặc tính quang học của mây tầng cao. Những thay đổi này lại có khả năng tương tác trở lại và tiếp tục gây ra những hiệu ứng phức tạp hơn, làm tăng thêm tính khó dự đoán trong các mô hình dự báo khí hậu [34].



Hình 1.3. Tần suất xuất hiện toàn cầu hàng năm của mây Ti từ các phép đo radar kết hợp các phép đo lidar từ vệ tinh, Sassen và cộng sự (2008, Hình 1) [31, 100].

Sự xuất hiện và phân bố không gian của mây tầng cao chịu ảnh hưởng mạnh mẽ từ các yếu tố khí hậu, địa lý và điều kiện khí quyển. Các loại mây tầng cao như mây Ti, mây Ti-tầng và mây Ti-tích không phân bố đồng đều trên toàn cầu mà có sự biến đổi đáng kể tùy thuộc vào vĩ độ, mùa trong năm và điều kiện khí hậu đặc thù của từng khu vực [30, 31].

Phân bố địa lý và tần suất xuất hiện theo vĩ độ: Các nghiên cứu khí tượng, đặc biệt là các quan sát vệ tinh và radar, lidar khí quyển, cho thấy rằng mây tầng cao xuất hiện với tần suất cao nhất ở khu vực nhiệt đới và cận nhiệt đới (vĩ độ khoảng từ 0° đến 30°). Đây là những vùng khí hậu có điều kiện thuận lợi nhất cho việc hình thành mây tầng cao do lượng nhiệt lớn từ bức xạ mặt trời, sự đối lưu mạnh mẽ, cùng với độ ẩm cao được cung cấp từ đại dương rộng lớn [35]. Theo các quan sát từ vệ tinh khí tượng như Calipso và CloudSat, tần suất xuất hiện mây Ti ở các khu vực nhiệt đới có thể lên tới trên 50%, đặc biệt cao ở các khu vực như Nam Mỹ, Tây Phi, và vùng biển xung quanh Indonesia. Các khu vực này thường có điều kiện khí tượng nhiệt đới đặc trưng, dẫn đến sự hình thành mây tầng cao gần như liên tục. Trong khi đó, ở các vĩ độ trung bình và vùng ôn đới ($30^\circ - 60^\circ$ vĩ Bắc và Nam), tần suất xuất hiện của mây tầng cao dao động từ khoảng 20% đến 40%. Đây là khu vực chịu ảnh hưởng bởi sự giao thoa giữa các khối khí nóng và lạnh, tạo điều kiện thuận lợi cho việc hình thành các đám mây tầng cao nhưng với tần suất thấp hơn so với vùng nhiệt đới. Ở vùng cực (trên 60° vĩ Bắc và Nam), tần suất xuất hiện mây tầng cao thường thấp nhất, dao động từ 10% đến 20%. Lý do chủ yếu là không khí ở vùng cực thường rất lạnh và khô, thiếu hơi nước cần thiết cho quá trình hình thành tinh thể băng trong mây tầng cao [35, 36].

Sự biến thiên theo mùa: Tần suất xuất hiện của mây tầng cao cũng biến đổi rõ rệt theo mùa trong năm. Ví dụ, tại các khu vực nhiệt đới và cận nhiệt đới, mùa mưa với hoạt động đối lưu mạnh thường ghi nhận tần suất mây tầng cao cao hơn đáng kể so với mùa khô. Điều này liên quan đến độ ẩm khí quyển cao hơn và các hoạt động đối lưu khí quyển mạnh mẽ hơn trong mùa mưa, tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành các loại mây tầng cao [35, 36]. Tại các khu vực ôn đới và cận cực, sự biến đổi theo mùa cũng rất rõ ràng. Mùa đông thường ghi nhận sự xuất hiện thường xuyên hơn của mây tầng cao, chủ yếu do các hệ front lạnh và dòng khí quyển mạnh ở tầng cao (như luồng khí phản lực - jet stream) thường xuyên xuất hiện, thúc đẩy mạnh mẽ quá trình hình thành mây tầng cao. Ngược lại, vào mùa hè, tần suất xuất hiện mây tầng cao thường thấp hơn và ít ổn định hơn [36].

Phân bố theo độ cao trong khí quyển: Độ cao của mây tầng cao thay đổi tùy thuộc vào vĩ độ và điều kiện khí hậu địa phương. Ở khu vực nhiệt đới, mây tầng cao thường xuất hiện cao hơn đáng kể (có thể lên tới 16-18 km ở tầng đối lưu nhiệt đới), trong khi ở các vùng vĩ độ trung bình và cao hơn, độ cao xuất hiện của các loại mây tầng cao thường thấp hơn, dao động khoảng từ 6-12 km [36]. Các quan sát khí tượng vệ tinh cho thấy mây Ti thường hình thành ở độ cao lớn nhất, kể đến là mây Ti-tầng và cuối cùng là mây Ti-tích ở độ cao thấp hơn đôi chút. Sự phân bố theo độ cao này chủ yếu phụ thuộc vào cấu trúc nhiệt độ và độ ẩm của khí quyển ở từng khu vực và từng mùa cụ thể [31, 35].

Biến đổi khí hậu toàn cầu đã và đang làm thay đổi đáng kể các đặc điểm vật lý, diện tích bao phủ và độ dày của mây tầng cao. Sự nóng lên của khí quyển và các thay đổi trong độ ẩm làm tăng cường độ đối lưu, dẫn tới sự hình thành và phân bố mây tầng cao bị biến đổi rõ rệt. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng, khi nhiệt độ khí quyển tăng, độ cao trung bình của mây tầng cao cũng có xu hướng tăng lên [34, 37]. Đồng thời, diện tích bao phủ của mây tầng cao có thể tăng hoặc giảm tùy theo khu vực và mùa trong năm, làm thay đổi cân bằng bức xạ toàn cầu. Sự thay đổi này tạo ra những tác động kép phức tạp: một mặt, việc mây tầng cao tăng lên có thể phản xạ nhiều bức xạ mặt trời hơn và làm giảm phần nào tác động nóng lên toàn cầu; mặt khác, việc giữ nhiệt hiệu quả hơn vào ban đêm của các đám mây này lại góp phần làm gia tăng hiệu ứng nhà kính [34, 38]. Các mô hình khí hậu hiện đại vẫn đang tiếp tục nghiên cứu để hiểu rõ hơn những tương tác phức tạp này, nhằm dự báo chính xác hơn các tác động của biến đổi khí hậu trong tương lai. Hiện nay, việc nghiên cứu và quan sát mây tầng cao đã được hỗ trợ mạnh mẽ bởi các công nghệ hiện đại. Các phương pháp quan trắc chủ yếu bao gồm:

Quan sát vệ tinh: Sử dụng các vệ tinh khí tượng như Calipso, CloudSat để thu thập dữ liệu toàn cầu, giúp xác định diện tích bao phủ, độ dày, chiều cao và đặc tính quang học của mây tầng cao [36, 39].

Radar và Lidar: Các hệ radar và lidar trên vệ tinh và mặt đất cho phép đo chính xác chiều cao, cấu trúc thẳng đứng và thành phần của mây, đặc biệt hiệu quả với các loại mây có mật độ thấp như mây tầng cao [39].

Quan trắc trực tiếp từ máy bay và khí cầu: Các máy bay nghiên cứu hoặc khí cầu khí tượng được trang bị cảm biến đo trực tiếp các thông số như nhiệt độ, độ ẩm, cấu trúc tinh thể băng, và thành phần khí quyển bên trong mây tầng cao [33, 39].

Mô hình khí hậu và mô phỏng: Các mô hình khí hậu phức tạp giúp phân tích tác động của mây tầng cao lên cân bằng bức xạ toàn cầu, từ đó dự báo chính xác hơn các biến đổi khí hậu trong tương lai [34, 38, 40].

Mây tầng cao giữ vai trò quan trọng và phức tạp trong hệ khí hậu Trái Đất, ảnh hưởng mạnh mẽ đến cân bằng bức xạ, chu trình nước, và các hiện tượng thời tiết. Những hiểu biết hiện tại đã giúp cải thiện đáng kể dự báo khí hậu, nhưng vẫn còn nhiều thách thức do tính chất đa dạng và sự tương tác phức tạp của chúng với các thành phần khác trong khí quyển. Trong tương lai, các hướng nghiên cứu quan trọng cần được ưu tiên như: Nâng cao độ chính xác của quan sát vệ tinh và radar/lidar để cải thiện dữ liệu về phân bố và cấu trúc mây tầng cao. Tìm hiểu sâu hơn về cơ chế tương tác giữa mây tầng cao và biến đổi khí hậu toàn cầu và hoàn thiện các mô hình dự báo khí hậu bằng cách tích hợp tốt hơn các tác động của mây tầng cao. Các nghiên cứu này sẽ giúp con người hiểu rõ hơn về hệ khí hậu, từ đó đưa ra các biện pháp ứng phó hiệu quả hơn trước những thách thức từ biến đổi khí hậu toàn cầu.

1.1.4. Các kỹ thuật khảo sát khí quyển

Trong nghiên cứu khí quyển, có nhiều phương pháp và kỹ thuật khảo sát được sử dụng để thu thập thông tin về các thông số vật lý, hóa học và quang học của khí quyển. Hai nhóm phương pháp chính thường được sử dụng là phương pháp quan trắc trực tiếp và phương pháp viễn thám.

Kỹ thuật quan trắc trực tiếp

Kỹ thuật quan trắc trực tiếp là việc đo lường các thông số khí quyển bằng cách đưa các thiết bị trực tiếp vào khí quyển, tiếp xúc trực tiếp với môi trường đo, cung cấp số liệu rất chính xác về điều kiện cụ thể tại điểm đo nhưng lại hạn chế về không gian và thời gian đo [41]. Một trong những công cụ quan trắc khí quyển phổ biến, được sử dụng để thu thập dữ liệu khí tượng trực tiếp tại nhiều độ cao khác nhau đó là phương pháp bóng thám không [41]. Bóng thám không thường được làm từ chất liệu

cao su hoặc nhựa dẻo có khả năng đàn hồi tốt, bên trong chứa khí nhẹ (hydro hoặc heli), giúp bóng bay lên cao. Nó có thể mang theo các thiết bị đo lường khí tượng (gọi là radiosonde), bao gồm cảm biến đo nhiệt độ, áp suất, độ ẩm, vận tốc và hướng gió. Khi bóng bay lên, cảm biến radiosonde gắn bên dưới sẽ thu thập dữ liệu khí tượng và truyền tín hiệu về trạm quan trắc trên mặt đất [43]. Bóng thám không được ứng dụng để cung cấp thông tin về sự thay đổi của nhiệt độ, độ ẩm và áp suất khí quyển theo độ cao, giúp xây dựng các hồ sơ khí quyển và cung cấp dữ liệu đầu vào quan trọng cho các mô hình dự báo khí hậu và thời tiết [41, 44].

Tên lửa khí tượng là phương tiện quan trắc trực tiếp có khả năng đo các thông số khí quyển ở độ cao lớn hơn rất nhiều so với bóng thám không, thường đạt tới tầng bình lưu và tầng trung lưu [44]. Nguyên lý hoạt động tên lửa khí tượng mang theo các thiết bị đo nhỏ gọn để đo các thông số khí tượng (như nhiệt độ, áp suất, mật độ khí quyển, nồng độ các khí). Sau khi được phóng lên không trung, các thiết bị sẽ tiến hành đo các thông số cần thiết trong khi tên lửa bay qua các tầng khí quyển, dữ liệu được gửi về mặt đất thông qua hệ phát tín hiệu vô tuyến.

Ưu điểm: khả năng đạt đến độ cao rất lớn (thậm chí trên 50–100 km), phù hợp để khảo sát tầng bình lưu và tầng trung lưu. Hạn chế: chi phí thực hiện cao, thời gian đo rất ngắn (vài phút), dữ liệu thu được ít liên tục theo thời gian và không gian [44].

Kỹ thuật quan trắc gián tiếp

Kỹ thuật viễn thám là kỹ thuật đo từ xa, trong đó các thiết bị đo không cần trực tiếp tiếp xúc với vùng cần nghiên cứu mà sử dụng sóng điện từ để đo các thông số khí quyển từ xa. Các phương pháp này giúp khảo sát diện rộng, liên tục, và đặc biệt phù hợp với nghiên cứu khí quyển tầng cao, nơi khó tiếp cận bằng các thiết bị trực tiếp [42]. Các kỹ thuật viễn thám dựa trên việc sử dụng các loại sóng điện từ để đo từ xa các thông số khí quyển. Các hệ viễn thám phổ biến bao gồm radar khí tượng, vệ tinh, và lidar [42, 45].

Radar khí tượng

Radar khí tượng là thiết bị sử dụng sóng vô tuyến phát ra từ anten radar. Khi sóng vô tuyến gặp các hạt nước, tinh thể băng hoặc son khí trong khí quyển, nó sẽ phản hồi tín hiệu ngược trở lại radar. Bằng cách phân tích tín hiệu phản xạ, radar có thể xác định được độ cao, mật độ, chuyển động của các đám mây và hiện tượng mưa [45]. Radar khí tượng được dùng để dự báo và theo dõi mưa, giông bão, bão nhiệt đới, quan sát cấu trúc bên trong các hệ mây, cung cấp thông tin chi tiết về cấu trúc và động lực học mây.

Quan sát bằng vệ tinh khí tượng

Các vệ tinh khí tượng thường được trang bị các cảm biến hiện đại (cảm biến quang học, hồng ngoại và vi sóng), có khả năng quan sát diện rộng toàn cầu liên tục, cung cấp thông tin về phân bố, mật độ, nhiệt độ, và các đặc tính quang học của mây cũng như aerosol trong khí quyển [39, 42]. Vệ tinh khí tượng ứng dụng quan trắc khí hậu toàn cầu, theo dõi biến động dài hạn của các thành phần khí quyển. Cung cấp dữ liệu đầu vào cho các mô hình dự báo khí hậu, thời tiết, hỗ trợ công tác phòng chống thiên tai, thảm họa môi trường.

Kỹ thuật lidar (Light Detection and Ranging)

Lidar là kỹ thuật sử dụng ánh sáng laser để quan trắc khí quyển từ xa thông qua hiện tượng tán xạ (Rayleigh và Mie). Tín hiệu phản xạ trở lại lidar cung cấp thông tin về độ cao, cấu trúc tầng mây, aerosol, nhiệt độ và mật độ khí quyển [46]. Kỹ thuật lidar ứng dụng quan trắc aerosol, bụi, các thành phần khí quyển tầng cao. Xác định mật độ, nhiệt độ khí quyển chính xác ở các tầng khí quyển khó quan sát trực tiếp.

1.2. Kỹ thuật lidar

1.2.1. Tương tác của ánh sáng với khí quyển

Ánh sáng khi truyền qua khí quyển sẽ trải qua các tương tác khác nhau với các thành phần có trong khí quyển như hơi nước, các phân tử khí, aerosol và mây. Những tương tác này dẫn đến sự suy giảm năng lượng của ánh sáng khi nó truyền từ ngoài không gian đến bề mặt Trái Đất, chủ yếu thông qua hai quá trình quan trọng là tán xạ và hấp thụ [47].

Sự suy giảm năng lượng ánh sáng trong khí quyển

Ánh sáng Mặt trời khi đi vào khí quyển Trái Đất sẽ không giữ nguyên cường độ ban đầu mà bị suy giảm dần trên quãng đường lan truyền xuống bề mặt. Sự suy giảm này là kết quả tổng hợp từ các quá trình như tán xạ, hấp thụ và phản xạ. Mức độ suy giảm năng lượng ánh sáng phụ thuộc vào nhiều yếu tố như góc chiếu sáng của mặt trời, điều kiện khí tượng (độ ẩm, sự tồn tại của các loại mây và aerosol trong khí quyển) và đặc biệt là thành phần hóa học và vật lý của khí quyển tại từng khu vực và thời điểm quan sát [47, 48].

Trong khí quyển, năng lượng ánh sáng bị suy giảm mạnh nhất ở các vùng bước sóng cực tím (UV), bước sóng ngắn nhìn thấy (xanh, tím) và một số vùng trong dải hồng ngoại. Chính sự suy giảm này ảnh hưởng đến quá trình quang hợp, điều tiết nhiệt độ bề mặt trái đất và các quá trình khí tượng quan trọng khác [47].

Cơ chế tán xạ trong khí quyển

Tán xạ là hiện tượng xảy ra khi ánh sáng tương tác với các hạt vật chất có kích thước nhỏ hơn hoặc tương đương bước sóng ánh sáng, làm đổi hướng lan truyền của tia sáng nhưng không thay đổi bước sóng (tức là năng lượng của photon không bị hấp thụ). Có hai cơ chế tán xạ chính xảy ra trong khí quyển:

Tán xạ Rayleigh: xảy ra khi ánh sáng tương tác với các phân tử khí rất nhỏ trong khí quyển như O_2 , N_2 . Tán xạ Rayleigh rất mạnh với ánh sáng bước sóng ngắn (ánh sáng xanh lam, tím), cường độ tán xạ tỉ lệ với bước sóng theo hàm mũ λ^{-4} . Điều này giải thích tại sao bầu trời có màu xanh lam vào ban ngày và chuyển sang màu đỏ, cam khi bình minh hoặc hoàng hôn, do ánh sáng xanh bị tán xạ mạnh hơn so với ánh sáng đỏ [47, 49].

Tán xạ Mie: xảy ra khi ánh sáng tương tác với các hạt có kích thước lớn hơn hoặc xấp xỉ bước sóng ánh sáng, chẳng hạn như aerosol, các giọt nước và các tinh thể băng trong mây. Tán xạ Mie không phụ thuộc nhiều vào bước sóng, làm cho ánh sáng bị tán xạ đồng đều hơn ở các hướng. Loại tán xạ này có vai trò quan trọng trong các đám mây, đặc biệt là mây tầng cao, khi chúng gây ra hiện tượng như quầng sáng (halo) và các hiệu ứng quang học đặc biệt khác [29, 49].

Cơ chế hấp thụ trong khí quyển

Quá trình hấp thụ xảy ra khi các thành phần khí quyển thu nhận năng lượng của photon, chuyển hóa chúng thành năng lượng trong phân tử, khiến năng lượng ánh sáng giảm đi rõ rệt. Các thành phần quan trọng trong khí quyển tham gia quá trình hấp thụ bức xạ ánh sáng bao gồm:

Hơi nước (H_2O): hấp thụ mạnh ở nhiều bước sóng hồng ngoại, ảnh hưởng đáng kể đến cân bằng năng lượng khí quyển và hiệu ứng nhà kính [47, 48].

Ô dôn : hấp thụ mạnh ở dải bước sóng cực tím (UV), bảo vệ sinh vật trên bề mặt Trái Đất khỏi tác hại của bức xạ UV từ mặt trời [47].

Khí CO_2 và các khí nhà kính khác (như CH_4 , CO_2 , N_2O): hấp thụ hiệu quả các bước sóng hồng ngoại, giữ nhiệt trong khí quyển, góp phần làm gia tăng hiệu ứng nhà kính và điều hòa nhiệt độ Trái Đất [48, 50].

Aerosol và bụi: hấp thụ và phản xạ một phần ánh sáng mặt trời, làm giảm lượng bức xạ mặt trời đến bề mặt và tác động đến khí tượng và khí hậu [49, 50].

Những quá trình hấp thụ này không chỉ ảnh hưởng trực tiếp đến nhiệt độ và khí hậu toàn cầu, mà còn điều chỉnh đáng kể các điều kiện môi trường cần thiết cho sự sống trên hành tinh, kiểm soát nhiệt độ khí quyển và đóng vai trò then chốt trong các chu trình sinh-địa-hóa toàn cầu [50].

1.2.2. Tán xạ Rayleigh

Tán xạ Rayleigh là hiện tượng tán xạ ánh sáng xảy ra khi sóng điện từ (ánh sáng) tương tác với các phân tử khí có kích thước rất nhỏ, nhỏ hơn nhiều so với bước sóng ánh sáng tới (thông thường kích thước phân tử nhỏ hơn bước sóng khoảng 1/10) [47, 49]. Đây là hiện tượng phổ biến nhất xảy ra trong khí quyển Trái Đất, chủ yếu liên quan đến các phân tử khí như N_2 , O_2 , và các khí trơ khác. Khác với các dạng tán xạ khác, đặc điểm nổi bật của tán xạ Rayleigh là cường độ tán xạ phụ thuộc rất mạnh vào bước sóng ánh sáng, đặc biệt là các bước sóng ngắn (ánh sáng tím, xanh lam). Đây là lý do vì sao bầu trời có màu xanh lam vào ban ngày [47, 48].

Tiết diện mặt cắt tán xạ ngược sự phụ thuộc vào bước sóng λ^{-4} và quá trình này áp dụng đối với các hạt có bán kính nhỏ hơn $0,03\lambda$. Đối với một sóng tới có cường độ đồng nhất, cường độ tán xạ ở khoảng cách r tính từ điểm tán xạ tới bộ thu được xác định bởi [51].

$$I = \frac{16\pi^4 a^6}{r^2 \lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \sin^2(\theta) \quad (1.1)$$

Trong đó: I là cường độ tán xạ; n là chiết suất phức; a là bán kính hạt có dạng cầu; θ là góc hợp bởi phương tia tới và phương tán xạ của photon; r là khoảng cách từ điểm tán xạ tới bộ thu. Tiết diện tán xạ Rayleigh được tính bởi [51].

$$\sigma_R = \frac{128\pi^5 a^6}{3\lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \quad (1.2)$$

Tiết diện tán xạ ngược vi phân Rayleigh được tính theo hướng ngược chiều truyền ánh sáng trên một đơn vị góc khối [51].

$$\frac{d\sigma_R^{(\theta=\pi)}}{d\Omega} = \sigma_R^\pi = \frac{16\pi^4 a^6}{\lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \quad (1.3)$$

Do đó, từ (1.2) và (1.3):

$$\sigma_R = \frac{8\pi}{3} \sigma_R^\pi \quad (1.4)$$

Đối với hỗn hợp khí có trong khí quyển ở độ cao dưới 100 km, Collis và Russell đã tính toán cho thấy tiết diện tán xạ ngược vi phân Rayleigh là [52]:

$$\sigma_R^\pi(\lambda) = 5,45 \times \left(\frac{550}{\lambda} \right)^4 \times 10^{-32} m^2 sr^{-1} \quad (1.5)$$

Trong đó λ là bước sóng ánh sáng laser có đơn vị nm. Điều này cho thấy sự phụ thuộc bước sóng λ^{-4} của tiết diện tán xạ đàn hồi của tán xạ Rayleigh [51]. Nếu tính

đến hiệu ứng phân tán thì hệ số mũ thay đổi từ -4 đến -4,09, tương ứng với sự thay đổi trong tiết diện mặt cắt nhỏ hơn 3%. Shardanand và Rao đã chỉ ra rằng mối quan hệ theo phương trình (1.5) đúng đối với một số chất khí trong phạm vi bước sóng ánh sáng nhìn thấy. Đối với bước sóng laser $\lambda = 532$ nm thì σ_R^π có giá trị là [52]:

$$\sigma_R^\pi = 6,24 \times 10^{-32} \text{m}^2 \text{sr}^{-1}. \quad (1.6)$$

Nếu tất cả các phân tử tán xạ được coi là giống hệt nhau (môi trường đồng nhất) thì tổng cường độ tán xạ được mô tả bằng hệ số tán xạ phân tử trong một đơn vị thể tích $\alpha_{m,s}$ [52]:

$$\alpha_{m,s} = \rho_m \sigma_R. \quad (1.7)$$

Trong đó ρ_m là số phân tử khí trong một đơn vị thể tích. Hệ số tán xạ ngược phân tử với một đơn vị thể tích σ_m^π được định nghĩa tương tự và được xác định theo công thức [52]:

$$\beta_m^\pi = \rho_m \sigma_R. \quad (1.8)$$

Với σ_R^π đã biết, phép đo β_m^π có thể được sử dụng để xác định mật độ khí quyển bằng cách sử dụng (1.9). Do đó, đối với tán xạ phân tử thuần túy, hệ số tán xạ ngược Rayleigh được xác định theo công thức [52]:

$$\beta_m^\pi = \frac{3}{8\pi} \alpha_{m,s}. \quad (1.9)$$

Tổng hệ số tán xạ ngược trong một đơn vị thể tích β_T^π , là tổng tán xạ ngược của các phân tử và các hạt [52]:

$$\beta_T^\pi = \beta_m^\pi + \beta_p^\pi. \quad (1.10)$$

Bảng 1.3. Giá trị tiết diện tán xạ ngược và công nghệ khảo sát tương ứng [52, 53].

Công nghệ	Tiết diện tán xạ ngược $\frac{d\sigma_R^{(\theta=\pi)}}{d\Omega} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{sr}} \right]$	Áp dụng trong khảo sát khí quyển
Tán xạ Rayleigh	10^{-26}	Nhiệt độ/mật độ độ cao trên 30 km
Tán xạ Mie	10^{-8} đến 10^{-26}	Son khí/ mây độ cao dưới 30km
Tán xạ Raman	10^{-29}	N ₂ ; CO ₂ ; H ₂ O, nhiệt độ độ cao từ 15 đến 20 km
Hấp thụ	10^{-20}	Các khí vi lượng, O ₃ , CO ₂ , H ₂ O... độ cao tới 50 km

Các công thức (1.6)–(1.10) được áp dụng trong điều kiện khí quyển tầng cao, nơi mật độ khí thấp và tán xạ Rayleigh bởi phân tử không khí là cơ chế chi phối chính. Chúng giả định môi trường khí lý tưởng, không có hấp thụ đáng kể và không xét đến ảnh hưởng của son khí hoặc hạt bụi.

Một số yếu tố chính ảnh hưởng đến quá trình tán xạ Rayleigh bao gồm:

Kích thước hạt: Chủ yếu xảy ra với các phân tử khí rất nhỏ (kích thước nhỏ hơn khoảng $1/10$ bước sóng ánh sáng tới) [47, 51]. Bước sóng ánh sáng: Ánh sáng bước sóng ngắn (màu xanh lam, tím) bị tán xạ mạnh hơn rất nhiều so với bước sóng dài (đỏ, cam) [47, 49]. Mật độ và thành phần khí quyển: Khí quyển càng đặc và nhiều phân tử khí thì hiện tượng tán xạ Rayleigh càng mạnh [51].

Tán xạ Rayleigh đóng vai trò rất quan trọng trong nghiên cứu khí quyển. Việc hiểu rõ về hiện tượng này cho phép các nhà khí tượng học và các nhà khoa học khí quyển phát triển các kỹ thuật đo đạc hiện đại như lidar, được sử dụng để xác định nồng độ các phân tử khí, đo nhiệt độ khí quyển, mật độ khí quyển và các thông số vật lý khác ở độ cao lớn [52, 54]. Các phép đo lidar dựa trên nguyên lý tán xạ Rayleigh được sử dụng rộng rãi để nghiên cứu tầng khí quyển cao. Lidar Rayleigh có thể đo chính xác sự phân bố nhiệt độ và mật độ khí quyển ở các độ cao từ 10 km đến khoảng 90 km, cung cấp dữ liệu quan trọng để hiểu rõ hơn về các hiện tượng khí quyển tầng cao, bao gồm cả quá trình biến đổi khí hậu toàn cầu [52, 53, 54]. Hiểu rõ cơ chế vật lý và tính chất của tán xạ Rayleigh còn hỗ trợ phát triển các mô hình dự báo khí tượng và nghiên cứu sự hình thành và biến đổi mây tầng cao, chu trình năng lượng bức xạ trong khí quyển và sự tương tác ánh sáng mặt trời với khí quyển Trái Đất [54].

1.2.3. Tán xạ Mie

Tán xạ Mie được phát triển bởi Gustav Mie, người đã đưa ra nghiệm giải tích cho tán xạ của một bức xạ có bước sóng bất kỳ bởi một hạt cầu có bán kính bất kỳ và chiết suất phức bất kỳ. Tán xạ Mie không bị giới hạn bởi kích thước hạt tán xạ, nó bao gồm cả tán xạ Rayleigh. Tuy nhiên, thuật ngữ tán xạ Mie thường được dùng để chỉ tán xạ bởi những hạt có kích thước tương đương hoặc lớn hơn với kích thước của bước sóng bức xạ tới [47, 49].

Khác với tán xạ Rayleigh, cường độ và hướng tán xạ trong hiện tượng Mie không phụ thuộc mạnh theo bước sóng mà chủ yếu phụ thuộc vào kích thước, hình dạng và chiết suất của hạt [49, 55]. Khi kích thước hạt lớn dần và xấp xỉ hoặc vượt bước sóng ánh sáng tới, hướng tán xạ trở nên tập trung về phía trước nhiều hơn (tán xạ thuận), khác biệt rõ ràng so với tán xạ Rayleigh (phân bố đều theo hướng).

Khi kích thước hạt rất lớn, hiện tượng tán xạ trở nên gần giống với phản xạ hình

học. Điều này đặc biệt quan trọng trong nghiên cứu các đám mây khí quyển, đặc biệt là mây tầng cao, vì các tinh thể băng và các giọt nước có kích thước đa dạng thường dao động xung quanh bước sóng ánh sáng nhìn thấy [29, 54].

Xét sóng phẳng đơn sắc bước sóng λ và số sóng $k = 2\pi/\lambda$ truyền tới một hạt hình cầu có bán kính a . Hệ số suy hao có dạng [55]:

$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^N (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \quad (1.11)$$

trong đó $x = ka = \frac{2\pi a}{\lambda}$ là tham số kích thước hạt, a là bán kính hạt hình cầu, a_n và b_n là các hệ số Mie phụ thuộc vào tham số bán kính hạt a và chiết suất phức m . Hệ số tán xạ có dạng [55]:

$$Q_{sca} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^N (2n+1) \operatorname{Re}(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (1.12)$$

Các cường độ tán xạ được tính như sau [55]:

$$S_1(\mu) = \sum_{n=1}^N \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\mu) + b_n \tau_n(\mu)] \quad (1.13)$$

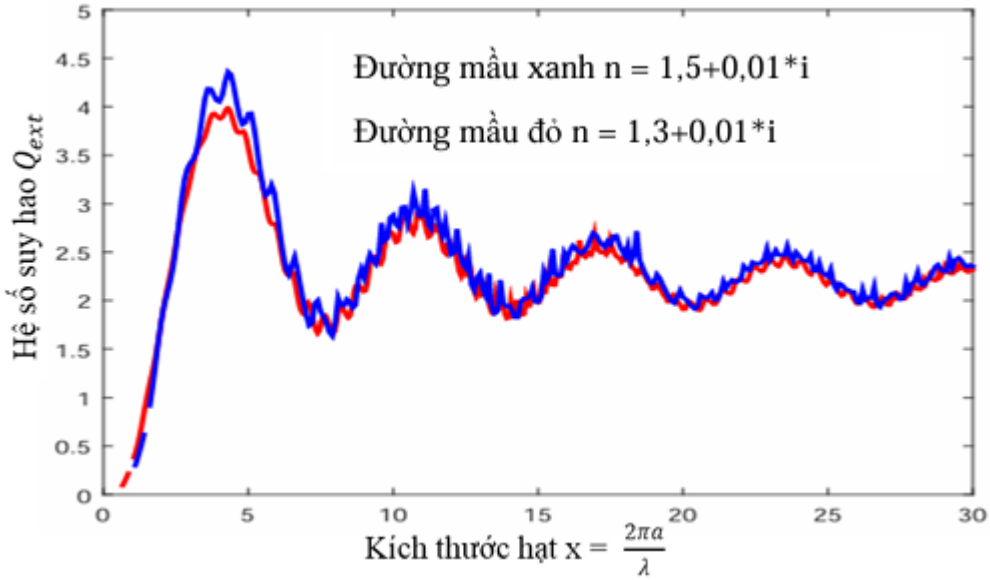
$$S_2(\mu) = \sum_{n=1}^N \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\mu) + b_n \pi_n(\mu)] \quad (1.14)$$

với $\mu = \cos\theta$ với θ là góc tán xạ, $|S_1|^2$ và $|S_2|^2$ là các cường độ tán xạ. Các hệ số Mie có dạng hàm cầu Bessel. π_n và τ_n là các hàm trị riêng góc có dạng [55]:

$$\pi_n(\mu) = P_n(\mu) \quad (1.15)$$

$$\tau_n(\mu) = \mu \pi_n(\mu) - (1 - \mu^2) \pi_n'(\mu) \quad (1.16)$$

Trong đó P_n là các đa thức Legendre bậc n , biểu diễn sự phụ thuộc góc của cường độ tán xạ. Các công thức này được xây dựng dựa trên lý thuyết tán xạ Mie, áp dụng trong điều kiện hạt tán xạ có dạng hình cầu, đồng chất về cấu trúc và có chiết suất đã biết. Môi trường được coi là không hấp thụ, và số Mie nằm trong khoảng cho phép tính tiệm cận chính xác bằng các hàm Bessel-Ricatti.



Hình 1.4. Dạng hàm hệ số suy hao của một hạt nước hình cầu đồng nhất [55].

Trên Hình 1.4 biểu diễn hàm hệ số suy hao Q_{ext} theo tham số kích thước $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$ của một hạt nước hình cầu đồng nhất với hai giá trị chiết suất. Đường màu xanh có hấp thụ yếu, đường màu đỏ không hấp thụ. Biểu đồ cho thấy các dao động đặc trưng của hệ số suy hao theo lý thuyết Mie. Sự thay đổi về chiết suất dẫn đến các khác biệt rõ rệt về cường độ suy hao tại các kích thước hạt nhất định.

Theo lý thuyết tán xạ Mie, các hệ số tán xạ a_n và b_n được biểu diễn bởi hàm Bessel – Ricatti Φ_n , ξ_n và đạo hàm của chúng [55]:

$$a_n = \frac{\phi'_n(mx)\phi_n(x) - m\phi_n(mx)\phi'_n(x)}{\phi'_n(mx)\xi_n(x) - m\phi_n(mx)\xi'_n(x)} \quad (1.17)$$

$$b_n = \frac{m\phi'_n(mx)\phi_n(x) - \phi_n(mx)\phi'_n(x)}{m\phi'_n(mx)\xi_n(x) - \phi_n(mx)\xi'_n(x)} \quad (1.18)$$

Trong đó $x = ka = \frac{2\pi a}{\lambda}$ là tham số liên quan đến kích thước hạt, với các hệ số tán xạ Mie a_n và b_n , ta có thể xác định được các đại lượng liên quan đến quá trình tán xạ và hấp thụ ánh sáng của hạt cầu. Bằng cách tính công suất toàn phần W_a mà năng lượng điện từ chuyển qua bề mặt hạt son khí hình cầu, ta có thể nhận được các tiết diện ngang cho hạt cầu có bán kính a . Tiết diện tán xạ của hạt có dạng cầu là [55]:

$$\sigma_{sca} = \frac{W_s}{I_i} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (1.19)$$

Tiết diện suy hao [55]:

$$\sigma_{ext} = \frac{W_{ext}}{I_i} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (1.20)$$

Tiết diện hấp thụ [55]:

$$\sigma_{abs} = \sigma_{ext} - \sigma_{sca} \quad (1.21)$$

Sự phụ thuộc của cường độ tán xạ vào bước sóng là một hàm của bán kính hạt tán xạ, liên quan chặt chẽ đến bước sóng chiếu tới và chiết suất phức của hạt. Trong vùng kích thước hạt tương đương với bước sóng ánh sáng (đặc trưng bởi tham số kích thước $x \sim 1$), sự thay đổi của cường độ tán xạ theo bước sóng trở nên rõ rệt, cung cấp cơ sở để khai thác thông tin về đặc tính vật lý của hạt son khí [55]. Khi sử dụng các nguồn laser với bước sóng khác nhau, người ta có thể thu được tín hiệu tán xạ có độ nhạy cao với kích thước hạt trong khoảng từ 50 nm đến vài micromet – đây là vùng kích thước đặc trưng của son khí khí quyển.

Tán xạ Mie có nhiều ứng dụng thực tiễn trong nghiên cứu khí tượng và khí hậu học. Một trong những ứng dụng chủ đạo là việc triển khai lidar Mie để đo đạc và khảo sát các tính chất quang học và động lực học của son khí, bụi và mây [56, 57]. Nhờ sự phụ thuộc mạnh vào kích thước và chiết suất hạt, lidar dựa trên tán xạ Mie có thể cung cấp thông tin về mật độ, kích thước, độ cao phân bố, và sự biến đổi theo thời gian của các hạt trong khí quyển.

Các thông số thu được từ lidar Mie đóng vai trò quan trọng trong nhiều ứng dụng nghiên cứu và giám sát khí quyển. Cụ thể:

- Xác định đặc tính vật lý, độ dày và diện tích bao phủ của các đám mây, đặc biệt là các loại mây tầng cao có ảnh hưởng mạnh đến cân bằng bức xạ [56].
- Phân tích nồng độ và phân bố son khí trong khí quyển, qua đó làm rõ tác động của son khí đến hiệu ứng nhà kính, biến đổi khí hậu và chất lượng không khí [57].
- Cải thiện độ chính xác của các mô hình khí hậu bằng cách cung cấp các phép đo thực nghiệm về đặc tính quang học của khí quyển như hệ số tán xạ, độ sâu quang học (AOD), và phân bố theo độ cao [58].

Nhờ những khả năng này, lidar Mie trở thành một công cụ không thể thiếu trong các chương trình nghiên cứu khí hậu, giám sát môi trường và hệ thống dự báo khí tượng hiện đại.

1.2.4. Cơ sở lý thuyết xác định phân bố nhiệt độ

Lidar đàn hồi có cấu trúc đơn giản nhất trong các hệ lidar, thường được sử dụng để thu thập thông tin về sự phân bố theo chiều cao của khí quyển dựa trên tín hiệu tán xạ ngược tại cùng bước sóng với laser phát. Trong quá trình xử lý dữ liệu tán xạ đàn

hồi ngược, một vấn đề xuất hiện đó là hai đại lượng chưa biết hệ số tán xạ đàn hồi ngược $\beta(R)$ và hệ số suy hao $\alpha(R)$, xuất hiện trong phương trình lidar (1.22) trong khi chỉ phát hiện được một tín hiệu tán xạ đàn hồi [56]:

$$P_{\lambda_0}(R) = \frac{P_{0,\lambda_0} \tau \cdot c \cdot A_T}{2} \frac{\eta_{\lambda_0} O(R)}{R^2} \beta_{\lambda_0}(R) \exp \left[-2 \int_0^R \alpha_{\lambda_0}(R) dR \right]. \quad (1.22)$$

trong đó λ_0 là bước sóng laser, P_{0,λ_0} là số photon phát lên bầu trời, $P_{\lambda_0}(R)$ là số photon thu được, τ là độ rộng xung laser, c là tốc độ ánh sáng trong chân không, A_T là diện tích bộ thu quang học, η_{λ_0} là hiệu suất hệ quang điện ở bước sóng λ_0 , $O(R)$ là hàm chồng chập, $\beta_{\lambda_0}(R)$ là hệ số tán xạ đàn hồi ngược ở bước sóng λ_0 ở khoảng cách R , $\alpha_{\lambda_0}(R)$ là hệ số suy hao ở bước sóng λ_0 ở khoảng cách R [57].

$$\beta_\lambda(R) = \beta_\lambda^P(R) + \beta_\lambda^m(R), \quad (1.23)$$

trong đó $\beta_\lambda^P(R)$, $\beta_\lambda^m(R)$ là hệ số tán xạ đàn hồi ngược của các hạt và phân tử, chúng có đơn vị là $m^{-1}sr^{-1}$ [57].

$$\alpha_\lambda(R) = \alpha_\lambda^P(R) + \alpha_\lambda^m(R), \quad (1.24)$$

trong đó $\alpha_\lambda^P(R)$, $\alpha_\lambda^m(R)$ tương ứng là hệ số suy hao của các hạt và phân tử, chúng có đơn vị là m^{-1} . Theo phương trình (1.23) và (1.24), hệ số tán xạ đàn hồi ngược và hệ số suy hao có sự đóng góp của các hạt và các phân tử. Vì $\beta(R)$ và $\alpha(R)$ không thể được truy xuất độc lập với nhau nên tỷ số suy hao/tán xạ ngược (hoặc tỷ số lidar) đối với các hạt và phân tử tương ứng được sử dụng để thay thế một trong hai ẩn số [57].

$$S^P(R) = \frac{\alpha^P(R)}{\beta^P(R)} \quad (1.25)$$

$$S^m = \frac{\alpha^m(R)}{\beta^m(R)} \approx \frac{8\pi}{3} sr \quad (1.26)$$

Tỷ số lidar đối với các phân tử S^m có giá trị không đổi theo độ cao và có giá trị là $\frac{8\pi}{3} sr$. Tỷ số lidar đối với các hạt $S^P(R)$ phụ thuộc vào kích thước, hình dạng và chiết suất của các hạt tán xạ. Trong trường hợp khảo sát lớp son khí phức tạp với các lớp có nguồn gốc khác nhau, tỷ số lidar của các hạt tán xạ có sự thay đổi mạnh dọc theo đường truyền ánh sáng laser. Trong trường hợp đó, sự phụ thuộc vào độ cao của tỷ số lidar có thể gây ra sai số lớn khi truy xuất hệ số tán xạ ngược β và hệ số suy hao α của môi trường truyền sáng. Theo phương pháp của Klett, hệ số tán xạ ngược có thể được tính bằng cách sử dụng một giá trị tham khảo của tỷ số lidar với hạt tán xạ [59].

$$\beta^P(R) = -\beta^m(R) + \frac{U(R, R_0)}{V(R_0) - 2 \int_{R_0}^R S^P(R) U(R, R_0) dR} \quad (1.27)$$

với

$$U(R, R_0) = P(R) R^2 \exp \left[-2 \int_{R_0}^R [S^P(R) - S^m] \beta^m(R) dR \right] \quad (1.28)$$

và

$$V(R_0) = \frac{P(R_0) R_0^2}{\beta^P(R_0) + \beta^m(R_0)} \quad (1.29)$$

Để có được các tệp số liệu của hệ số tán xạ đàn hồi ngược đối với các hạt tán xạ, phải chọn giá trị tham khảo $\beta^P(R_0)$ ở độ cao tham khảo R_0 . Độ cao tham khảo được chọn ở lớp không khí không chứa son khí do đó hệ số tán xạ ngược của son khí là không đáng kể $\beta^P(R_0) \approx 0$. Do khả năng bị triệt tiêu ở mẫu số (1.27), nghiệm của thuật toán Klett có thể trở nên không xác định nếu tỷ lệ lidar được chọn không phù hợp. Để thu được các kết quả đáng tin cậy về mặt vật lý, các cận lấy tích phân trong phương trình (1.27) được hoán đổi và tích phân ngược được thực hiện bằng cách đặt $R_0 > R$. Phương pháp này được gọi là thuật toán ngược Klett và trong thực tế luôn cho kết quả ổn định [59]. Hệ số suy hao do các hạt có thể thu được bằng cách nhân hệ số tán xạ ngược của hạt tán xạ thu được bằng phương pháp của Klett với tỷ số lidar của các hạt tán xạ.

Ngoài phương pháp Klett, phép đo tán xạ Raman cho phép tính toán độc lập các hệ số tán xạ ngược và hệ số suy hao của hạt do đó đo trực tiếp tỷ lệ lidar của hạt [60]. Lidar Raman được trang bị các kênh sử dụng kính lọc đơn sắc để chọn lựa ánh sáng bị tán xạ ngược không đàn hồi [56]. Đối với các phép đo son khí, người ta thường sử dụng tán xạ Raman từ Nitơ làm khí tham chiếu với mật độ phân tử đã biết. Các hệ lidar Raman thường đo tán xạ Raman- dao động vì có sự dịch chuyển bước sóng đáng kể giữa ánh sáng tới và ánh sáng tán xạ Raman. Phương trình lidar khi tính đến dịch chuyển bước sóng do tán xạ Raman từ bước sóng laser λ_0 dịch tới bước sóng Raman λ_R [60]:

$$P_{\lambda_R}(R) = \frac{P_{0,\lambda_0} \tau \cdot c \cdot A_T \eta_{\lambda_R} O(R)}{2 R^2} \beta_{\lambda_R}(R) \exp \left[- \int_0^R [\alpha_{\lambda_0}(R) + \alpha_{\lambda_R}(R)] dR \right] \quad (1.30)$$

Trong đó, $P_{\lambda_R}(R)$ là số photon từ tán xạ ngược Raman của phân tử Ni tơ, P_{0,λ_0} là số photon của laser phát, λ_0, λ_R là bước sóng laser và bước sóng Raman, A_T là diện tích bộ thu quang học, η_{λ_R} là hiệu suất hệ thu quang điện ở bước sóng λ_R , $O(R)$ là hàm chồng chập, $\alpha_{\lambda_0}(R)$ là hệ số suy hao của ánh sáng laser, $\alpha_{\lambda_R}(R)$ là hệ số suy hao

của ánh sáng bước sóng Raman λ_R , $\beta_{\lambda_R}(R)$ là hệ số tán xạ ngược Raman của phân tử Ni tơ được mô tả bởi công thức sau:

$$\beta_{\lambda_R}(R) = \rho_N(R) \frac{d\sigma_N(\pi)}{d\Omega} \quad (1.31)$$

Với $\frac{d\sigma_N(\pi)}{d\Omega}$ là tiết diện tán xạ ngược Raman độc lập khoảng cách của phân tử Ni tơ và $\rho_N(R)$ là mật độ phân tử Ni tơ. Phương trình lidar (1.30) có sự thay đổi so với phương trình (1.22) vì ánh sáng lúc này bị suy giảm ở bước sóng λ_0 trên đường tới nơi tán xạ và ở bước sóng λ_R trên đường quay trở lại hệ thu lidar. Tán xạ ngược Raman hoàn toàn do các phân tử và việc thu được ánh sáng tán xạ Raman cho phép tính toán trực tiếp hệ số suy hao từ tín hiệu Raman thu được [60].

$$\alpha_{\lambda_0}^P(R) = \frac{\frac{d}{dR} \ln \left[\frac{\rho_N(R)}{P_{\lambda_R}(R) R^2} \right] - \alpha_{\lambda_0}^m(R) - \alpha_{\lambda_R}^m(R) + \frac{d}{dR} \ln O_{\lambda_R}(R)}{1 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_R} \right)^{\alpha(R)}} \quad (1.32)$$

Sự kết hợp của các tín hiệu thu được từ các kênh tán xạ đàn hồi ngược và tán xạ Raman cung cấp hai tín hiệu độc lập để rút ra hai ẩn số trong phương trình (1.9). Hệ số tán xạ ngược của hạt có thể được tính bởi (1.12).

$$\begin{aligned} \beta_{\lambda_0}^P(R) = & -\beta_{\lambda_0}^m(R) + [\beta_{\lambda_0}^P(R_0) + \beta_{\lambda_0}^m(R_0)] \times \frac{P_{\lambda_R}(R_0) P_{\lambda_0}(R)}{P_{\lambda_0}(R_0) P_{\lambda_R}(R)} \frac{\rho_N(R)}{\rho_N(R_0)} \\ & \times \frac{\exp \left[-\int_{R_0}^R [\alpha_{\lambda_R}^P(R) + \alpha_{\lambda_R}^m(R)] dR \right]}{\exp \left[-\int_{R_0}^R [\alpha_{\lambda_0}^P(R) + \alpha_{\lambda_0}^m(R)] dR \right]} \end{aligned} \quad (1.33)$$

Với giá trị hệ số suy hao và hệ số tán xạ ngược thu được từ hệ lidar Raman cho phép xác định được mật độ phân tử khí quyển từ đó xác định được phân bố nhiệt độ.

Phân bố nhiệt độ khí quyển có thể được tính từ mật độ phân tử khí quyển dựa trên giả thiết về trạng thái cân bằng thủy tĩnh và định luật khí lý tưởng [61]:

$$dPa(z) = -m \cdot \rho(z) \cdot g(z) \cdot dz \quad (1.34)$$

Trong đó, Pa là áp suất khí quyển, $\rho(z)$ là mật độ phân tử khí, $g(z)$ là gia tốc trọng trường, m là khối lượng phân tử trung bình, áp suất có thể được xác định bằng cách lấy tích phân hai vế phương trình (1.34):

$$Pa(z) = Pa(z_{ref}) + \int_0^{z_{ref}} m \rho(z') g(z') dz' \quad (1.35)$$

Trong đó, z_{ref} là độ cao tham khảo ở lớp biên của khí quyển nơi không có sự hiện diện của son khí. Kết hợp với phương trình trạng thái khí lý tưởng [60]:

$$Pa(z) = \frac{R}{m} \rho(z) T(z) \quad (1.36)$$

Trong đó, R là hằng số khí lý tưởng. Nhiệt độ được xác định theo độ cao bởi phương trình [62]:

$$T(z) = \frac{\rho(z_{ref})}{\rho(z)} T(z_{ref}) + \frac{m}{R\rho(z)} \int_0^{z_{ref}} \rho(z') g(z') dz' \quad (1.37)$$

Trong đó, T (z_{ref}) là nhiệt độ tham chiếu liên kết nhận được từ dữ liệu khác ở độ cao tham khảo z_{ref}, m là khối lượng phân tử trung bình trong khí quyển, R là hằng số mol khí, g (z) là gia tốc trọng trường, ρ (z) là mật độ phân tử trong khí quyển. Sử dụng các giá trị tham khảo ban đầu ρ(z_{ref}) và T(z_{ref}) ở lớp biên cao nhất, nhiệt độ T(z) có thể được dẫn ra từ các bước liên tiếp từ các giá trị tham khảo này [62]:

$$T(z_{i+1}) = \frac{\rho(z_i)}{\rho(z_{i+1})} T(z_i) + \frac{m}{R\rho(z_{i+1})} \bar{g}\bar{\rho}\Delta z \quad (1.38)$$

ở đây, z_i, z_{i+1} là độ cao của các khoảng không gian (range bins) liên tiếp trong phân bố không gian của khí quyển [62].

$$\Delta z = z_{i+1} - z_i \quad (1.39)$$

và $\bar{g}$ và $\bar{\rho}$ là gia tốc trọng trường trung bình và mật độ phân tử trung bình ở trong khoảng z_i, and z_{i+1}. $\bar{g}$ có thể được tính theo công thức xấp xỉ sau đây [62]:

$$\bar{g} = g(z_i + z_{i+1})/2 \quad (1.40)$$

Trong đó mật độ phân tử khí trung bình phải tính đến sự phụ thuộc theo qui luật hàm e mũ của độ cao, nên mật độ có thể tính theo công thức xấp xỉ sau [62]:

$$\rho(z) = \rho(z_i) \exp(-b(z - z_i)) \rightarrow \rho(z_{i+1}) = \rho(z_i) \exp(-b\Delta z) \quad (1.41)$$

ở đây, b là hằng số, kết quả là:

$$\bar{\rho} = \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\rho(z')}{\Delta z'} dz' = \frac{\rho(z_i) - \rho(z_{i+1})}{b\Delta z} \quad (1.42)$$

Khi lấy loga hai vế phương trình (1.41) chúng ta thu được:

$$\ln \frac{\rho(z_i + 1)}{\rho(z_i)} = -b\Delta z \quad (1.43)$$

và chúng ta thu được giá trị mật độ phân tử trung bình [62].

$$\bar{\rho} = \frac{\rho(z_i) - \rho(z_{i+1})}{\ln \left(\frac{\rho(z_i)}{\rho(z_{i+1})} \right)} \quad (1.44)$$

Cuối cùng, nhiệt độ được xác định bởi công thức sau [62].

$$T(z_{i+1}) = \frac{\rho(z_i)}{\rho(z_{i+1})} T(z_i) + \frac{mg(\frac{z_i+z_{i+1}}{2})}{R \cdot \rho(z_{i+1})} \Delta z \frac{\rho(z_i) - \rho(z_{i+1})}{\ln(\frac{\rho(z_i)}{\rho(z_{i+1})})} \quad (1.45)$$

Phương trình (1.45) chỉ ra rằng phân bố nhiệt độ chỉ phụ thuộc vào tỉ số mật độ phân tử giữa hai khoảng không gian (range-bin) liên tiếp, do đó nhiệt độ là độc lập với giá trị mật độ phân tử tham khảo trong công thức tính mật độ trong gần đúng bậc một [62]. Hơn nữa, phương trình (1.37) độ cao tham khảo z_{ref} phải được chọn ở lớp biên cao nhất hoặc lớp biên thấp nhất ở độ cao nơi tích phân được bắt đầu. Phân bố nhiệt độ có thể được tích phân theo độ cao từ trên xuống hoặc từ dưới lên. Tuy nhiên, nếu tích phân được tính từ dưới lên thì sai số sẽ tăng theo hàm e mũ do có sự xuất hiện của lớp son khí bề mặt. Ngược lại, khi giá trị tham khảo ở lớp biên cao nhất được chọn nơi không có hoặc rất ít son khí, khi đó tích phân được lấy từ trên xuống, sai số nhiệt độ có thể giảm nhanh. $T(z_{\text{ref}})$ có thể nhận được từ phép đo khác hoặc mô hình khí quyển MSISE [63]. Các công thức đưa ra dựa trên giả thiết khí quyển tuân theo điều kiện đẳng nhiệt hoặc biến thiên tuyến tính trong từng lớp mỏng, với áp suất và mật độ tuân theo phân bố hàm mũ. Ngoài ra, cần giả định môi trường không có dòng chảy rối và ảnh hưởng từ gió lớn bị bỏ qua.

1.2.5. Đo đạc khoảng cách lớn

Kỹ thuật lidar là phương pháp hiện đại và hiệu quả trong nghiên cứu khí quyển từ xa [64]. Tuy nhiên, lidar cũng gặp một số giới hạn nhất định khi đo khoảng cách lớn, đặc biệt là khi khảo sát các tầng cao của khí quyển. Một trong những giới hạn chính là sự suy giảm tín hiệu đáng kể do khoảng cách xa, đặc biệt khi vượt quá 30–50 km, khiến tín hiệu phản xạ thu nhận rất yếu, dễ bị nhiễu nền và nhiễu nền khí quyển gây sai số lớn trong đo đạc.

Ngoài ra, mật độ khí quyển giảm mạnh ở các tầng cao như tầng bình lưu và tầng trung lưu, dẫn đến giảm mạnh cường độ tín hiệu phản xạ. Điều này đòi hỏi hệ lidar phải có công suất laser phát rất lớn, độ nhạy của hệ thu cao, và xử lý tín hiệu tốt để thu nhận các tín hiệu yếu từ tầng khí quyển rất cao.

Dù có những hạn chế, lidar vẫn là công cụ rất hiệu quả để đo đạc các thông số vật lý quan trọng như mật độ không khí, nhiệt độ khí quyển, thành phần aerosol và các đặc trưng quang học khác. Các hệ lidar Rayleigh, lidar Raman và lidar Mie được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu khí quyển tầng cao [60]. Lidar Rayleigh dùng để đo mật độ không khí và nhiệt độ ở tầng khí quyển cao dựa trên nguyên lý tán xạ Rayleigh. Lidar Raman cung cấp phép đo chính xác nhiệt độ và mật độ khí quyển bằng cách phân tích các tín hiệu phát ra từ tán xạ Raman của các phân tử khí cụ thể (như nitơ và hơi nước). Trong khi lidar Mie chủ yếu được sử dụng để đo aerosol, bụi

và các đám mây tầng cao, cung cấp các thông số như diện tích bao phủ, độ dày, và kích thước hạt.

Một hệ lidar quang học tối ưu cho nghiên cứu khí quyển tầng cao thường yêu cầu: Nguồn phát laser mạnh và ổn định, sử dụng laser có công suất lớn, độ rộng xung ngắn (nano giây), bước sóng phù hợp (thường từ UV đến hồng ngoại gần), đảm bảo xuyên qua khí quyển xa, giảm nhiễu nền và tăng độ phân giải không gian. Với hệ thu tín hiệu phải có độ nhạy cao, kính thu có diện tích lớn và quang điện tử nhạy (như photomultiplier hoặc avalanche photodiode) nhằm thu tín hiệu tán xạ rất yếu từ khoảng cách lớn. Bộ lọc quang học chính xác, giúp lọc hiệu quả ánh sáng nhiễu nền (như ánh sáng mặt trời, phản xạ từ mặt đất) và lựa chọn các bước sóng tán xạ đặc trưng, tăng khả năng phát hiện tín hiệu lidar rõ nét và chính xác hơn.

Việc tối ưu hóa cấu hình hệ lidar như trên giúp tăng cường khả năng đo đạc chính xác các thông số vật lý của khí quyển ở khoảng cách lớn, giúp nâng cao chất lượng dữ liệu thu được và phục vụ hiệu quả hơn trong nghiên cứu khí quyển tầng cao, khí hậu toàn cầu và biến đổi khí hậu [65].

1.3. Ứng dụng kỹ thuật lidar trong nghiên cứu khí quyển.

1.3.1. Trên thế giới

Trên thế giới, nhiều quốc gia như Hoa Kỳ, Nhật Bản, Đức và Ấn Độ đã đầu tư mạnh vào nghiên cứu khí quyển tầng cao, chủ yếu ở các khu vực vĩ độ trung bình và cao. Trong khi đó, khu vực Đông Nam Á và các nước ở vĩ độ thấp, như Việt Nam, vẫn còn tương đối ít các nghiên cứu chi tiết về tầng khí quyển cao. Do đó, việc triển khai các nghiên cứu khí quyển tầng cao tại Việt Nam không chỉ có ý nghĩa khoa học trong nước mà còn góp phần bổ sung dữ liệu quan trọng cho khu vực châu Á – Thái Bình Dương.

Một ví dụ điển hình về nghiên cứu lidar tại vùng vĩ độ thấp là nhóm nghiên cứu tại trạm Guru Shikhar, núi Abu, Ấn Độ. Trong giai đoạn từ 1997 đến 2001, nhóm này đã triển khai một hệ thống lidar Rayleigh để khảo sát sự phân bố nhiệt độ và mật độ khí quyển ở độ cao từ 30 km đến 75 km [68]. Dữ liệu được thu thập trong 109 đêm quan sát, với mỗi lần đo được thực hiện theo chế độ đếm photon tích phân liên tục 10 phút, đạt độ chính xác cao và độ phân giải theo độ cao tốt, đặc biệt dưới 50 km.

Hệ thống lidar sử dụng laser Nd:YAG bước sóng 532 nm, kết hợp với kính thu đường kính 40 cm, cho phép thu nhận tín hiệu tán xạ yếu từ các tầng cao của khí quyển. Điều kiện đo yêu cầu trời quang đãng, không có mây, đặc biệt khi khảo sát độ cao trên 70 km.

Từ dữ liệu đo được, nhóm nghiên cứu đã áp dụng các phương trình trạng thái khí lý tưởng và điều kiện cân bằng thủy tĩnh để tính toán phân bố nhiệt độ khí quyển. Đồng thời, họ cũng phân tích các dao động về nhiệt độ và mật độ để xác định đặc trưng sóng trọng lực trong tầng khí quyển cao – một yếu tố quan trọng trong việc hiểu rõ động lực khí quyển ở tầng bình lưu và trung lưu.

Mặc dù đạt được nhiều kết quả khoa học có giá trị, nghiên cứu cũng chỉ ra những thách thức lớn trong việc giám sát liên tục các tầng khí quyển cao. Sự biến động nhanh và theo thời gian ngắn của các thông số khí quyển, cùng với hạn chế từ điều kiện quan sát, khiến cho việc duy trì chuỗi dữ liệu dài hạn trở nên khó khăn. Các trạm quan trắc mặt đất và vệ tinh hiện tại chưa thể bao phủ đầy đủ không gian và thời gian, đặc biệt trong vùng nhiệt đới. Điều này cho thấy rõ sự cần thiết phải phát triển các hệ thống lidar có khả năng hoạt động ổn định, lâu dài và hiệu quả cao, để theo dõi biến đổi khí quyển một cách chính xác và toàn diện hơn.

Tại Mỹ việc phát triển hệ đo được thực hiện đồng thời từ nguồn phát laser, hệ thu quang điện và hệ thu quang học. Các hệ lidar này được dùng để khảo sát khí quyển tầng cao [67]. Hệ laser được nâng cấp với xung đôi, hệ thu quang điện được nâng cấp thực hiện đo với hiệu suất lượng tử cao. Các tín hiệu nhiễu cũng phải giảm để có thể khảo sát ở độ cao lớn hơn. Hệ thu quang học được phát triển để có thể khảo sát nhiều kênh từ trường gần đến trường xa. Các gương quang học phản xạ tín hiệu được hội tụ tại tiêu điểm, tại tiêu điểm của gương có đặt đầu thu là sợi quang học để dẫn tín hiệu vào hệ thu quang điện chuyển thành tín hiệu số và được lưu vào máy tính. Việc phát triển hệ lidar được thực hiện bởi nhiều nhóm nghiên cứu khí quyển với các nhóm nghiên cứu để khảo sát được khí quyển tầng cao thì giải pháp được lựa chọn là phát triển hệ thu quang có khẩu độ lớn. Tối ưu hệ thu quang có thể mở rộng vùng khảo sát khí quyển để có nhiều nghiên cứu khoa học về nhiệt độ và mật độ khí quyển tầng cao, đóng góp thông tin hữu ích cho nghiên cứu khoa học và vật lý khí quyển.

Bảng 1.4. Bảng thông số hệ lidar nhóm nghiên cứu ở Mỹ [67].

Hệ phát	Hệ thu	Xử lý tín hiệu
Laser tinh thể Nd: YAG	4 gương diện tích 4,9 m ²	Hệ đếm photon
Bước sóng 532 nm	Mỗi gương đường kính 1,25m	Tốc độ đếm cực đại 1 triệu CPS
Độ rộng xung 7 ns	Chiều dài tiêu cự 236 cm	Độ rộng dải 37,5 m
Năng lượng xung 600mJ	Đường kính sợi quang 1,5 mm	Thời gian lấy tích phân 2 phút
Công suất trung bình 18 W	Ống nhân quang điện ET9954B	

Bảng 1.4 cho thấy nguồn sáng sử dụng trong hệ phát là Laser Nd:YAG bước sóng 532 nm, độ rộng xung 7 ns, năng lượng xung 600 mJ, công suất trung bình 18W. Kết quả khảo sát thu được các đường nhiệt độ từ khoảng cách xa được thực hiện vào ban đêm. Các đường phân bố nhiệt độ thay đổi do tác động của hoạt động của sóng trọng lực, sóng phẳng. Kết quả thực nghiệm cho thấy từ độ cao 70 km đến 90 km tín hiệu lidar phù hợp với các các nghiên cứu khác. Bắt đầu từ 90 km trở lên có sự khác biệt giữa nhiệt độ đo được từ hệ lidar và các mô hình khác điều này do tác động của sóng trọng lực trong quá trình đo đạc lidar [67]. Hệ lidar cải tiến với hệ thu quang sử dụng đồng thời nhiều gương quang học với diện tích đầu thu lớn đã thu được tín hiệu từ khoảng cách xa. Trong nghiên cứu khí quyển, sóng trọng lực là một phần quan trọng trong nghiên cứu động lực học khí quyển, ảnh hưởng đến các hiện tượng thời tiết và khí hậu. Sóng trọng lực thường xuất hiện khi không khí bị tác động bởi các yếu tố như gió, địa hình, hoặc sự thay đổi nhiệt độ. Khi không khí bị nâng lên hoặc hạ xuống, trọng lực sẽ kéo không khí trở lại vị trí cân bằng, tạo ra các sóng. Sóng trọng lực có thể được chia thành các loại, bao gồm sóng trọng lực bề mặt diễn ra gần mặt đất và sóng trọng lực tầng cao diễn ra ở các tầng cao hơn, chúng có bước sóng và tần số khác nhau. Các nghiên cứu, đo đạc về phân bố nhiệt độ và mật độ khí quyển ở độ cao 40 km đến 70 km tại Chatanika, Alaska cho phép khảo sát về sóng phẳng, sóng trọng lực. Các khảo sát từ mặt đất được thực hiện liên tục hàng năm, hàng tháng và theo mùa. Bên cạnh các kết quả nghiên cứu khoa học rất tốt thì nhóm nghiên cứu ở Mỹ, đại học Utah State cũng có hạn chế là phương tiện khảo sát khí quyển tầng cao như vệ tinh, Radar không thể đo đạc liên tục các thông số cần thiết ở mọi khu vực, điều này có thể làm giảm tính toàn diện và liên tục của dữ liệu.

Tại Nhật Bản, các nghiên cứu về động lực học khí quyển tầng cao, đặc biệt là sóng trọng lực, đã được triển khai tại trạm Syowa (69°S , 40°E), dưới sự phối hợp của các đơn vị nghiên cứu như Phòng nghiên cứu Tachikawa và các viện khí quyển – địa vật lý. Trong giai đoạn từ tháng 5 năm 2011 đến tháng 11 năm 2013 [94], nhóm nghiên cứu đã sử dụng hệ thống lidar Rayleigh/Raman để khảo sát chi tiết sự phân bố nhiệt độ và phát hiện các đặc trưng sóng trọng lực trong khí quyển từ độ cao 10 km đến 90 km.

Hệ lidar sử dụng nguồn laser xung Nd:YAG (355 nm) với năng lượng mỗi xung khoảng 300 mJ, tốc độ lặp 20 Hz. Hệ thu tín hiệu sử dụng kính quang học đường kính 82 cm, đảm bảo thu được tín hiệu yếu từ tầng khí quyển cao. Tín hiệu tán xạ ngược được tách và xử lý thông qua ba ống nhân quang điện (PMT): hai ống phục vụ lidar Rayleigh với trường gần (10–70 km) và trường xa (23–90 km), cùng một ống dùng cho lidar Raman, thu tín hiệu tán xạ từ phân tử nitơ (N_2) tại bước sóng 387 nm, khảo sát trong khoảng 10–40 km [94].

Các phép đo được thực hiện theo chế độ đếm photon tích phân theo phương thẳng đứng liên tục trong 1 giờ, giúp giảm nhiễu thống kê và tăng độ tin cậy của dữ liệu. Dựa trên sự thay đổi theo thời gian và độ cao của nhiệt độ và mật độ khí quyển, hệ lidar có khả năng phát hiện các sóng trọng lực và xác định các đặc trưng như biên độ, bước sóng, tần số, cũng như theo dõi sự lan truyền của sóng theo phương thẳng đứng.

Các kết quả thu được đã đóng góp quan trọng vào việc hiểu rõ cơ chế hình thành và lan truyền sóng trọng lực, vốn có ảnh hưởng lớn đến cấu trúc và động lực học của tầng trung lưu – bình lưu, và thậm chí cả tầng ionosphere. Trong bối cảnh khí quyển tầng cao thường xuyên chịu ảnh hưởng mạnh mẽ từ gió mặt trời, bức xạ Mặt Trời và các quá trình nội tại, việc theo dõi dài hạn bằng lidar cung cấp công cụ hữu hiệu để quan trắc các biến động khó nắm bắt này.

1.3.2. Tại Việt Nam

Tại Hà Nội nói riêng và Việt Nam nói chung, các nghiên cứu liên quan đến khí quyển tầng cao chủ yếu được triển khai trong khuôn khổ các dự án khoa học của các viện nghiên cứu và trường đại học chuyên ngành. Trong đó, trường Đại học Khoa học Tự nhiên – Đại học Quốc gia Hà Nội là một trong những đơn vị tiên phong với các hướng nghiên cứu thuộc các bộ môn Khí tượng học, Môi trường và Vật lý thiên văn. Các nghiên cứu tại đây tập trung vào các quá trình vật lý và hóa học xảy ra ở tầng bình lưu, tầng ô dôn và tầng điện ly, cũng như ảnh hưởng của chúng đến khí hậu và môi trường.

Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu (IMHEN) là cơ quan chuyên môn đầu ngành trong lĩnh vực khí tượng – thủy văn, thường xuyên triển khai các đề tài cấp nhà nước về biến đổi khí hậu và cấu trúc khí quyển tầng cao [24]. Viện này cũng tham gia xây dựng và vận hành các trạm quan trắc tầng ô dôn trên cả nước, trong đó có trạm tại Hà Nội. Các trạm này sử dụng thiết bị đo quang phổ và dữ liệu vệ tinh nhằm theo dõi sự thay đổi nồng độ ô dôn – một yếu tố then chốt trong việc đánh giá bức xạ tử ngoại và tác động của biến đổi khí hậu.

Bên cạnh đó, một số nhóm nghiên cứu tại các trường đại học kỹ thuật đã bắt đầu triển khai nghiên cứu khí quyển bằng kỹ thuật lidar, nổi bật như: Nhóm nghiên cứu tại trường Đại học Mỏ - Địa chất, trường Đại học Bách khoa Hà Nội, viện Vật lý Địa cầu, tại viện Vật lý – viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Các nhóm này bước đầu ứng dụng các hệ thống lidar trong khảo sát aerosol, mây tầng cao và phân bố nhiệt độ – mật độ trong khí quyển, góp phần xây dựng cơ sở dữ liệu khí quyển phục vụ nghiên cứu và cảnh báo môi trường [20,24].

Luận án tiến sĩ của tác giả Bùi Văn Hải về “Sử dụng kỹ thuật Lidar nghiên cứu đặc trưng vật lý của son khí trong tầng khí quyển” năm 2014 có nghiên cứu xây dựng, phát triển một hệ Lidar nhỏ sử dụng laser diode công suất cao phát bức xạ 905 nm và đầu thu APD quan trắc lớp son khí tầng đối lưu dưới 10 km [21]. Các kết quả nghiên cứu của luận án dựa trên phép đo lidar sử dụng kính quang học loại Schmidt-Cassegrain có đường kính 25 cm và tiêu cự 2,5 m. Do hệ lidar sử dụng kính thiên văn quang học có đường kính nhỏ, số lượng photon tán xạ ngược thu được ít do đó hạn chế độ cao thu được tín hiệu. Các phép đo thu được tín hiệu đàn hồi ở tầng đối lưu nghiên cứu son khí và sự phân bố nhiệt độ tầng thấp. Các nghiên cứu về khí quyển tầng đối lưu này đóng góp vào nghiên cứu khí quyển nói chung, cung cấp thêm thông tin các thông số khí quyển giúp dự báo thời tiết chính xác hơn. Tuy nhiên luận án chưa nghiên cứu về các tầng khí quyển có độ cao lớn hơn do tín hiệu từ khí quyển tầng cao là tín hiệu yếu, cần có hệ lidar được tối ưu về cấu hình để thu được tín hiệu từ khoảng cách xa.

Luận án tiến sĩ của tác giả Nguyễn Xuân Tuấn về “Nghiên cứu và phát triển kỹ thuật Lidar ứng dụng khảo sát phân bố nhiệt độ và mật độ khí quyển” năm 2016 [60]. Các kết quả nghiên cứu của luận án dựa trên phép đo lidar sử dụng kính quang học loại Schmidt-Cassegrain có đường kính 25 cm và tiêu cự 2,5 m. Luận án đã nghiên cứu về khí quyển tầng đối lưu và tầng bình lưu. Do đường kính của kính thiên văn hệ thu nhỏ nên để đo được tín hiệu yếu từ khí quyển tầng cao cần thời gian đo dài hàng giờ để thu được số liệu [22].

Luận án tiến sĩ của tác giả Phạm Minh Tiến về “Nghiên cứu phân bố khí ô dôn trong khí quyển tầng thấp với độ phân giải cao trên cơ sở phát triển và ứng dụng phương pháp lidar hấp thụ vi sai”. Luận án đã phát triển một hệ Lidar hấp thụ vi sai bước sóng tử ngoại ở 282,9 nm và 286,4 nm để nghiên cứu phân bố khí ô dôn trong khí quyển tầng thấp với độ phân giải cao. Khí ô dôn hấp thụ mạnh bức xạ tử ngoại, điều này hạn chế độ cao vùng khí quyển được khảo sát do đó để thu được tín hiệu từ khoảng cách xa cần tối ưu hệ thu quang. Hệ đã thu tín hiệu lưu số liệu và xử lý các tín hiệu lidar tán xạ đàn hồi ngược, qua đó xác định mật độ của ô dôn tầng thấp [23]. Nghiên cứu về ô dôn tầng thấp tại Hà Nội đóng góp thêm nhiều thông tin thực nghiệm về sự phân bố lớp ô dôn giúp đánh giá tác động của ô dôn với khí quyển và môi trường.

Khu vực Hà Nội nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa ẩm, với sự phân hóa rõ rệt theo mùa. Theo Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu, mùa hè (tháng 5–8) là thời kỳ có lượng mưa lớn nhất trong năm, với tổng lượng mưa có thể vượt 1000 mm, kèm theo độ ẩm không khí cao, thường xuyên đạt trên 85–90%. Điều kiện này làm gia tăng mật độ mây thấp và sương mù trong tầng đối lưu, gây suy giảm khả năng truyền dẫn ánh sáng trong khí quyển. Đây là yếu tố gây ảnh hưởng rõ rệt đến chất lượng tín hiệu lidar, đặc biệt khi khảo sát các tầng khí quyển tầng cao như tầng đối lưu trên và bình lưu dưới.

Trong khi đó, mùa đông (tháng 11–2) thường khô ráo hơn, với độ ẩm trung bình thấp hơn (~70–75%), lượng mưa thấp và tần suất mây thấp giảm đáng kể. Bầu trời thường trong hơn, đặc biệt trong các đợt không khí lạnh khô, tạo điều kiện thuận lợi cho quan trắc lidar ở các tầng cao. Viện KTTVBĐKH cũng ghi nhận rằng trong những tháng mùa đông, chất lượng không khí tại Hà Nội có xu hướng suy giảm do hiện tượng nghịch nhiệt và tích tụ bụi mịn ($PM_{2,5}$), tuy nhiên lớp bụi này chủ yếu tập trung dưới độ cao 1,5 km và ít ảnh hưởng đến các phép đo lidar ở tầng cao nếu được lọc thích hợp.

Về tổng thể, mùa thu (tháng 9 -11) và mùa đông tại Hà Nội được đánh giá là thời điểm thuận lợi hơn để triển khai các khảo sát lidar khí quyển, do thời tiết ổn định, độ ẩm vừa phải, ít mây đối lưu và mưa. Ngược lại, mùa hè và mùa xuân với đặc trưng độ ẩm cao, mây nhiều và hiện tượng thời tiết nhiễu động mạnh là những yếu tố có thể làm suy giảm độ chính xác của phép đo lidar.

Trước yêu cầu cấp thiết trong việc ứng phó với biến đổi khí hậu, đặc biệt là những biến động bất thường của các hiện tượng khí tượng như bão diễn ra thường xuyên với cường độ mạnh và không theo quy luật. Tình trạng ô nhiễm không khí gia tăng tại các thành phố lớn do các hoạt động xây dựng và phát thải từ các phương tiện

giao thông, việc phát triển hệ lidar tối ưu về cấu hình với gương quang học có khẩu độ thu lớn để khảo sát khí quyển tầng cao trở thành một nhu cầu khoa học thiết yếu. Việc sử dụng gương quang học có khẩu độ thu lớn trong hệ lidar giúp tăng cường đáng kể khả năng thu nhận ánh sáng tán xạ ngược từ các tầng khí quyển cao, cung cấp thông tin quan trọng về các đặc tính như mật độ phân tử khí, nhiệt độ và mật độ chất ô nhiễm, hỗ trợ quá trình dự báo và đánh giá tác động của biến đổi khí hậu.

1.4. Kết luận chương 1

Chương 1 đã trình bày tổng quan về cấu trúc, đặc điểm của khí quyển Trái Đất, đặc biệt là khí quyển tầng cao, và vai trò quan trọng của nó đối với các quá trình khí tượng và khí hậu toàn cầu. Các nội dung cụ thể được trình bày gồm:

- Các đặc trưng cơ bản của khí quyển Trái Đất, gồm cấu trúc phân tầng, thành phần hóa học chính và sự biến đổi của mật độ, nhiệt độ khí quyển theo độ cao.
- Đặc điểm, phân loại và cơ chế hình thành của mây tầng cao, cũng như vai trò của chúng đối với cân bằng bức xạ, chu trình nước và biến đổi khí hậu toàn cầu.
- Các kỹ thuật khảo sát khí quyển phổ biến, bao gồm phương pháp đo trực tiếp như bóng thám không và tên lửa khí tượng, và các phương pháp viễn thám hiện đại như radar, vệ tinh và lidar.
- Cơ sở lý thuyết và mô hình toán học của các quá trình tán xạ ánh sáng trong khí quyển (Rayleigh và Mie), làm nền tảng quan trọng để ứng dụng trong kỹ thuật lidar.
- Những giới hạn và ứng dụng thực tiễn của kỹ thuật lidar trong đo đạc các thông số khí quyển, đặc biệt tại các tầng khí quyển cao, nhấn mạnh tầm quan trọng và sự cần thiết của việc phát triển các hệ lidar hiện đại với khẩu độ lớn.

Qua những nội dung được trình bày, chương 1 đã khẳng định rõ vai trò then chốt của các phương pháp khảo sát hiện đại, đặc biệt là lidar, trong việc cung cấp dữ liệu quan trọng giúp nghiên cứu sâu hơn về khí quyển tầng cao, hỗ trợ các nghiên cứu khí hậu, nâng cao độ chính xác và tin cậy của các mô hình dự báo thời tiết và khí hậu. Đây là cơ sở lý luận và thực tiễn để phát triển kỹ thuật lidar khẩu độ thu lớn nhằm nâng cao khả năng đo đạc và khảo sát khí quyển tầng cao một cách toàn diện và hiệu quả hơn.

CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU VÀ PHÁT TRIỂN HỆ LIDAR KHẨU ĐỘ THU LỚN

Tại Viện Vật Lý, nhóm nghiên cứu Thiên Văn đã phát triển và xây dựng thành công hệ lidar hai kênh kết hợp đàn hồi và raman có khối thu quang sử dụng một kính thiên văn loại Schmidt-Cassegrain có đường kính 25,4 cm và tiêu cự 2,5 m [21 - 23]. Hệ lidar đã được đưa vào trong nghiên cứu khí quyển. Các kết quả thu được bước đầu đã đóng góp to lớn trong lĩnh vực công nghệ lidar và khảo sát khí quyển. Trong quá trình đo đạc và khảo sát, các phép đo lidar tại khoảng cách xa thường gặp một số khó khăn do cường độ tín hiệu phản hồi yếu và tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SNR) thấp, độ phân giải không gian và thời gian chưa cao gây khó khăn trong việc xử lý, phân tích và xử lý dữ liệu thu nhận.

Trong chương 2, luận án trình bày tóm tắt về hệ đo lidar một kênh đàn hồi đã được xây dựng. Hệ sẽ được sử dụng vào khảo sát các đặc trưng thông số của mây Ti tầng cao. Tiếp theo, dựa vào cấu hình hệ lidar này để nâng cấp lên hệ lidar khẩu độ thu lớn. Cải tiến lớn nhất trong hệ lidar chính là chế tạo gương cầu lõm được mạ nhôm thay thế kính thiên văn làm bộ thu tín hiệu quang. Gương cầu có đường kính lên tới 60 cm, tiêu cự 1,8 m và độ phản xạ trung bình $R > 90\%$ tại vùng bước sóng 500-600 nm. Với bộ thu này, hệ lidar đã được gia tăng diện tích thu tín hiệu, nâng cao cường độ tín hiệu thu được, từ đó cải thiện chất lượng và phạm vi đo đạc. Quy trình chế tạo, đánh giá chất lượng gương cầu được trình bày chi tiết. Ngoài ra, các thành phần xây dựng hệ được nêu rõ và thiết kế phù hợp với cấu hình quang học mới. Nội dung cuối của chương đưa ra các đánh giá hệ lidar khẩu độ thu lớn bằng mô phỏng và kiểm chứng thực nghiệm.

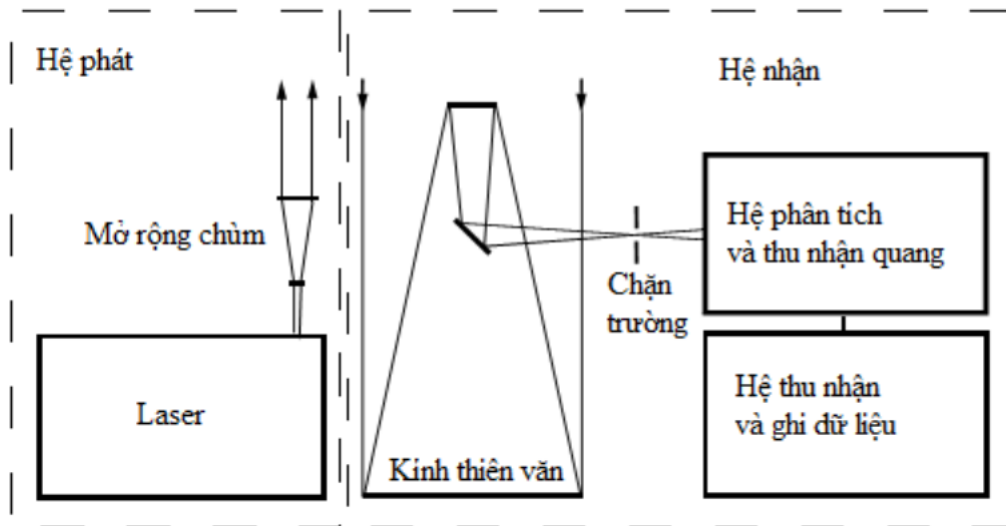
2.1. Hệ đo lidar

2.1.1. Cấu trúc cơ bản của hệ đo lidar

Một hệ lidar khí quyển điển hình bao gồm hai bộ phận chính: hệ phát (transmitter) và hệ nhận (receiver), cùng với các bộ phận xử lý tín hiệu và điều khiển đi kèm. Sơ đồ tổng quan của cấu trúc này được thể hiện trong hình 2.1 [69].

Hệ phát: bộ phận tạo ra các xung laser có độ rộng ngắn (thường vài nano giây), với bước sóng xác định để truyền vào khí quyển. Chùm laser được điều hướng theo phương mong muốn (thường là phương thẳng đứng) nhờ hệ quang học dẫn hướng như gương điều chỉnh chùm tia hoặc kính định hướng.

Trong các hệ lidar đàn hồi, các nguồn laser phổ biến thường là Nd:YAG hoạt động ở ba bước sóng chính: 1064 nm, 532 nm, và 355 nm. Trong nghiên cứu này, hệ thống sử dụng laser xung Nd:YAG ở bước sóng 532 nm, nhờ ưu điểm công suất cao, hiệu suất ổn định và khả năng xuyên sâu vào khí quyển, phù hợp để khảo sát khí quyển tầng cao.



Hình 2.1. Sơ đồ cấu tạo cơ bản của một hệ lidar [69].

Hệ nhận: có chức năng thu và xử lý tín hiệu ánh sáng tán xạ đàn hồi từ khí quyển. Thành phần cốt lõi trong hệ nhận là kính thiên văn hoặc gương cầu hội tụ, có nhiệm vụ thu gom và tập trung tín hiệu tán xạ ngược rất yếu. Tín hiệu sau khi hội tụ sẽ đi qua các bộ lọc quang học như phin giao thoa để loại bỏ nhiễu từ ánh sáng mặt trời hoặc ánh sáng khuếch tán không mong muốn.

Ánh sáng đã lọc được chuyển đổi thành tín hiệu điện nhờ các đầu thu quang điện nhạy cao, phổ biến là ống nhân quang điện (PMT) hoặc photodiode avalanche (APD). Sau đó, tín hiệu điện được khuếch đại, số hóa và xử lý, nhằm trích xuất các thông số vật lý của khí quyển như mật độ không khí, nhiệt độ, thành phần aerosol hoặc các khí vi lượng.

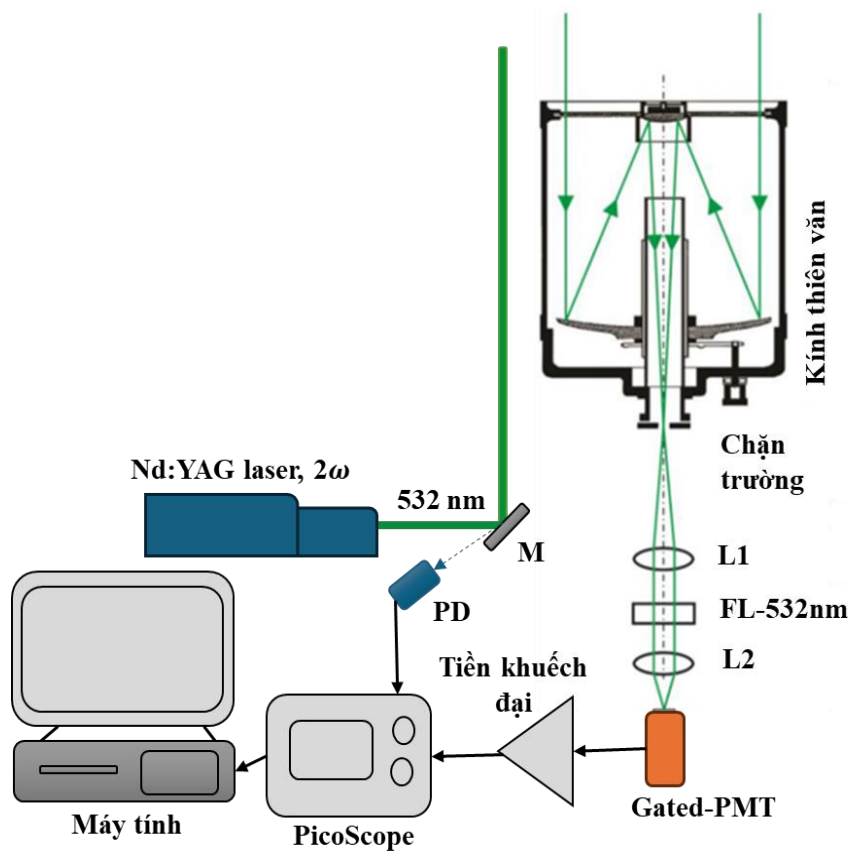
Nguyên lý hoạt động cơ bản của hệ lidar đàn hồi:

Khi một xung laser phát ra, xung laser tương tác với các thành phần trong khí quyển. Một phần ánh sáng laser sẽ bị tán xạ ngược trở lại vị trí đặt hệ đo lidar. Tín hiệu tán xạ ngược này được thu bởi gương cầu, hội tụ vào hệ thu nhận quang và phân tích chuyển đổi thành tín hiệu điện. Thời gian từ lúc phát ra xung laser cho tới khi thu được tín hiệu phản xạ sẽ cho phép xác định chính xác khoảng cách đến vùng khí quyển khảo sát.

Ưu điểm nổi bật của phép đo lidar là khả năng đo đặc không tiếp xúc, độ phân giải không gian và thời gian cao, cung cấp các dữ liệu chi tiết và chính xác về khí quyển ở nhiều độ cao khác nhau. Tuy nhiên, phép đo này cũng gặp khó khăn trong điều kiện ánh sáng ban ngày và điều kiện thời tiết bất lợi, làm giảm tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR).

Để nâng cao hiệu suất thu nhận tín hiệu, đặc biệt là các tín hiệu yếu từ các khoảng cách lớn, hệ lidar cần được nâng cấp bộ thu quang học tức là tăng độ lớn của gương cầu cũng chính là tăng diện tích thu nhận tín hiệu và nâng cao chất lượng tín hiệu đo được.

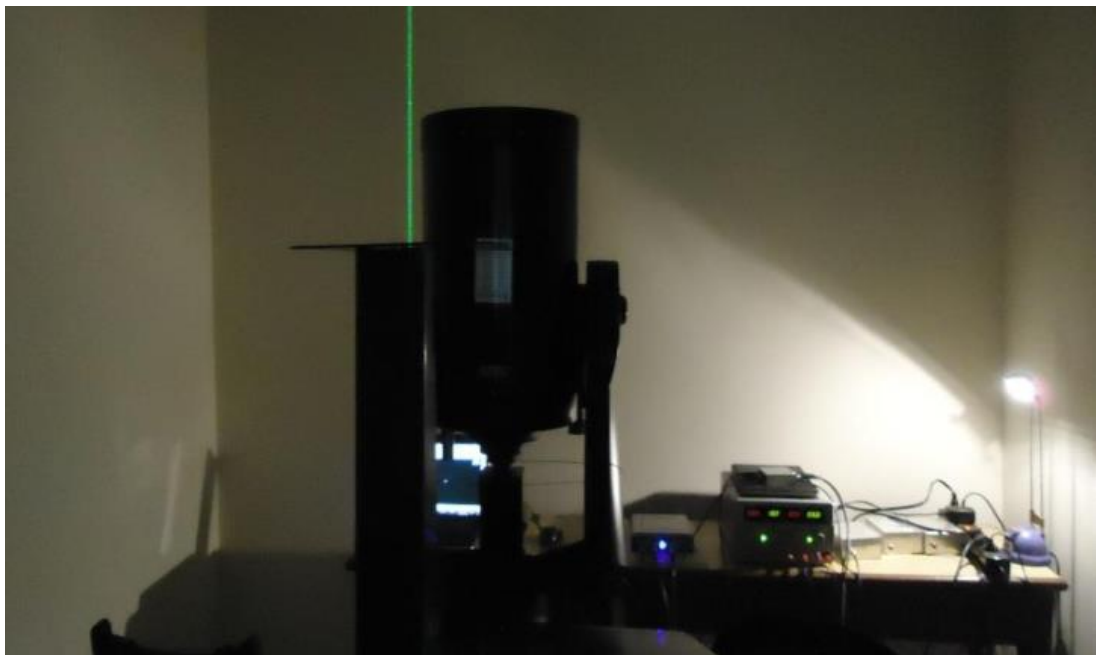
2.1.2. Cấu hình hệ lidar đàn hồi sử dụng kính thiên văn Schmidt-Cassegrain



Hình 2.2. Cấu hình hệ đo lidar đàn hồi 1 kênh sử dụng kính thiên văn Schmidt-Cassegrain đã được phát triển tại Viện Vật Lý [22].

Hình 2.2 mô tả cấu hình chi tiết của hệ lidar đàn hồi có bộ thu tín hiệu là kính thiên văn loại Schmidt-Cassegrain có đường kính 25,4 cm và tiêu cự 2,5 m để khảo sát đối tượng mây Ti tầng cao. Hệ lidar sử dụng nguồn laser xung Nd:YAG (Quantel, Pháp) phát xạ bước sóng 532 nm, độ rộng xung là 5 ns, tần số lặp lại là 10 Hz. Chùm laser được dẫn định hướng thẳng vào khí quyển bằng gương lái chùm M. Kính thiên văn cũng được định hướng thẳng đứng để chuẩn trực song song với chùm laser [21].

Tại mặt phẳng tiêu của kính thiên văn, sử dụng một thiết bị chặn trường đường kính 2 mm đóng vai trò như một tấm lọc không gian của chùm tín hiệu ánh sáng tán xạ ngược. Chùm ánh sáng tán xạ ngược được chuẩn trực thành chùm song song bằng thấu kính L1 có tiêu cự 25 mm. Sau đó, chùm tán xạ ngược được lọc bởi một tấm phin lọc giao thoa (interference filter) có bước sóng đỉnh 532 nm và băng thông hẹp (FWHM) là 1 nm, nhằm loại bỏ nhiễu nền và tối ưu hóa độ chính xác của phép đo. Chùm tín hiệu sau khi lọc được hội tụ bằng thấu kính L2 vào một ống nhân quang điện (PMT) của hãng Hamamatsu seri R7400U được thiết kế mạch gate với thời gian gate có thể điều chỉnh theo điều kiện khí quyển khi tiến hành đo. Sử dụng mạch gate cho phép loại bỏ tín hiệu mạnh trường gần và thu tín hiệu yếu trường xa khi thực hiện phép đo ở chế độ đếm photon. Tín hiệu thu được sau đó được khuếch đại với hệ số khuếch đại 20 lần và tín hiệu khuếch đại này được chuyển tiếp tới bộ chuyển đổi tín hiệu analog - số (ADC) 8 bit thông qua PicoScope 5204 (PicoTech, Vương quốc Anh) để xử lý tín hiệu. Tín hiệu trigger cho bộ ADC được lấy từ photodiode PD thu nhận một phần nhỏ tín hiệu từ chùm laser xung. Toàn bộ dữ liệu thu được từ hệ thống lidar trong quá trình đo đạc được lưu trữ dưới dạng tệp *.txt trong máy tính và được xử lý thông qua chương trình được lập trình trên phần mềm Labview.



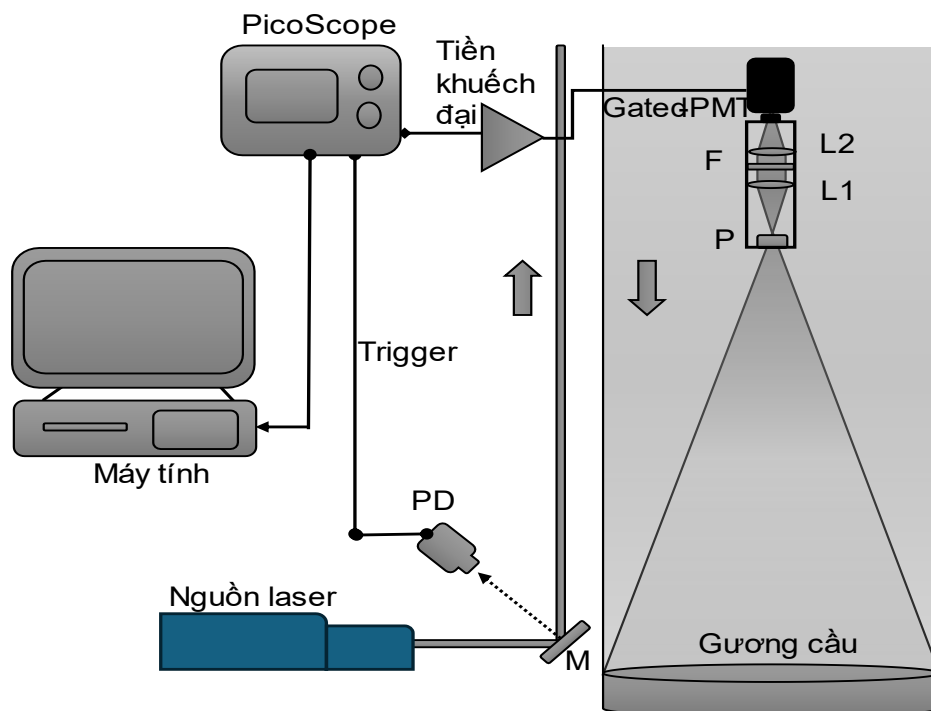
Hình 2.3. Hệ đo lidar sử dụng kính thiên văn loại Schmidt-Cassegrain [21, 22].

Hình 2.3 là ảnh chụp hệ lidar đàn hồi sử dụng bộ thu là kính thiên văn loại Schmidt-Cassegrain. Các thông số kỹ thuật cơ bản của hệ lidar đàn hồi được đưa ra trong Bảng 2.1.

Bảng 2.1. Thông số kỹ thuật hệ lidar khảo sát khí quyển tại Hà nội [22].

Hệ phát		Nd:YAG laser
	Bước sóng	532 nm
	Năng lượng xung (cực đại)	180 mJ
	Tần số	10 Hz
	Độ rộng xung	5 ns
	Độ phân kì	0.5 mrad
Hệ thu		
	Đường kính kính thiên văn	254 mm
	Trường nhìn (FOV)	0,8 mrad
	Hệ đếm photon	
	Kênh Rayleigh	Module gated-PMT

2.1.3. Cấu hình hệ lidar đàn hồi sử dụng gương cầu khẩu độ lớn



Hình 2.4. Cấu hình hệ đo lidar đàn hồi 1 kênh sử dụng gương cầu khẩu độ lớn.

Dựa trên cấu hình hệ lidar đàn hồi sử dụng kính thiên văn loại Schmidt-Cassegrain. Chúng tôi tiến hành xây dựng cấu hình hệ lidar đàn hồi khẩu độ thu lớn. Hệ lidar đàn hồi được nâng cấp phát triển mục đích khảo sát khí quyển ở khoảng cách lớn, với sơ đồ cấu hình của hệ được thể hiện trong hình 2.4.

Bộ thu tín hiệu quang học được thay thế bằng gương cầu mạ nhôm có đường kính 60 cm ($f/D = 3$). Gương cầu là sản phẩm được chúng tôi tự thiết kế và gia công chế tạo. Quy trình chế tạo, đánh giá được trình bày trong các mục sau.

Tấm chặn trường P giới hạn trường nhìn của kính thiên văn đến 1 mrad được đặt tại mặt phẳng tiêu của gương cầu. Thấu kính L1, L2 có tiêu cự 10 cm được mạ chống phản xạ tại bước sóng 532 nm (hãng Thorlabs). L1 dùng chuẩn trực chùm tín hiệu tán xạ ngược thành chùm song song. L2 dùng để hội tụ chùm tín hiệu vào ống nhân quang điện PMT. Tấm phin lọc giao thoa băng hẹp F tại bước sóng 532 nm có độ rộng băng thông 3 nm (hãng Thorlabs) được đặt giữa thấu kính L1 và L2 sử dụng để loại bỏ tín hiệu quang nhiễu nền. Các linh kiện này đều được gắn cố định trong một ống kim loại mạ đen kín. Một đầu của ống gắn tấm chặn chùm. Đầu còn lại gắn ống nhân quang điện PMT.

Ống nhân quang điện có thể tháo lắp và thay thế linh hoạt. Hệ lidar khẩu độ lớn sử dụng hai loại PMT, một loại PMT thông thường của Hamamatsu mã H6780-20, một loại PMT của Hamamatsu mã R7400U được chúng tôi thiết kế tích hợp mạch gate kiểm soát thời gian thu nhận để thu tín hiệu từ trường xa [70]. Hệ lidar khẩu độ thu lớn cũng sử dụng hai loại PicoScope là Picoscope 5024 - Picotech với băng thông 250 MHz và Picoscope 4424 với tốc độ lấy mẫu 20 MHz. Kết hợp mỗi loại PMT và PicoScope trên để sử dụng phù hợp với các phép đo ở chế độ tương tự vào ban ngày và chế độ đếm photon vào ban đêm.

Để lấy trigger thời điểm phát xung laser và ghi nhận tín hiệu, hệ sử dụng một photodiode PD tốc độ cao thu một phần laser tán xạ từ gương dẫn M. Gương dẫn M có độ phản xạ $R > 99\%$ bước sóng 532 nm tại góc 45° (hãng Thorlabs). Bộ tiền khuếch đại, nguồn laser phát, sử dụng của hệ lidar cũ [22].

Các tín hiệu quang thu được trong hệ lidar được chuyển đổi thành tín hiệu điện thông qua ống nhân quang điện, với cường độ tín hiệu điện tỷ lệ thuận với số lượng photon laser thu được từ chùm tán xạ ngược. Cường độ tín hiệu này không chỉ phụ thuộc vào đặc điểm của hệ phát và thu, mà còn bị ảnh hưởng mạnh mẽ bởi các yếu tố môi trường truyền sáng, đặc biệt là tính chất tán xạ và hấp thụ của khí quyển, các khối son khí hoặc mây. Các yếu tố này bao gồm bước sóng của chùm tia laser phát, kích thước, mật độ, hình dạng và chiết suất của các hạt son khí. Mỗi yếu tố này đóng vai trò quyết định trong việc xác định mức độ tán xạ và hấp thụ ánh sáng trong khí quyển, ảnh hưởng đến số photon đàn hồi mà hệ thống thu nhận được. Do đó, việc hiểu và tính toán chính xác những yếu tố này là cần thiết để cải thiện độ chính xác của phép đo lidar trong các điều kiện môi trường thay đổi.

Cách bố trí hình học của hệ phát và hệ thu trong hệ lidar đóng vai trò quyết định đối với chất lượng tín hiệu thu được. Trong quá trình phát và thu tín hiệu, chùm tia laser tán xạ ngược không thể hướng toàn bộ vào bộ thu quang điện, đặc biệt là ở những khoảng cách ngắn, do sự phân kỳ của chùm tia. Kết quả là chỉ một phần tín hiệu tán xạ ngược được ghi nhận, với cường độ tín hiệu thay đổi theo khoảng cách và phụ thuộc vào các yếu tố như đường kính chùm tia laser, hình dạng, độ phân kỳ và kích thước của ảnh tạo bởi kính thiên văn. Trường nhìn của đầu thu và vị trí tương đối của trục quang của đầu phát với đầu thu cũng ảnh hưởng mạnh mẽ đến chất lượng tín hiệu thu được.

Trong hệ thống đồng trục, chùm tia laser phát đồng trục với trục quang học của kính thiên văn, tối ưu hóa việc thu nhận toàn bộ tín hiệu đàn hồi. Ngược lại, trong hệ thống hai trục, các trục quang học của hệ phát và hệ thu được tách biệt một khoảng tối thiểu bằng bán kính của gương kính thiên văn. Hàm chồng chập, mô tả mức độ giao nhau giữa các trường phát và thu, có giá trị bằng 0 khi không có sự giao cắt và đạt giá trị 1 khi toàn bộ chùm tia laser được thu về và hội tụ tại tiêu điểm của kính thiên văn. Việc tối ưu hóa hàm chồng chập là cần thiết để đảm bảo chất lượng tín hiệu thu được, đặc biệt trong các ứng dụng lidar yêu cầu độ chính xác cao.

2.2. Thông số đặc trưng của các bộ phận, linh kiện trong hệ lidar khẩu độ thu lớn

2.2.1. Nguồn laser

Khởi phát của hệ lidar khẩu độ thu lớn sử dụng nguồn laser xung Nd:YAG (Brilliant model, hãng Quantel, Pháp) có bước sóng cơ bản là 1064 nm [70]. Đây là loại máy laser có khả năng phát xung công suất cao và ổn định. Máy laser có thể phát các bức xạ 1064 nm, 532 nm, 355 nm và 266 nm. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng bước sóng 532 nm. Hình 2.5 là ảnh máy laser Nd:YAG được lắp đặt đầu nhân tần 2ω để phát bức xạ 532 nm.

Chùm laser 532 nm có đường kính 9 mm, phân bố chùm dạng Gaussian. Năng lượng mỗi xung cực đại 180 mJ. Độ ổn định năng lượng xung là khoảng 4%. Độ thay đổi công suất trung bình khoảng 5% khi máy laser hoạt động liên tục 8 giờ với điều kiện nhiệt độ phòng. Với sự ổn định và công suất cao, máy rất phù hợp với các phép đo lidar trong khoảng thời gian dài. Bảng 2.2 đưa ra các thông số chi tiết của máy laser khi hoạt động ở bước sóng 532 nm.



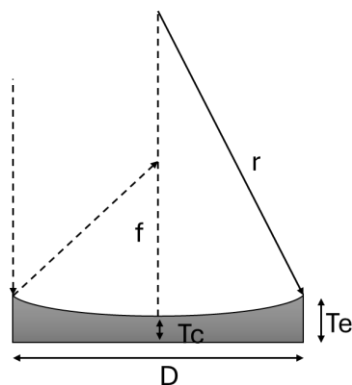
Hình 2.5. Laser xung Nd:YAG (Brilliant model, hãng Quantel, Pháp).

Bảng 2.2. Một số thông số cơ bản của laser Nd:YAG @ 532 nm [70].

Bước sóng	532 nm
Tần số lặp lại	10 Hz
Năng lượng trên xung (cực đại)	180 mJ
Độ rộng xung	~ 5 ns
Độ phân kì	<0.5 mrad
Đường kính chùm	9 mm
Độ ổn định năng lượng xung	4%
Độ thay đổi công suất trung bình (trên 8 giờ hoạt động ở nhiệt độ phòng)	5%
Độ rộng phổ	1,4 cm ⁻¹
Đầu laser (khối lượng, kích thước)	7 kg, 140x575x102 mm

2.2.2. Bộ thu và lọc tín hiệu quang

Bộ thu của hệ lidar khẩu độ lớn sử dụng gương cầu do nhóm nghiên cứu và chế tạo. Việc lựa chọn kích thước và tiêu cự của gương cầu là yếu tố quan trọng trong nâng cấp bộ thu cho hệ lidar. Hình 2.6 mô tả các thông số kích thước của gương cầu đường kính 60 cm, tiêu cự 1,8 m và được mạ nhôm bề mặt phản xạ. Các chỉ số này được lựa chọn dựa vào mô phỏng sử dụng các thông số cấu hình của hệ lidar, nhu cầu cũng như khả năng thực tế chế tạo và gia công. Cơ sở tính toán mô phỏng và quá trình nghiên cứu, chế tạo gương cầu này được trình bày chi tiết trong mục 2.3.



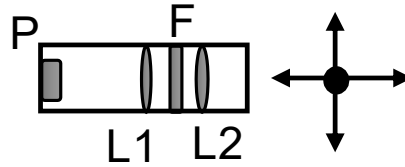
Hình 2.6. Chỉ số kích thước cơ bản của gương cầu.

Quá trình nghiên cứu và chế tạo gương cầu này được trình bày chi tiết trong mục 2.3. Bảng 2.3 dưới đây là các thông số chi tiết của gương cầu sau khi đã được chế tạo thành công.

Bảng 2.3. Thông số gương cầu.

Vật liệu	Thủy tinh soda vôi
Độ chính xác bề mặt cầu	$\lambda/2$ @ 532 nm
Dung sai bán kính cong	$\pm 0,02\%$
Lớp mạ bề mặt	Al + MgF_2
Độ mở	>90% đường kính
Chất lượng bề mặt (Scratch-Dig)	40-20
Bề mặt sau	Mài nhám
Đường kính D	60 cm
Độ dày cạnh T_e	5,7 cm
Độ dày trung tâm T_c	4,45 cm
Bán kính cong r	3,6 m
Tiêu cự f	1,8 m
Độ phản xạ R	>90% vùng 500-600 nm

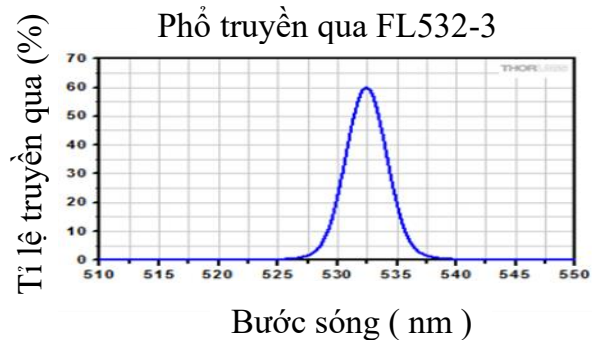
Bộ lọc tín hiệu quang bao gồm tấm chặn trường P, thấu kính L1, phin lọc giao thoa F và L2 được đặt cố định trong một ống kim loại kín. Một đầu gắn P, đầu còn lại để gắn PMT có thể tháo lắp linh hoạt như hình 2.7. Ống này được đặt trên một bộ giá vi dịch chuyển 3 chiều xyz để điều chỉnh vị trí lấy tín hiệu tại mặt phẳng tiêu của gương cầu.



Hình 2.7. Bộ lọc tín hiệu quang.

Tấm chặn trường P có lỗ đường kính 2 mm, sử dụng giới hạn trường nhìn của gương cầu. Bộ phận chặn trường này chọn lọc các vùng tín hiệu tầm cao cần quan sát và do đó ngăn các tín hiệu mạnh tán xạ ngược từ những tầng khí quyển thấp hơn để tránh quá tải về dữ liệu. Với hệ lidar khảo sát khí quyển tầng cao sự phân kỳ của chùm laser cỡ *mrاد*. Giảm trường nhìn có tác dụng giảm các nhiễu nền và đầu thu cũng hạn chế số photon thu được sau khi tán xạ nhiều lần trong khí quyển. Trường nhìn nhỏ rất quan trọng trong kỹ thuật lidar vốn dựa trên việc thu các tín hiệu với độ phân giải cao.

Thấu kính L1 và L2 có đường kính 25,4 cm, tiêu cự 10 cm dùng để chuẩn trực chùm và hội tụ chùm tín hiệu vào đầu thu PMT.



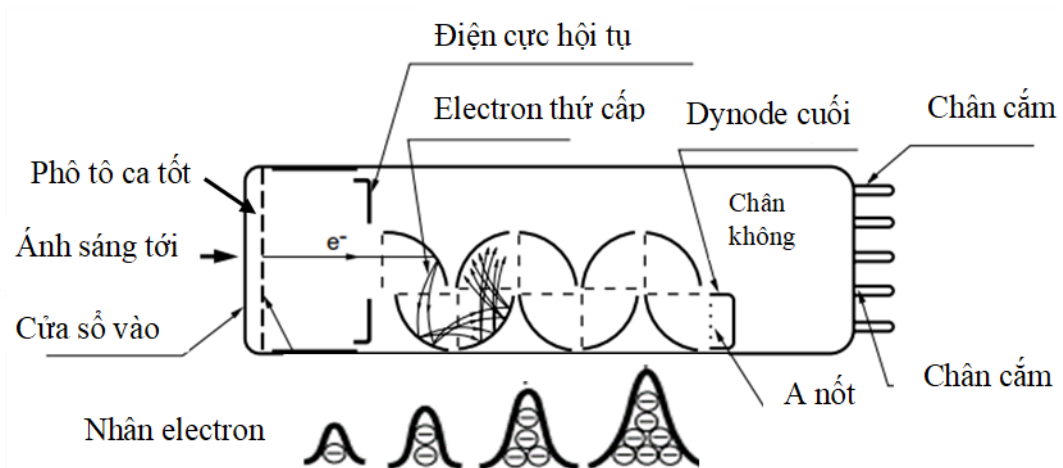
Hình 2.8. Phin lọc giao thoa FL532-3 nm và phổ truyền qua của phin lọc (hãng Thorlabs).

Trong hệ quang học thu của hệ lidar, để loại bỏ ánh sáng nhiễu nền (như ánh sáng mặt trời hoặc các bức xạ không mong muốn), phin lọc giao thoa phổ hẹp được sử dụng nhằm chọn lọc chính xác bước sóng tín hiệu cần quan sát. Trong nghiên cứu này, hệ thống sử dụng phin lọc giao thoa FL532-3 nm do Thorlabs sản xuất, với băng thông truyền qua $\pm 1,5$ nm quanh bước sóng trung tâm 532 nm, đảm bảo tín hiệu tán xạ thu được từ laser phát đúng bước sóng mong muốn và loại bỏ nhiễu quang phổ ngoài dải [71].

Phổ truyền qua của phin lọc được thiết kế tối ưu cho các ứng dụng lidar, với độ suy giảm ánh sáng ngoài dải lớn ($>OD6$) và hiệu suất truyền qua trung tâm cao, giúp tăng cường tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SNR), đặc biệt trong điều kiện ánh sáng nền mạnh như ban ngày. Hình 2.8 là ảnh phin lọc và phổ truyền qua của phin lọc.

2.2.3. Ống nhân quang điện

Ống nhân quang điện (PMT - Photon Multiplier Tube) là một thiết bị quang điện có độ nhạy cao, được sử dụng để phát hiện ánh sáng yếu và chuyển đổi thành tín hiệu điện. Khi photon chiếu vào cửa sổ quang của PMT, nó truyền qua và tương tác với lớp photocathode, tạo ra các photoelectron thông qua hiệu ứng quang điện. Những electron này được gia tốc và hướng tới một loạt các điện cực trung gian gọi là dynode, mỗi dynode có điện áp cao hơn dynode trước đó, giúp tạo ra các electron thứ cấp qua quá trình va chạm. Quá trình này được lặp lại qua nhiều dynode, làm tăng số lượng electron theo cấp số nhân, và cuối cùng, các electron khuếch đại này được thu nhận tại anode, tạo ra một xung điện. Nhờ quá trình khuếch đại này, PMT có thể phát hiện được ánh sáng cực yếu mà các cảm biến quang thông thường không thể đo lường được. Hình 2.9 mô tả cấu trúc của một ống nhân quang điện PMT.



Hình 2.9. Cấu trúc của ống nhân quang điện [72].

PMT hoạt động theo hai chế độ chính là chế độ tương tự và chế độ đếm photon. Trong chế độ tương tự, khi ánh sáng mạnh chiếu vào PMT, số lượng photoelectron phát ra từ photocathode lớn, dẫn đến dòng electron liên tục tại anode. Điều này tạo thành tín hiệu dòng điện tỷ lệ với cường độ ánh sáng chiếu vào, phù hợp với các ứng dụng đo lường tín hiệu mạnh và liên tục. Ngược lại, trong chế độ đếm photon, khi ánh sáng rất yếu, photon tới tạo ra các xung electron riêng lẻ tại anode. Mỗi xung này đại diện cho một photon, và hệ thống sẽ đếm số xung để xác định cường độ ánh sáng. Chế độ này có độ nhạy rất cao và cung cấp tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) tốt hơn, giúp loại bỏ nhiễu nền không mong muốn [72].

Hiệu suất của PMT phụ thuộc vào nhiều yếu tố quan trọng. Hiệu suất lượng tử (QE - Quantum Efficiency) là khả năng chuyển đổi photon thành photoelectron và phụ thuộc vào vật liệu của photocathode cũng như bước sóng ánh sáng tới. Hiệu suất thu thập (CE - Collection Efficiency) thể hiện tỷ lệ photoelectron thực sự đến được dynode đầu tiên, ảnh hưởng đến độ khuếch đại của PMT. Ngoài ra, hiệu suất đếm

(Counting Efficiency) xác định số lượng xung tín hiệu hợp lệ so với tổng số photon tới, bị ảnh hưởng bởi cả QE và CE. Một yếu tố quan trọng khác là số xung tối (Dark Count), biểu thị các xung tín hiệu sinh ra do nhiễu nhiệt hoặc phát xạ tự nhiên ngay cả khi không có ánh sáng chiếu vào PMT. Để giảm nhiễu, nhiều hệ thống sử dụng PMT làm lạnh để giảm xung tối, cải thiện độ nhạy trong điều kiện ánh sáng yếu [72].

PMT còn có hệ số khuếch đại lớn, thường đạt trên 10^6 , nhờ quá trình nhân electron qua các dynode. Tuy nhiên, mức độ khuếch đại này có thể bị ảnh hưởng bởi phân bố độ rộng xung (Pulse Height Distribution - PHD), yếu tố quan trọng trong chế độ đếm photon. PHD phản ánh sự biến đổi trong độ cao của các xung tín hiệu, và nếu quá rộng, có thể làm giảm khả năng phân biệt giữa tín hiệu thực và nhiễu. Tốc độ đếm tối đa của PMT cho biết khả năng phát hiện và xử lý các xung photon trong một giây, thường đạt tới 3×10^6 xung/giây. Khi vượt qua giới hạn này, hệ thống có thể gặp phải thời gian chết (dead time), gây mất mát dữ liệu tín hiệu.

Bảng 2.4. Thông số của PMT R7400U và H6780-20 [72].

Thông số	R7400U	H6780-20
Bước sóng hoạt động	300 – 650 nm	300 – 900 nm
Đỉnh đáp ứng	420 nm	630 nm
Hệ số khuếch đại	7×10^6	$7,5 \times 10^5 - 10^6$
Dòng tối	40 – 800 Hz	80 – 400 s ⁻¹
Hiệu suất quang điện	15 %	

Trong hệ lidar khẩu độ thu lớn sử dụng PMT R7400U (Hamamatsu) hoạt động ở cả hai chế độ analog và photon counting, giúp quan trắc hiệu quả cả ban ngày và ban đêm ở bước sóng 532 nm. PMT này có bước sóng hoạt động từ 300 – 650 nm, với đỉnh đáp ứng tại 420 nm, hệ số khuếch đại $G = 7 \times 10^6$ và nhiễu dòng tối từ 40 – 800 Hz. Ngoài ra, một PMT khác là H6780-20 (Hamamatsu) cũng được sử dụng với phạm vi bước sóng rộng hơn từ 300 – 900 nm, giúp tăng độ nhạy đối với các ứng dụng yêu cầu đo ở bước sóng dài hơn. H6780-20 có độ nhạy sáng cathode 78 mA/W, độ khuếch đại từ $7,5 \times 10^5$ đến 10^6 và dòng tối dao động từ 80 – 400 s⁻¹.

Tóm lại, PMT là một thiết bị không thể thiếu trong các hệ thống đo lường ánh sáng yếu như LIDAR, nhờ khả năng khuếch đại tín hiệu mạnh, hiệu suất lượng tử cao và chế độ đếm photon chính xác. Việc lựa chọn PMT phù hợp đòi hỏi cân nhắc giữa hiệu suất khuếch đại, nhiễu tối, hiệu suất lượng tử và tốc độ đếm, nhằm đảm bảo độ chính xác cao nhất trong đo lường và nghiên cứu khí quyển.

2.2.4. Bộ xử lý tín hiệu

Tín hiệu điện từ ống nhân quang điện được khuếch đại trước khi đưa tới bộ biến đổi tương tự số. Module khuếch đại có độ méo tín hiệu thấp và băng thông cực đại lên tới 1,2 GHz, hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại là 20 lần. Bộ biến đổi tương tự số (ADC) sử dụng cho việc xử lý và ghi nhận tín hiệu lidar ở chế độ đếm photon khi khảo sát ban đêm sử dụng một dao động kí picoscope 5204 và chế độ tương tự khi khảo sát ban ngày sử dụng một dao động kí picoscope 4424 kết nối với máy tính thông qua cổng USB 2.0. Một số thông số cơ bản của hai dao động kí này được cho trong bảng 2.5.

Bảng 2.5. Các thông số chính của hệ đếm photon picoscope 5204 [73].

	PicoScope 5204	PicoScope 4424
Độ phân giải (bits)	8	12
Băng thông (MHz)	250	20
Tốc độ lấy mẫu cực đại(real time)	1GS/s (một kênh)500 MS/s (hai kênh)	80 MS/s
Buffer size (MS)	128	32
Timebase (range)	5 ns/div tới 100 s/div	100 ns/div tới 5000 s/div

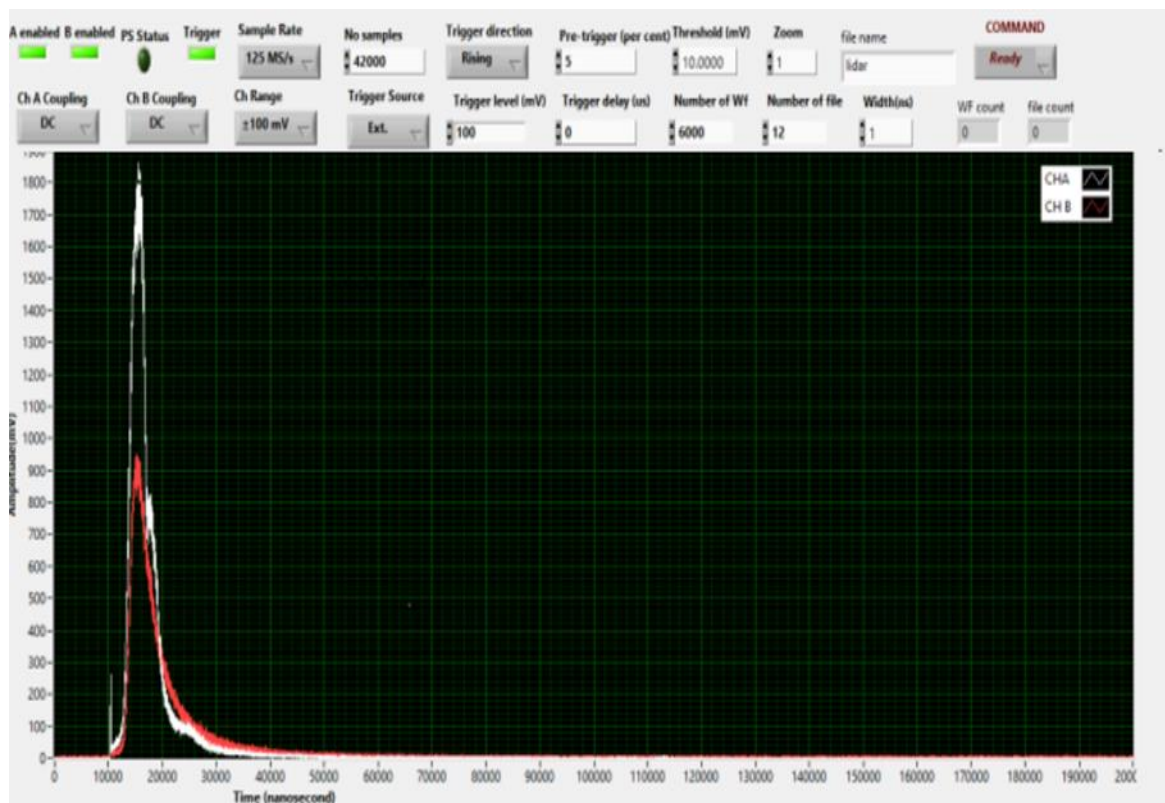
Phần mềm điều khiển, xử lý và lưu trữ tín hiệu lidar từ picoscope được xây dựng trong môi trường Labview, một phần mềm phổ biến dùng cho các ứng dụng đo đạc và điều khiển. Phần mềm này sử dụng kỹ thuật lấy mẫu, để xử lý tín hiệu lidar một cách chính xác. Tín hiệu tán xạ ngược từ một xung laser được xác định như một waveform trong chương trình. Waveform này sẽ được chia thành nhiều mẫu, mỗi mẫu đại diện cho một khoảng thời gian nhất định trong quá trình thu nhận tín hiệu. Khi tín hiệu tán xạ từ laser đi qua khí quyển và tán xạ ngược về hệ thu, phần mềm sẽ đếm số photon tích lũy trong mỗi mẫu, từ đó xác định được mức độ tán xạ tại từng thời điểm. Quá trình đếm photon được thực hiện trong toàn bộ thời gian tích phân, tức là suốt khoảng thời gian mà tín hiệu được thu nhận. Việc đếm photon theo từng mẫu giúp tăng độ chính xác và độ phân giải của tín hiệu lidar, cho phép thu được thông tin chi tiết về sự tán xạ và các đặc tính của khí quyển. Mỗi mẫu trong quá trình lấy mẫu tín hiệu lidar tương đương với độ phân giải không gian trung bình, được tính theo công thức [61]:

$$\Delta R = \frac{c * \Delta t}{2} \quad (2.1)$$

Trong đó, c là tốc độ ánh sáng trong không khí và Δt là khoảng thời gian giữa

các mẫu tín hiệu. Giá trị ΔR là độ phân giải không gian ví dụ các tín hiệu được ghi nhận với độ phân giải thời gian 100 ns, độ phân giải không gian trong khí quyển là 15m. Độ phân giải không gian có thể được chọn cố định từ chương trình trong phần mềm, việc chọn giá trị phù hợp cho ΔR rất quan trọng để hệ lidar có thể thu thập dữ liệu với độ chính xác và độ phân giải phù hợp với mục đích nghiên cứu.

Phần mềm lấy mẫu, xử lý tín hiệu, lưu trữ, hiển thị kết quả đo được lập trình trên nền Labview (hãng National Instruments) để điều khiển dao động ký số Picoscope. Phần mềm Labview cho phép người dùng điều chỉnh các thông số: Khởi tạo các thông số đo, chọn kênh đo, tốc độ lấy mẫu, chọn kênh trigger, mức trigger, chế độ đo, thời gian đo, số xung laser cần lấy trung bình.



Hình 2.10. Ảnh chụp màn hình phần mềm Labview đang thu tín hiệu lidar.

Các tín hiệu lidar, sau khi được xử lý được lưu trữ trong máy tính dưới định dạng file *.txt. Các file số liệu lưu trữ và thuận tiện cho các quá trình phân tích phục vụ cho các nghiên cứu khí quyển, ứng dụng trong khí tượng, quan trắc môi trường.

2.3. Quy trình chế tạo gương cầu

2.3.1. Cơ sở lý thuyết tính toán lựa chọn thông số kích thước gương cầu

Để thiết kế và xây dựng một hệ lidar khảo sát khí quyển hiệu quả, việc xác định các thông số tối ưu, đặc biệt là đường kính gương thu, đóng vai trò quan trọng. Đường kính gương ảnh hưởng trực tiếp tới diện tích thu tín hiệu, và do đó quyết định đến công suất tín hiệu thu về cũng như tỉ số tín hiệu trên nhiễu. Tuy nhiên, sử dụng gương thu quá lớn sẽ làm tăng đáng kể chi phí chế tạo, vận hành và độ phức tạp của hệ thống. Vì vậy, việc tiến hành mô phỏng tín hiệu lidar với các điều kiện thực tế và mô hình khí quyển đầy đủ là cần thiết để xác định thông số tối ưu của gương cầu, đảm bảo hiệu quả tối đa về mặt kỹ thuật và kinh tế khi triển khai trong thực nghiệm.

Mô phỏng tín hiệu lidar Rayleigh trong nghiên cứu này nhằm đánh giá khả năng thu nhận tín hiệu của hệ thống lidar sử dụng đầu thu PMT hoạt động ở chế độ đếm photon. Phép mô phỏng dựa trên phương trình lidar một kênh và các giá trị mô hình khí quyển tiêu chuẩn [28].

2.3.1.1. Mô hình lý thuyết

Phương trình tín hiệu lidar Rayleigh: Công suất tín hiệu thu được từ một độ cao z được mô tả bởi phương trình lidar cơ bản [11]:

$$P(z) = \frac{E_0 \cdot \frac{c}{2} \cdot \eta \cdot A_r \cdot \beta_R(z) \cdot T^2(z)}{z^2}, \quad (2.2)$$

trong đó: E_0 : Năng lượng mỗi xung laser (J)

c : Tốc độ ánh sáng (m/s)

η : Hiệu suất toàn hệ thống lidar (bao gồm tổn hao quang học, đầu thu quang điện, lọc quang học, ...)

$A_r = \frac{\pi D^2}{4}$: Diện tích gương thu với đường kính gương là D (m^2)

$\beta_R(z)$: Hệ số tán xạ ngược Rayleigh tại độ cao z ($m^{-1} \cdot sr^{-1}$)

$T(z)$: Hàm truyền trong khí quyển

z : Khoảng cách từ hệ lidar đến lớp khí quyển quan sát (m).

Hệ số tán xạ Rayleigh: Trong vùng khí quyển không có mây và bụi, tín hiệu lidar chủ yếu là do tán xạ Rayleigh của phân tử không khí. Hệ số tán xạ ngược Rayleigh tại độ cao z được xác định bởi [11]: $\beta_R(z) = \sigma_R \cdot n(z)$, với σ_R là tiết diện tán xạ Rayleigh ngược tại bước sóng 532 nm. Trong mô phỏng này, sử dụng giá trị gần đúng $\sigma_R \approx 5 \times 10^{-32} m^2/sr/$ nguyên tử. $n(z)$ là mật độ phân tử không khí tại độ cao z .

Mô hình khí quyển trong mô phỏng:

Mật độ phân tử khí quyển: Mật độ phân tử $n(z)$ được ước lượng theo mô hình khí quyển chuẩn tầng đối lưu và bình lưu dưới dạng phân bố hàm mũ [28]:

$$n(z) = n_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{H}\right), \quad (2.3)$$

trong đó: $n_0 = 2,5 \times 10^{25}$ molecules / m^3 là mật độ phân tử trung bình tại mặt đất (áp suất khí quyển 1 atm, nhiệt độ 288 K); $H = 7,64$ km là chiều cao tỉ lệ, phản ánh độ giảm mật độ khí quyển theo độ cao trong trường hợp áp suất giảm theo hàm mũ.

Suy giảm do son khí (tán xạ Mie): Son khí tồn tại chủ yếu ở các tầng khí quyển thấp, hệ số suy giảm do son khí được mô hình hóa theo hàm mũ giảm nhanh [28]:

$$\alpha_M(z) = \alpha_{M0} \cdot \exp\left(-\frac{z}{h_M}\right). \quad (2.4)$$

trong đó: $\alpha_{M0} \approx 10^{-4} m^{-1}$ là hệ số suy giảm son khí tại mặt đất; $h_M = 2$ km là chiều cao đặc trưng của son khí.

Hấp thụ ô dôn trong khí quyển: Ô dôn phân bố chủ yếu ở tầng bình lưu (15-35 km), và được mô hình theo phân bố Gaussian [28]:

$$n_{O_3}(z) = n_{O_3}^{max} \exp\left[-\frac{(z - z_{peak})^2}{2\sigma_{O_3}^2}\right]. \quad (2.5)$$

trong đó: $n_{O_3}^{max} = 8 \times 10^{18}$ nguyên tử/ m^3 ; $z_{peak} = 25$ km (độ cao nơi có mật độ cực đại) và $\sigma_z = 5$ km (độ rộng phân bố hay độ lệch chuẩn). Hệ số hấp thụ ô dôn: $\sigma_{abs}(z) = \sigma_{O_3} \cdot n_{O_3}(z)$, $\sigma_{O_3} \approx 1 \times 10^{-25} m^2$.

Hàm truyền khí quyển tổng hợp: Tổng hợp đầy đủ các thành phần suy giảm trong khí quyển, hàm truyền khí quyển $T(z)$ được viết đầy đủ như sau [11, 28]:

$$T(z) = \exp\left(-2 \int_0^z [\alpha_R(z') + \alpha_M(z') + \alpha_{abs}(z')] dz'\right). \quad (2.6)$$

trong đó: $\alpha_R(z') = \sigma_R \cdot n(z)$ là sự suy giảm do tán xạ Rayleigh; $\alpha_M(z')$ là sự suy giảm do tán xạ Mie; $\alpha_{abs}(z')$ là sự suy giảm do hấp thụ ô dôn.

Các thông số tính toán trong chế độ đếm photon

Số photon thu được trong thời gian tích hợp thu được tại độ cao z [11]:

$$N_{\text{photon}}(z) = \frac{P(z) \cdot N_{\text{xung}}}{E_{\text{photon}}}, \quad (2.7)$$

với: $N_{\text{xung}} = \text{PRF} \cdot t$ là số xung laser phát trong thời gian tích hợp t ; $E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda}$ là

năng lượng của một photon tại bước sóng $\lambda = 532$ nm.

Độ phân giải không gian: Để cải thiện tỉ số tín hiệu trên nhiễu, tín hiệu thường được gộp theo độ phân giải không gian Δz . Số photon sau khi gộp là [11]:

$$N_{\text{bin}} = N_{\text{photon}} \cdot \text{bin}_{\text{factor}} \text{ với } \text{bin}_{\text{factor}} = \frac{\Delta z}{c \cdot \Delta t / 2}$$

Tỉ số tín hiệu trên nhiễu: Trong chế độ đếm photon, nhiễu chủ yếu do nhiễu thống kê tuân theo phân bố Poisson, trong mô phỏng này bỏ qua số photon nhiễu nền cho trường hợp lý tưởng. Do đó, SNR tại mỗi độ cao được tính bởi [11]:

$$\text{SNR}(z) = \frac{N_{\text{bin}}}{\sqrt{N_{\text{bin}}}} = \sqrt{N_{\text{bin}}}$$

Từ đó cho thấy, SNR tăng theo căn bậc hai của số photon thu được, đồng nghĩa với việc tăng theo căn của thời gian tích hợp, năng lượng xung, diện tích gương thu và hiệu suất hệ thống.

Thông số mô phỏng: Trong tính toán mô phỏng này dựa trên cơ sở lý thuyết đã được trình bày chi tiết ở trên và sử dụng các thông số của các linh kiện thiết bị đã được giới thiệu ở mục 2.2. Các thông số cơ bản được trình bày trong bảng 2.1.

Bảng 2.6. Các thông số cơ bản trong mô phỏng lựa chọn kích thước gương cầu.

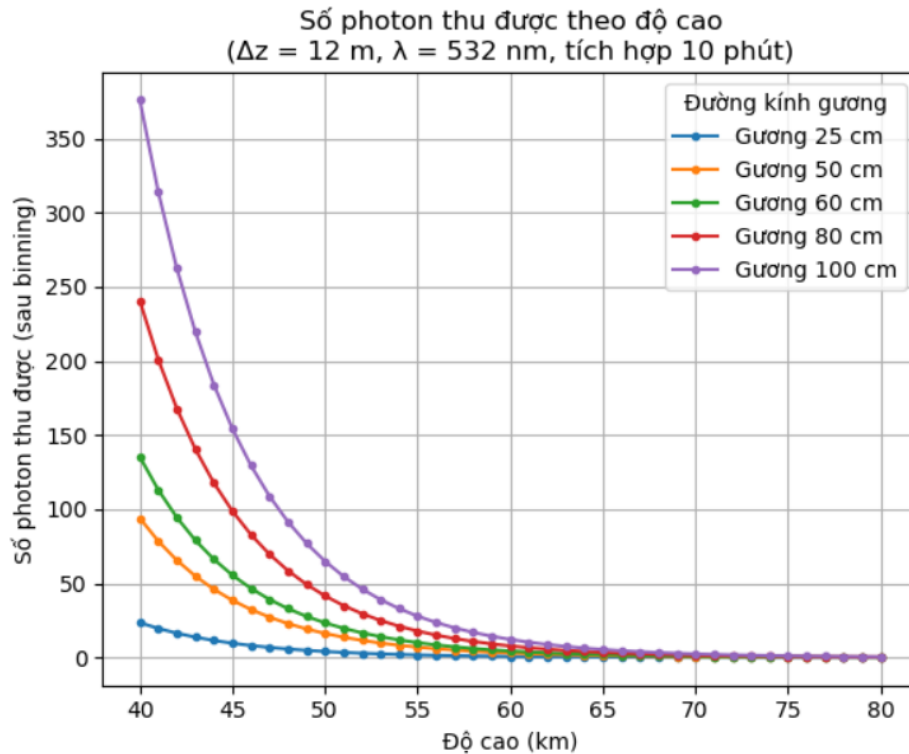
Thông số	Ý nghĩa
Bước sóng λ	532 nm
Năng lượng mỗi xung E0	180 mJ
Tần số bắn xung (PRF)	10 Hz
Độ rộng xung laser	5 ns
Đường kính gương thu	25-100 cm
Hiệu suất hệ thống η	Bao gồm hiệu suất quang học, bộ lọc, PMT, Picoscope...
Thời gian tích hợp	10-60 phút
Độ phân giải không gian Δz	10-50 m

2.3.1.2. Kết quả mô phỏng lựa chọn thông số gương cầu

Dựa vào mô hình lý thuyết trong phần này chúng tôi đưa ra các kết quả tính toán lượng tín hiệu thu được cũng như tỉ số tín hiệu trên nhiễu khi sử dụng các gương cầu có kích thước khác nhau để đưa ra lựa chọn đường kính phù hợp để gia công chế tạo. Từ đường kính gương đã được lựa chọn, mô phỏng đánh giá sự ảnh hưởng của trường

nhìn, cũng như tiêu cự của gương đến công suất nhiều nền thu nhận. Từ đó đưa ra lựa chọn phù hợp. Các kết quả tính toán mô phỏng đều sử dụng chung một điều kiện và thông số đầu vào. Chương trình mô phỏng tính toán được viết trên mã nguồn mở python.

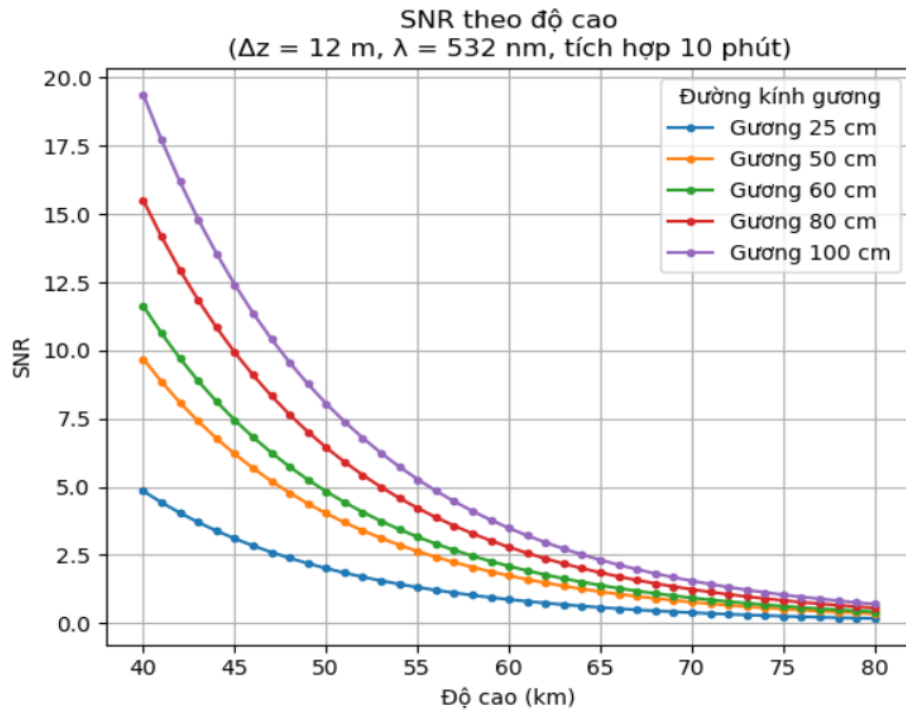
Đánh giá ảnh hưởng của đường kính gương đến số photon thu nhận



Hình 2.11. Biểu diễn số photon thu được của hệ lidar ở các độ cao khác nhau khi sử dụng bộ thu quang học gương cầu có đường kính từ 25 đến 100 cm.

Trên đồ thị hình 2.11, biểu diễn số photon thu được theo độ cao (40–70 km), với các đường kính gương khác nhau (25, 50, 60, 80 và 100 cm), độ phân giải không gian là 12 m, thời gian tích hợp 10 phút, ta thấy:

Gương đường kính 25 cm chỉ thu được lượng photon rất nhỏ, dưới 10 photon tại độ cao khoảng 50 km và giảm về gần 0 tại khoảng 55 km trở lên. Điều này cho thấy gương 25 cm là không đủ lớn để thực hiện quan sát hiệu quả tại độ cao từ 50 km trở lên. Với gương đường kính 60 cm, số photon thu được tại độ cao 50 km là khoảng 30 photon và vẫn giữ được trên mức vài photon tại khoảng 60 km. Điều này cho phép hệ thống lidar đạt được tín hiệu đủ tốt để thực hiện phép đo tin cậy ở độ cao 50 km và vẫn có khả năng đo được ở những độ cao cao hơn, mặc dù độ chính xác sẽ thấp hơn. Gương đường kính 100 cm cung cấp số photon lớn nhất, vượt trội so với hai gương nhỏ hơn. Tuy nhiên, số photon vượt mức yêu cầu có thể không thực sự cần thiết và dẫn đến việc gia tăng đáng kể chi phí và độ phức tạp của hệ thống lidar (do trọng lượng lớn, khó khăn trong vận hành, chi phí lắp đặt và bảo trì cao).



Hình 2.12. Biểu diễn tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) ở độ cao trên 40 km với các đường kính gương cầu có kích thước từ 25 đến 100 cm.

Trên đồ thị hình 2.12 biểu diễn tỉ số tín hiệu trên nhiễu thay đổi theo độ cao với các đường kính gương khác nhau (thông thường, giá trị $\text{SNR} \geq 3$ là điều kiện lý tưởng để đảm bảo chất lượng, độ tin cậy cao của phép đo lidar trong nghiên cứu khí quyển). Với gương có đường kính 25 cm, SNR giảm xuống giá trị 3 khi độ cao gần tới 45 km và giảm xuống nhỏ hơn 1 khi ở độ cao 58 km trở lên ($\text{SNR} < 1$ là giá trị thể hiện không thực hiện được phép đo lidar). Khi tăng kích thước đường kính gương, giá trị SNR giảm xuống 3 ở độ cao lớn hơn. Cụ thể là 53 km, 55 km, 59 km, 62 km tương ứng với đường kính gương 50, 60, 80 và 100 cm. Giá trị SNR giảm về 1 khi đạt ngưỡng độ cao 66 km, 69 km, 72 km, 75 km tương ứng với đường kính gương. Các giá trị này đều được tính toán với độ phân giải không gian là 12 m và thời gian tích hợp là 10 phút. Các giá trị có thể đạt cao hơn khi giảm độ phân giải không gian và tăng phân giải thời gian.

Từ kết quả mô phỏng và phân tích tín hiệu lidar Rayleigh, có thể thấy rõ ràng rằng việc tăng đường kính gương thu sẽ giúp cải thiện đáng kể tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) và số photon thu được, đặc biệt là trong điều kiện đo đặc khí quyển tầng cao. Tuy nhiên, việc gia công, chế tạo và vận hành các gương thu với kích thước lớn hơn 60 cm (như 80–100 cm trở lên) lại gặp phải nhiều hạn chế và thách thức lớn về kỹ thuật cũng như kinh tế. Cụ thể như sau:

Về gia công và chế tạo: Việc chế tạo gương thu kích thước lớn (trên 60 cm) yêu cầu công nghệ gia công quang học rất cao cấp, có độ chính xác cực kỳ cao nhằm đảm

bảo độ nhẵn bề mặt, đồng nhất hình dạng, và độ chính xác của tiêu cự gương. Những sai số nhỏ trong gia công (chỉ vài μm đến hàng chục μm) sẽ gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng tia thu nhận, làm giảm đáng kể hiệu suất hệ thống lidar. Hơn nữa, gương lớn đòi hỏi vật liệu chất lượng cao (ví dụ như gương phủ nhôm chân không chất lượng cao) nhằm tránh các khiếm khuyết về quang học và tăng độ bền trong quá trình vận hành lâu dài.

Về chi phí và hiệu quả đầu tư: Chi phí sản xuất gương lớn không tăng tuyến tính theo kích thước mà tăng rất nhanh (thường tăng theo cấp số nhân). Một gương thu đường kính 80–100 cm thường có giá thành cao gấp vài lần so với một gương 60 cm cùng loại vật liệu và độ chính xác. Điều này dẫn đến việc đầu tư gương lớn hơn 60 cm không mang lại lợi ích kinh tế tương ứng với sự cải thiện về hiệu suất.

Về vận hành và bảo trì hệ thống: Gương kích thước lớn có trọng lượng và kích thước công kênh, gây ra khó khăn đáng kể trong vận chuyển, lắp đặt và cân chỉnh quang học. Việc căn chỉnh chính xác hệ thống lidar sử dụng gương lớn rất phức tạp, dễ bị ảnh hưởng bởi các yếu tố bên ngoài như dao động cơ học, nhiệt độ môi trường, và áp suất khí quyển. Điều này làm tăng đáng kể chi phí vận hành và bảo trì thường xuyên hệ thống.

Về khả năng linh động và triển khai thực nghiệm: Với kích thước lớn, việc triển khai hệ thống lidar tại các địa điểm thực nghiệm khác nhau sẽ gặp rất nhiều hạn chế về điều kiện cơ sở hạ tầng (phòng đo, nhà trạm), đặc biệt trong các ứng dụng đòi hỏi sự linh hoạt và khả năng di chuyển hệ thống lidar đến các khu vực khác nhau.

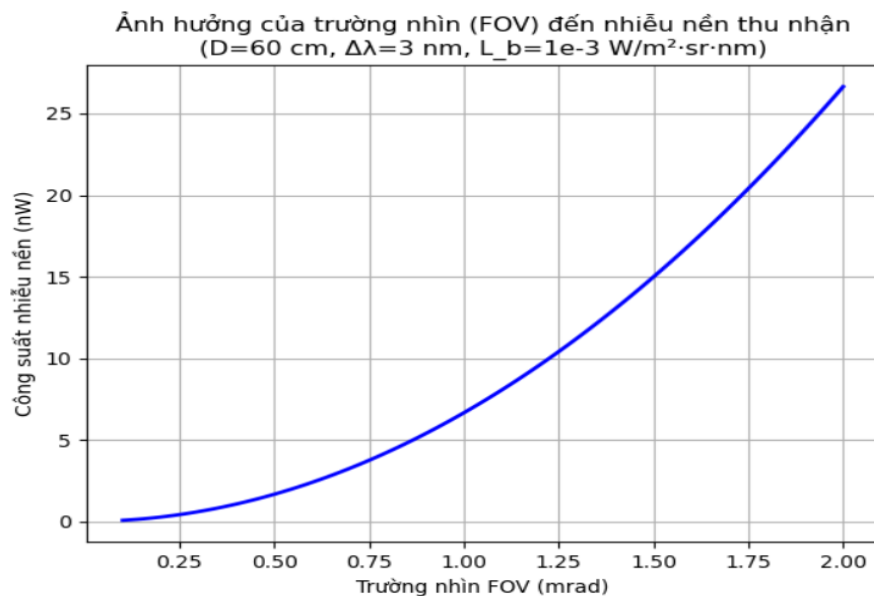
Như vậy, mặc dù việc tăng kích thước gương thu lớn hơn 60 cm có thể mang lại lợi ích rõ rệt về mặt lý thuyết (tăng cường tín hiệu lidar), nhưng trên thực tế, những hạn chế về công nghệ gia công, chi phí chế tạo, độ phức tạp trong vận hành và bảo trì hệ thống lại không cân xứng với sự cải thiện đó.

Trên cơ sở cân nhắc tất cả các yếu tố kỹ thuật, kinh tế và khả năng triển khai thực tế nêu trên, gương thu có đường kính 60 cm được đánh giá là lựa chọn tối ưu nhất. Lựa chọn này vừa đảm bảo đạt được hiệu suất tín hiệu (SNR và số photon thu được) đủ cao để đo đặc tin cây ở tầng khí quyển mục tiêu, vừa giảm thiểu tối đa các khó khăn kỹ thuật và kinh tế, đảm bảo khả năng vận hành ổn định và hiệu quả thực tế cao nhất trong nghiên cứu lidar Rayleigh khảo sát khí quyển tầng cao.

Đánh giá ảnh hưởng của tiêu cự gương đến hiệu quả phép đo lidar

Gương thu trong hệ thống lidar đóng vai trò quan trọng trong việc thu nhận và hội tụ tín hiệu quang học tán xạ từ khí quyển về đầu thu (thường là ống nhân quang PMT hoặc các cảm biến đếm photon). Tiêu cự gương thu, cùng với đường kính, ảnh

hướng trực tiếp đến trường nhìn (FOV - Field of View) của hệ thống lidar, và do đó ảnh hưởng đáng kể tới chất lượng và độ tin cậy của phép đo. Trong biểu đồ hình 2.13 cho thấy sự ảnh hưởng của trường nhìn đến nhiều nền thu nhận trong phép đo lidar. Tương tự vậy biểu đồ hình 2.14 biểu diễn sự ảnh hưởng của tiêu cự gương thu đến nhiều nền thu nhận. Trong mô phỏng này, đường kính lỗ chặn trường sử dụng là 2 mm, độ rộng phổ phin lọc giao thoa sử dụng là 3 nm.



Hình 2.13. Biểu diễn ảnh hưởng của trường nhìn đến nhiều nền thu nhận của hệ lidar sử dụng gương cầu 60 cm.

Khi tiêu cự gương lớn, góc hội tụ của gương nhỏ hơn. Điều này giúp giảm trường nhìn của hệ thống lidar (FOV nhỏ hơn), ví dụ khi tiêu cự gương lớn hơn 180 cm.

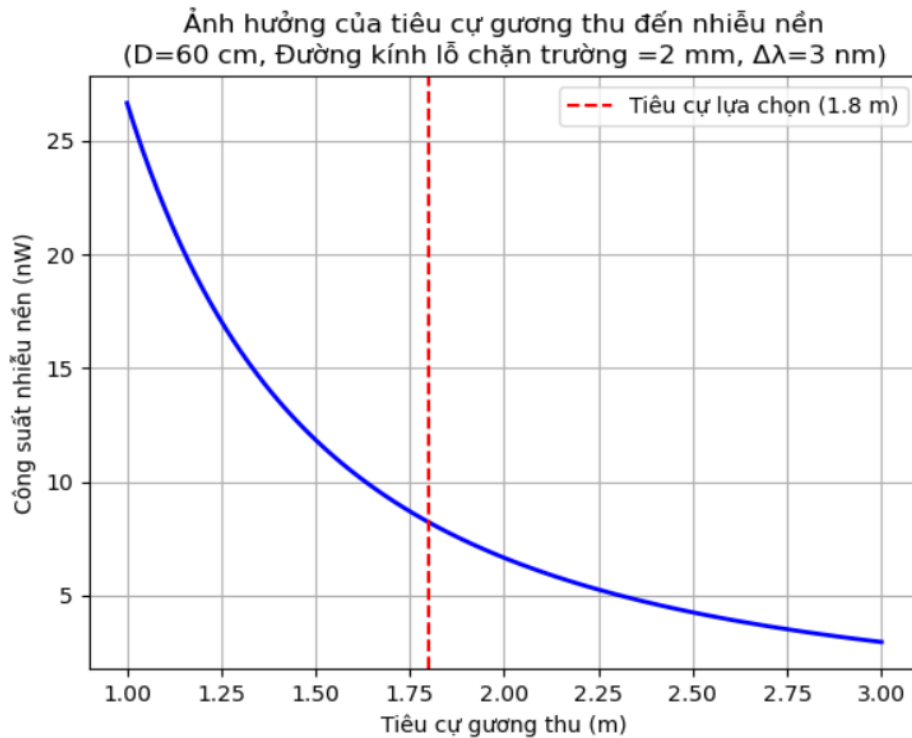
Ưu điểm:

- Giảm tín hiệu nền không mong muốn (background noise) từ ánh sáng bầu trời, ánh sáng phản xạ từ môi trường xung quanh, và nhiễu do các nguồn sáng ngoại lai khác.
- Tăng cường độ chính xác phép đo, cải thiện rõ rệt SNR khi đo tín hiệu rất yếu từ tầng khí quyển cao (trên 50 km).
- Cho phép phép đo lidar chính xác hơn về độ cao và độ phân giải góc tốt hơn.

Nhược điểm:

- Việc căn chỉnh hệ thống lidar trở nên khó khăn hơn do yêu cầu độ chính xác cao hơn trong việc điều chỉnh và duy trì căn chỉnh quang học.
- Cần phải sử dụng các giá đỡ quang học, bộ chống rung chuyên dụng để giữ cố định hệ thống quang học với độ ổn định cao.

Tiêu cự dài sẽ làm tăng kích thước vật lý và chiều dài hệ thống quang học, gây khó khăn cho việc bố trí và triển khai thực nghiệm.



Hình 2.14. Biểu diễn ảnh hưởng của tiêu cự gương thu đến nhiễu nền thu nhận của hệ lidar sử dụng gương cầu 60 cm.

Khi tiêu cự ngắn, góc hội tụ của gương lớn hơn, dẫn đến trường nhìn của hệ lidar mở rộng hơn (FOV lớn hơn).

Ưu điểm:

- Dễ dàng căn chỉnh hơn, yêu cầu độ chính xác thấp hơn trong việc điều chỉnh hệ thống.
- Kích thước tổng thể của hệ thống nhỏ gọn hơn, thuận tiện cho việc lắp đặt, vận chuyển và triển khai thực nghiệm.

Nhược điểm:

- FOV lớn dẫn tới tăng lượng tín hiệu nền, nhiễu nền thu được từ ánh sáng ngoại lai.
- Tăng đáng kể các tín hiệu nhiễu do nền trời, giảm chất lượng SNR, đặc biệt là ở độ cao lớn, nơi tín hiệu Rayleigh rất yếu.
- Khả năng phân biệt tín hiệu lidar thực từ các tín hiệu nhiễu giảm, gây ảnh hưởng đến độ tin cậy của phép đo tầng cao khí quyển (trên 50 km).

Tiêu cự 180 cm được lựa chọn trong nghiên cứu là kết quả tối ưu hóa giữa khả năng hội tụ tín hiệu tốt (FOV nhỏ vừa đủ để hạn chế nhiễu nền) và khả năng căn chỉnh, vận hành thực tế (tầm với của một người có chiều cao trung bình 1,7 m). Với

tiêu cự này, hệ lidar đạt được trường nhìn cân bằng, đủ nhỏ để hạn chế các tín hiệu nhiễu từ nền trời, đồng thời vẫn giữ được khả năng linh hoạt, thuận tiện trong căn chỉnh quang học, đảm bảo phép đo thực nghiệm đạt chất lượng và độ chính xác cao.

Việc thay đổi tiêu cự lớn hơn hoặc nhỏ hơn giá trị này sẽ dẫn đến việc đánh đổi giữa độ chính xác, khả năng vận hành thực tế và tính linh hoạt triển khai. Do đó, tiêu cự 180 cm với đường kính 60 cm được coi là lựa chọn tối ưu, cân bằng tốt giữa hiệu quả phép đo lidar và các yếu tố kỹ thuật, vận hành hệ thống trong nghiên cứu thực tế.

2.3.2. Chế tạo gương cầu

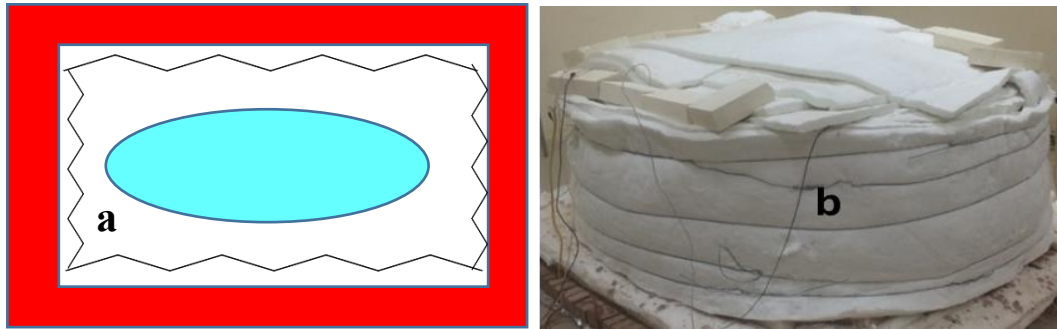
Chọn vật liệu làm phôi gương

Việc lựa chọn thủy tinh làm phôi gương quang học dựa trên các đặc tính quang học, cơ học và khả năng gia công. Thủy tinh là vật liệu vô định hình, được tạo thành từ quá trình làm nguội nhanh khối silicat nóng chảy. Thành phần chính bao gồm silica (SiO_2), soda (Na_2O), vôi (CaO) cùng với các phụ gia như boron oxide (B_2O_3) để cải thiện tính chất cơ học và quang học. Sự kết hợp này giúp điều chỉnh độ giãn nở nhiệt, độ bền cơ học và khả năng chống ăn mòn, tạo ra sản phẩm có độ trong suốt cao và dễ gia công thành các mặt quang học như gương cầu, gương parabol. Thủy tinh được phân loại dựa trên thành phần hóa học. Một số loại phổ biến gồm borosilicate (SiO_2 , B_2O_3) có hệ số giãn nở nhiệt thấp, khả năng chống sốc nhiệt tốt; soda-lime (SiO_2 , Na_2O , CaO) chiếm khoảng 90% sản lượng thủy tinh toàn cầu, dễ gia công nhưng khả năng chống sốc nhiệt kém hơn; phosphate (P_2O_5) có độ giãn nở nhiệt cao nhưng độ bền hóa học thấp.

Trong chế tạo gương quang học, thủy tinh soda-lime được ưu tiên nhờ nhiệt độ nóng chảy thấp, giúp tiết kiệm năng lượng, đồng thời có độ cứng phù hợp cho quá trình mài và đánh bóng. Độ ổn định hóa học của nó hạn chế sự ảnh hưởng của các dung dịch đánh bóng và làm sạch. Hơn nữa, đặc tính cơ học và độ dẻo của thủy tinh này cho phép sử dụng nhiều loại bột mài khác nhau, tối ưu hóa quy trình chế tạo và đảm bảo chất lượng sản phẩm cuối cùng. Vì vậy, loại vật liệu này được lựa chọn để làm phôi gương.

Ghép phôi gương

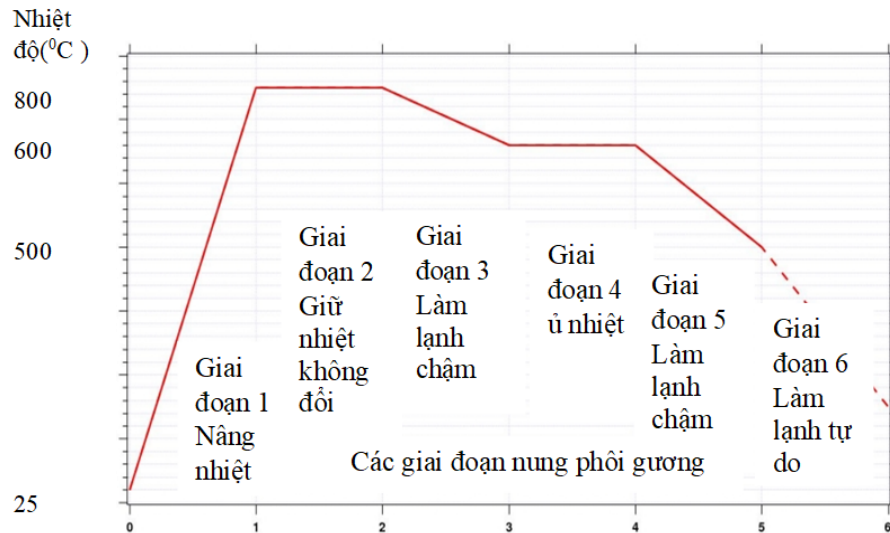
Mục tiêu chế tạo gương cầu có đường kính 60 cm, tiêu cự 1,8m. Đối với thông số này phôi gương cần đáp ứng được độ dày và độ cứng. Do phôi kính thủy tinh được lựa chọn chỉ dày 19 mm không đủ đảm bảo các tiêu chí này, nhóm nghiên cứu đã áp dụng kỹ thuật nung để ghép các tấm thủy tinh, tạo ra phôi gương dày hơn, đảm bảo độ ổn định.



Hình 2.15. Lò nung sử dụng điện: a) Mô hình lò nung; b) Lò nung thực tế.

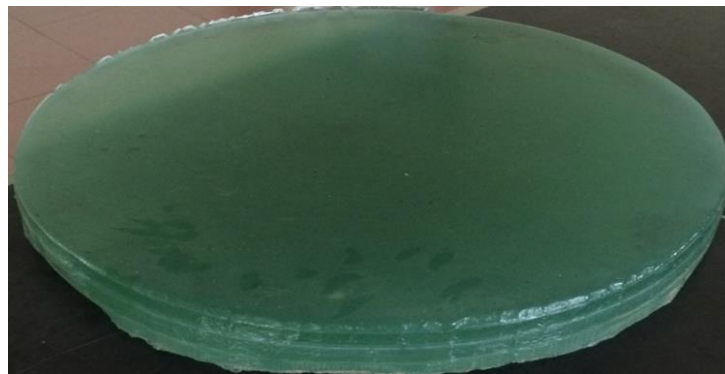
Hình 2.15 a) mô phỏng lò nung, hình 2.15 b) hình lò nung thực tế. Quá trình nung yêu cầu nhiệt độ trên 800°C , trong khi lò nung công nghiệp kích thước lớn rất tốn kém. Để khắc phục điều này, nhóm nghiên cứu đã thiết kế và chế tạo một lò nung đối xứng có đường kính trong 1,2 m, chiều cao 0,6 m và thành lò dày 0,4 m, có khả năng nung phôi gương đường kính lên tới 1 m. Lò sử dụng 5 dây đốt nhiệt điện trở công suất cao, đảm bảo cung cấp nhiệt đồng đều. Các dây này được bố trí tại đáy, thân và nắp lò để tối ưu hóa phân bố nhiệt. Hệ thống kiểm soát nhiệt gồm 10 cảm biến nhiệt chịu được 1200°C , giúp theo dõi và điều chỉnh nhiệt độ chính xác. Thành lò làm bằng gạch bông xốp cao nhôm (Al_2O_3), chịu nhiệt tới 1800°C , và lớp bảo ôn ngoài bằng bông gốm thủy tinh giúp giảm thiểu tổn thất nhiệt.

Quá trình nung được thực hiện theo sáu giai đoạn nhằm đảm bảo tính đồng đều cơ học và quang học của phôi gương. Các giai đoạn được mô tả trên hình 2.16. Trước tiên, các tấm thủy tinh được cắt với đường kính 40 – 60 cm, làm sạch, sấy khô và xếp chồng ba lớp vào lò. Nhiệt độ tăng dần từ nhiệt độ phòng lên 800°C trong 24 giờ để tránh sốc nhiệt, sau đó giữ ở 800°C trong 2 giờ để các tấm kính kết dính. Tiếp theo, nhiệt độ giảm nhanh xuống 600°C , sau đó hạ chậm xuống 500°C trong 24 giờ và giữ ở mức này trong 48 giờ để ổn định cấu trúc. Cuối cùng, nhiệt độ giảm từ 500°C về nhiệt độ môi trường trong 96 giờ.



Hình 2.16. Đường nhiệt nung phôi gương [74].

Sau quy trình nung kéo dài 7 ngày, sản phẩm phôi gương đường kính 60 cm với độ dày cuối cùng 57 mm được tạo ra. Bề mặt phôi gương đạt độ đồng đều cao nhờ căn chỉnh thẳng bằng trước khi nung bằng thước Livô. Phôi gương này có độ cứng phù hợp để gia công thành gương cầu hoặc gương parabolic, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật trong chế tạo hệ quang học chính xác [74].

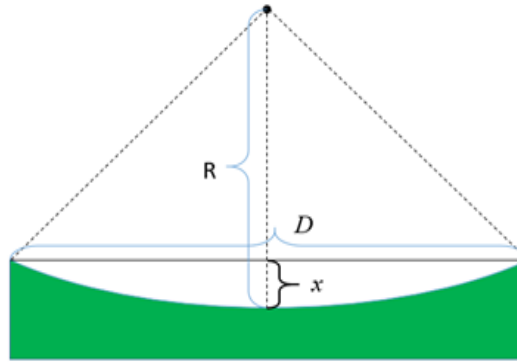


Hình 2.17. Sản phẩm phôi gương đường kính 60 cm.

Mài gương cầu

Phôi gương sau khi ghép đạt yêu cầu về độ kết dính và đồng đều sẽ được gia công bề mặt để tạo ra biên dạng chính xác, đảm bảo độ an toàn trong quá trình xử lý.

Quá trình gia công bề mặt gương cầu: Quá trình mài gương là công đoạn quan trọng để đảm bảo độ chính xác của hệ thống quang học, đặc biệt trong ứng dụng Lidar. Nhóm nghiên cứu đã chế tạo một máy mài chuyên dụng với mặt phẳng quay, sử dụng đĩa mài có kích thước khác nhau và bột mài phù hợp theo từng giai đoạn. Bề mặt gương cầu được tạo ra nhờ sự chuyển động của đĩa mài, bột mài và phôi gương, cùng với sự điều chỉnh vận tốc quay và áp suất để kiểm soát độ hoàn thiện bề mặt.

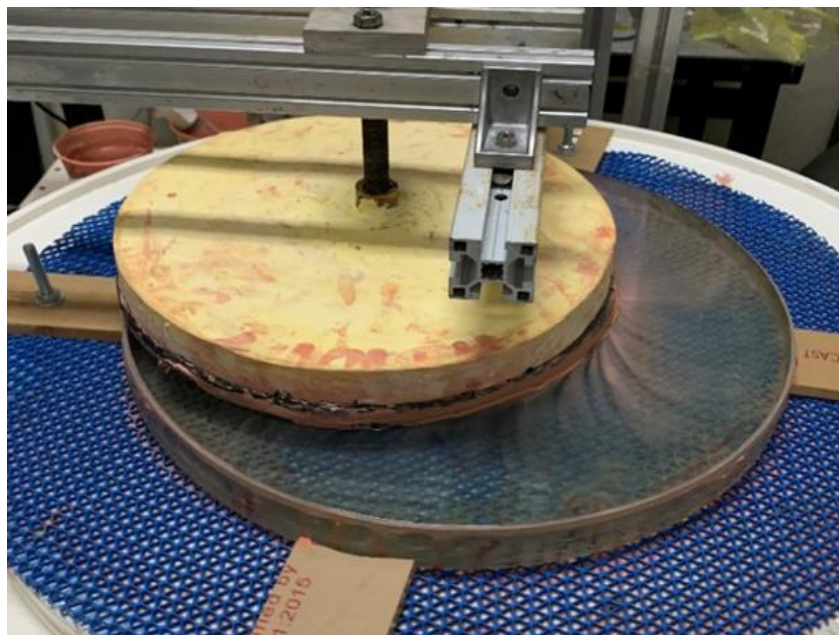


Hình 2.18. Thông số cơ bản sử dụng tính độ sâu tâm gương.

Mài gương tuân theo công thức [75]:

$$x = \frac{D^2}{8R} \quad (2.8)$$

Trong đó, D là đường kính gương cầu, R là bán kính cong. Gương cầu có khẩu độ $f/D = 3$ được tính toán với $D = 60$ cm, $R = 360$ cm. Độ sâu tâm gương x tính được là 12,5 mm.



Hình 2.19. Mùi gương quang học bằng máy.

Hình 2.19 là hệ máy mài bề mặt gương. Các giai đoạn mài gương bao gồm:

Mài thô: Tạo biên dạng mặt cầu và độ sâu trung tâm mong muốn. Sử dụng bột mài #40 đến #120 để bào mòn thủy tinh đến độ sâu cần đạt. Với gương $D = 60$ cm, độ sâu trung tâm đạt 12,5 mm.

Mài tinh: Giảm độ nhám bề mặt, sử dụng bột mài từ #320 đến #1800. Mỗi loại bột được sử dụng trong 6-10 giờ, cần vệ sinh kỹ để tránh xước bề mặt.

Mài bóng: Thực hiện qua hai bước. Đầu tiên, sử dụng Al_2O_3 để làm mịn bề mặt.

Tiếp theo, dùng Ce_2O để đạt độ bóng cao nhất. Ở giai đoạn cuối, đĩa mài cứng được thay bằng đĩa nhựa đường mềm, ép theo biên dạng gương bằng nước nóng.

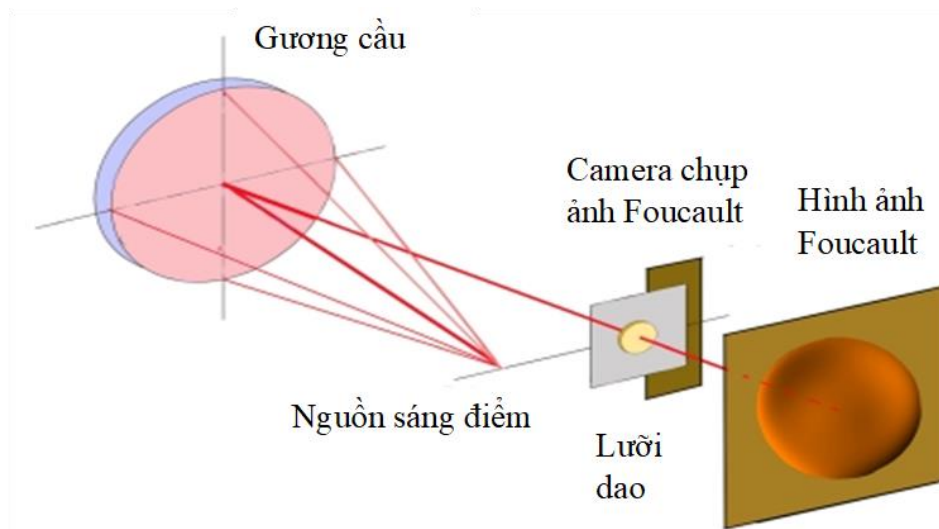
Trong quá trình mài bóng, gương được kiểm tra liên tục bằng phương pháp Foucault và Hartmann. Quá trình kết thúc khi bề mặt đạt độ bóng hoàn toàn, với biên dạng cầu hoặc parabolic chính xác theo yêu cầu quang học.

2.3.3. Đánh giá biên dạng bề mặt gương cầu

Phương pháp Foucault

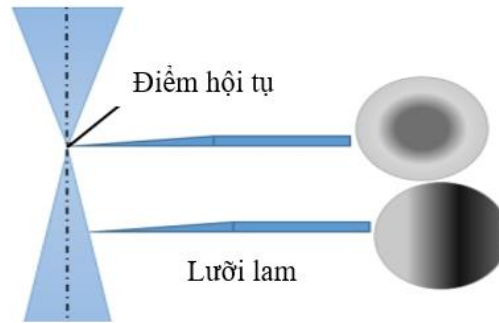
Phương pháp Foucault là một kỹ thuật quan trọng để đo biên dạng gương cầu và phi cầu với khẩu độ lớn mà không cần bề mặt tham chiếu. So với các phương pháp đo kiểm truyền thống, phương pháp này có ưu điểm về độ chính xác cao và thời gian thực hiện nhanh chóng [76].

Nguyên lý đo dựa vào sự phản xạ ánh sáng từ bề mặt gương. Khi ánh sáng hội tụ tại tâm cong của gương cầu và bị cắt bởi một lưỡi dao chắn sáng, hiện tượng đảo ảnh xảy ra. Nếu bề mặt gương là cầu hoàn hảo, ánh sáng phản xạ tập trung tại một điểm duy nhất. Nếu có sai lệch, sự dịch chuyển của bóng cho phép xác định độ lồi hoặc lõm của mặt gương.



Hình 2.20. Sơ đồ nguyên lý phương pháp Foucault kiểm tra bề mặt gương cầu [76].

Phương pháp này sử dụng một hệ thống đo kiểm gồm máy ảnh có độ chính xác cao (sai số dịch chuyển $10\text{ }\mu\text{m}$), lưỡi dao chắn sáng và nguồn sáng điểm. Máy ảnh được gắn trên giá đỡ có thể điều chỉnh vị trí để thu nhận hình ảnh phản xạ.

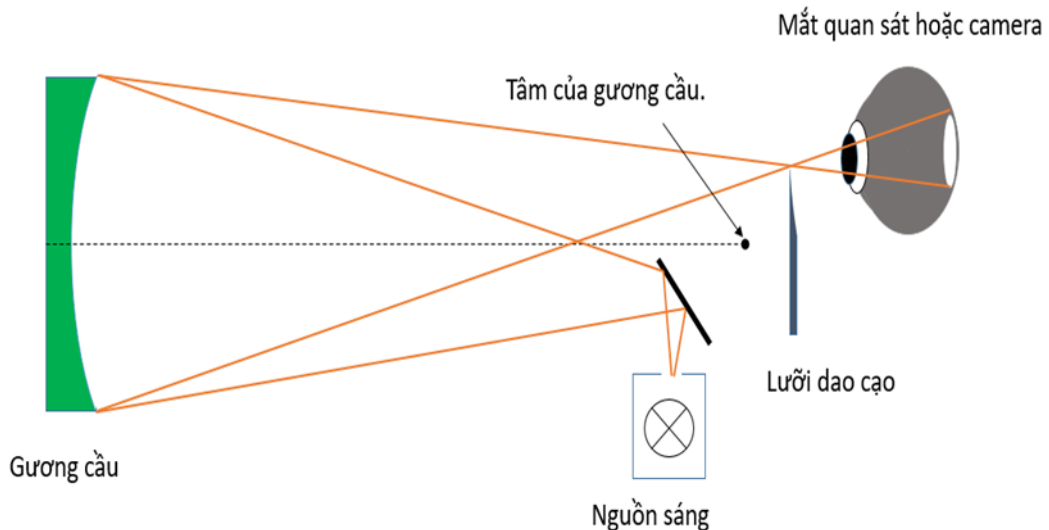


Hình 2.21. Sơ đồ quá trình đo Foucault.

Mối quan hệ giữa độ lệch tâm cong C tại bán kính r so với tâm cong đỉnh C_0 được tính theo công thức [76]:

$$C = C_0 = \frac{r^2}{2R}, \quad (2.9)$$

trong đó, R là bán kính cong tại đỉnh gương, r là khoảng cách từ quang trục tới điểm đang xét.



Hình 2.22. Sơ đồ bố trí các dụng cụ sử dụng trong thí nghiệm đo kiểm gương cầu bằng phương pháp Foucault [77].

Hệ đo Foucault bao gồm [77]:

- Nguồn sáng điểm: Được tạo ra từ một đèn LED công suất thấp, dẫn qua sợi quang.
- Camera thu ảnh: Ghi lại ánh sáng phản xạ từ gương cầu.
- Lưỡi dao chắn sáng: Cắt ánh sáng tại điểm hội tụ để tạo bóng giúp phân tích biên dạng gương.

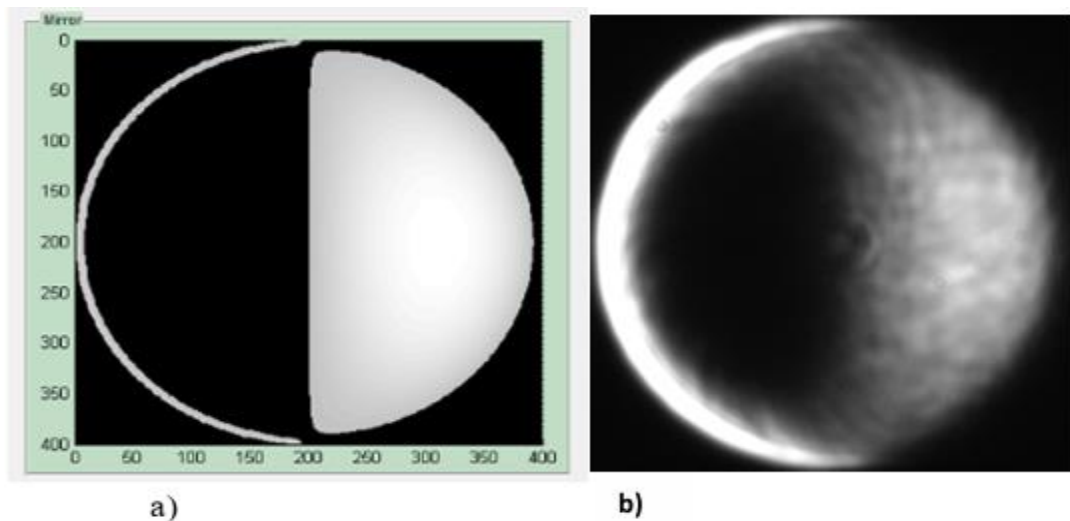
Quy trình đo kiểm gồm 4 bước chính:

1. Xác định quang trục của gương cầu để căn chỉnh hệ thống đo chính xác.
2. Xác định tâm cong gương cầu bằng cách điều chỉnh vị trí camera và nguồn sáng.
3. Chụp ảnh bề mặt gương tại tâm cong, thu nhận dữ liệu phản xạ.
4. So sánh ảnh thực tế với mô phỏng lý thuyết để đánh giá biên dạng mặt gương.

Bảng 2.7. Kết quả đo tiêu cự gương cầu.

Lần đo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R = 2f$ (mm)	3601	3599	3600	3601	3600	3599	3599	3600	3601
Tiêu cự (mm)	1800,5	1799,5	1800	1800,5	1800	1799,5	1799,5	1800	1800,5

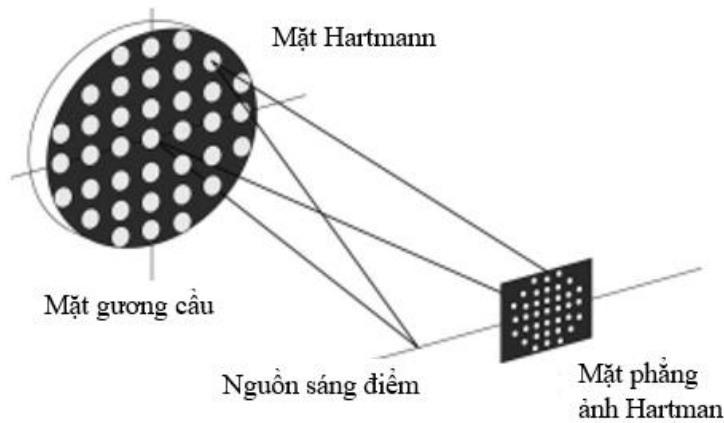
Kết quả đo kiểm cho thấy mặt gương có tiêu cự $f = 1800 \pm 0,3$ mm, phù hợp với yêu cầu quang học của hệ Lidar.



Hình 2.23.a) Kết quả mô phỏng Foucault [76]; b) Ảnh chụp Foucault gương cầu 600mm tiêu cự 1800 mm.

Chúng tôi đã xây dựng thành công hệ đo kiểm bề mặt gương cầu dựa trên nguyên lý chụp ảnh phản xạ. Kết quả thực nghiệm đo kiểm mặt gương cầu đường kính 600 mm được so sánh với hình ảnh mô phỏng như thể hiện trong hình 2.23. Biên dạng mặt gương được đánh giá định tính, kết quả cho thấy mặt gương có dạng hình cầu tiêu cự của gương $f = 1800 \pm 0,3$ mm. Chất lượng gương chế tạo ra qua việc kiểm tra này đã đáp ứng tốt các yêu cầu kỹ thuật của một kính thiên văn thu tín hiệu trong hệ Lidar. Sai khác của phép đo đã được đánh giá để có thể hoàn thiện trong những cải tiến tiếp theo của phương pháp đo kiểm bề mặt gương cầu.

Phương pháp Hartmann



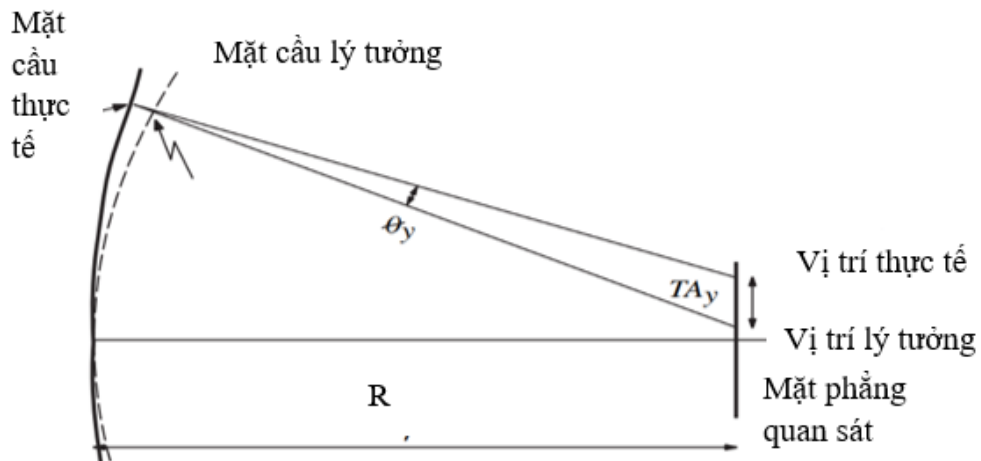
Hình 2.24. Sơ đồ nguyên lý Hartmann [76].

Phương pháp Hartmann được sử dụng để kiểm tra biên dạng gương quang học bằng cách phân tách chùm ánh sáng tới thành nhiều tia nhỏ qua một mặt nạ đục lỗ. Khi các tia sáng phản xạ từ bề mặt gương, sai lệch của chúng giúp xác định biến dạng bề mặt gương so với lý tưởng.

Nguyên lý phản xạ ánh sáng trong phương pháp Hartmann được biểu diễn bằng công thức [76]:

$$S_2 = S_1 - 2(S_1 \cdot N)N \quad (2.10)$$

trong đó: S_1 là tia tới, N là pháp tuyến tại điểm phản xạ, S_2 là tia phản xạ.



Hình 2.25. Biểu diễn độ lệch mặt cầu thực tế và lý tưởng.

Mặt nạ Hartmann được thiết kế với các lỗ tròn đường kính 10 mm, tâm cách nhau 30 mm, được gia công bằng máy cắt CNC. Mặt nạ được đặt song song với bề mặt gương cầu, cho phép chùm sáng phân tách đều và phản xạ về camera thu ảnh đặt tại tâm gương cầu [76].

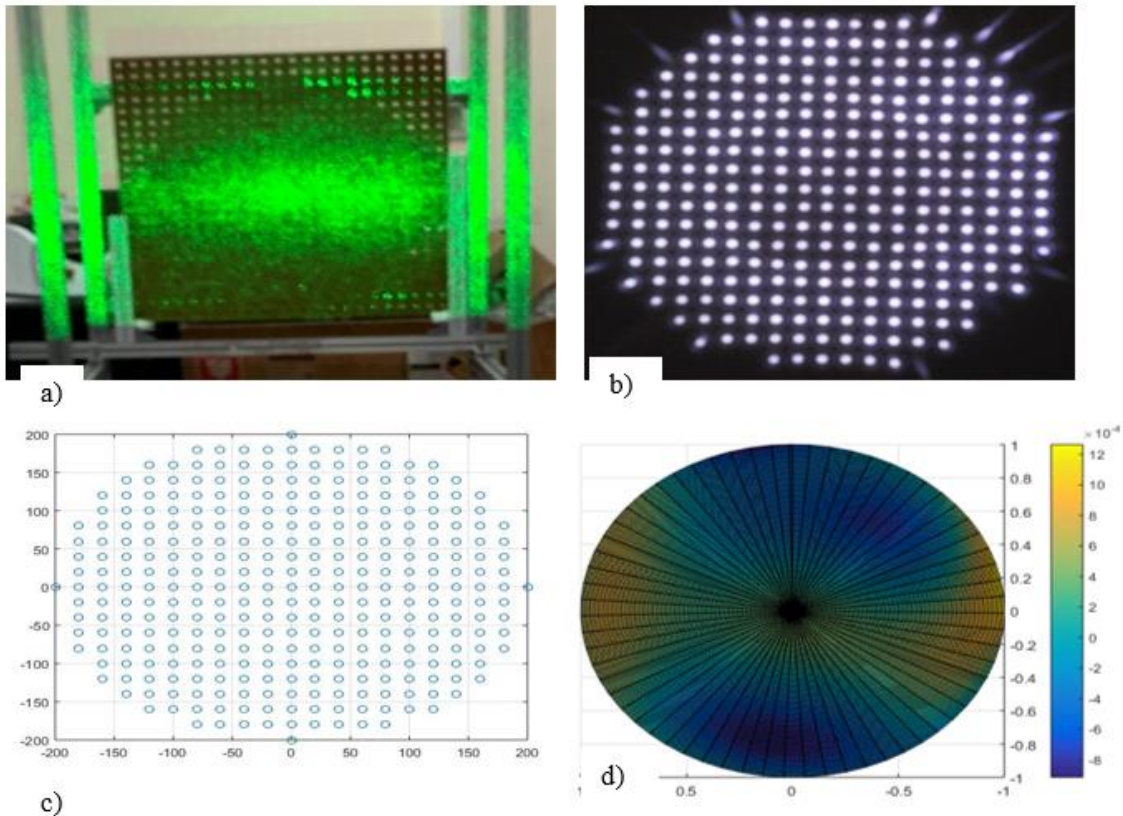
Quy trình xử lý ảnh gồm các bước:

- ✓ Thu ảnh chấm sáng từ mặt gương bằng camera.
- ✓ Xác định vị trí tâm của từng chấm sáng để đo độ lệch.
- ✓ So sánh vị trí thực tế với mô phỏng lý thuyết để tính toán sai lệch.
- ✓ Tính độ lệch mặt sóng dựa trên các đa thức Zernike.

Sự biến dạng của mặt sóng $W(x, y)$ được khai triển bằng đa thức Zernike:

$$W(x, y) = \sum_{p=1}^n C_p \cdot Z_p(x, y), \quad (2.11)$$

trong đó, n là số lượng các đa thức Zernike được chọn; C_p là hệ số của đa thức Zernike tương ứng.



Hình 2.26. kết quả đo Hartman: a) Ảnh mặt gương trước khi chụp; b) Ảnh mặt Hartman chụp thực tế; c) Phần mềm Matlab dựng lại các chấm sáng từ ảnh chụp Hartman; d) Kết quả đo độ lệch so với mặt cầu chuẩn.

Hình 2.26 a) ảnh chụp mặt Hartmann được đặt trước mặt gương cầu và được căn chỉnh sao cho các lỗ Hartmann ở các vị trí đối xứng với tâm gương cầu. Hình 2.26 b) là ảnh chụp mặt Hartmann được thực hiện trong phòng tối để thu được ảnh mặt Hartmann rõ nhất. Kết quả thu được thấy rõ các chấm sáng, tuy nhiên phía ngoài cùng có một số ảnh bị nhiễu xạ. Hình 2.26 c) là hình ảnh các chấm sáng được phần mềm Matlab dựng lại từ số liệu của ảnh chụp mặt Hartmann thực tế. Từ tọa độ các

điểm ảnh của các chấm sáng được xác định bằng thuật toán xác định Centroid, số liệu tọa độ thực tế thu được sẽ so sánh với số liệu chuẩn từ mô phỏng lý thuyết. Hình 2.26 d) biểu diễn sự sai lệch giữa mặt cầu thực tế và mặt cầu mô phỏng lý thuyết. Để dựng lại được hình ảnh mặt cầu thực tế chúng tôi cần tính được đạo hàm của mặt sóng theo các phương x, y là $\frac{\partial W(x,y)}{\partial x}$, $\frac{\partial W(x,y)}{\partial y}$ là độ dốc mặt sóng cục bộ. Sử dụng khớp hàm Zernike để vẽ lại được bề mặt gương được đo kiểm từ đó đánh giá được biên dạng bề mặt gương, so sánh sai lệch giữa mặt cầu thực tế và mặt cầu mô phỏng lý tưởng. Kết quả của đo kiểm bằng phương pháp Hartmann cho thấy sự sai khác giữa mặt cầu lý thuyết mô phỏng và mặt cầu thực tế được đo kiểm cỡ 0,5 μm .

Quá trình đo kiểm bằng phương pháp Foucault và Hartmann đã giúp xác định chính xác biên dạng bề mặt gương cầu. Kết quả đo cho thấy gương có tiêu cự $f = 1800 \text{ mm}$ với sai số nhỏ, đảm bảo yêu cầu thu nhận tín hiệu cho hệ lidar. Sai lệch mặt cầu đo bằng phương pháp Hartmann chỉ khoảng 0,5 μm , cho thấy chất lượng bề mặt gương đạt mức độ chính xác cao, phù hợp để sử dụng trong các hệ thống quang học yêu cầu độ nhạy cao.

Mạ nhôm bề mặt phản xạ gương cầu

Hệ số phản xạ của gương cầu mạ nhôm phụ thuộc vào bước sóng của ánh sáng mà nó phản chiếu [77]. Gương cầu mạ nhôm có khả năng phản xạ tốt, đặc biệt trong vùng ánh sáng khả kiến, một phần của vùng tia cực tím (UV) và vùng hồng ngoại (IR). Hệ số phản xạ của nhôm trong vùng ánh sáng khả kiến có bước sóng từ 400 nm đến 700 nm thường dao động từ 85% đến 90%. Lớp mạ nhôm có thể đạt được độ phản xạ tối ưu nếu lớp phủ được mạ đều và không lẫn tạp chất. Gương mạ nhôm thường có hiệu quả phản xạ mạnh ở bước sóng trung bình (khoảng 500 nm - 600 nm) của ánh sáng khả kiến. Gương cầu mạ nhôm có khả năng phản xạ cao trong vùng tia cực tím (khoảng 100 nm đến 400 nm), hệ số phản xạ trong vùng này có thể đạt lên đến 90% hoặc cao hơn đối với các lớp mạ nhôm chất lượng cao. Nhôm cũng có khả năng phản xạ tốt trong vùng hồng ngoại gần (khoảng 700 nm đến 1400 nm), hệ số phản xạ có thể đạt tới 90% đến 95%. Tuy nhiên, trong các bước sóng hồng ngoại xa (từ 1400 nm trở lên), khả năng phản xạ của nhôm sẽ giảm dần. Lớp mạ nhôm chất lượng cao có thể đạt được hệ số phản xạ lên đến 90% trong các vùng ánh sáng khả kiến và hồng ngoại gần. Nếu mặt mạ nhôm được bảo vệ chống lại quá trình oxy hóa (như qua một lớp phủ bảo vệ), khả năng phản xạ sẽ được duy trì lâu dài. Do đó, bảo vệ bề mặt bằng các lớp phủ bảo vệ hoặc lớp mạ đặc biệt là quan trọng.



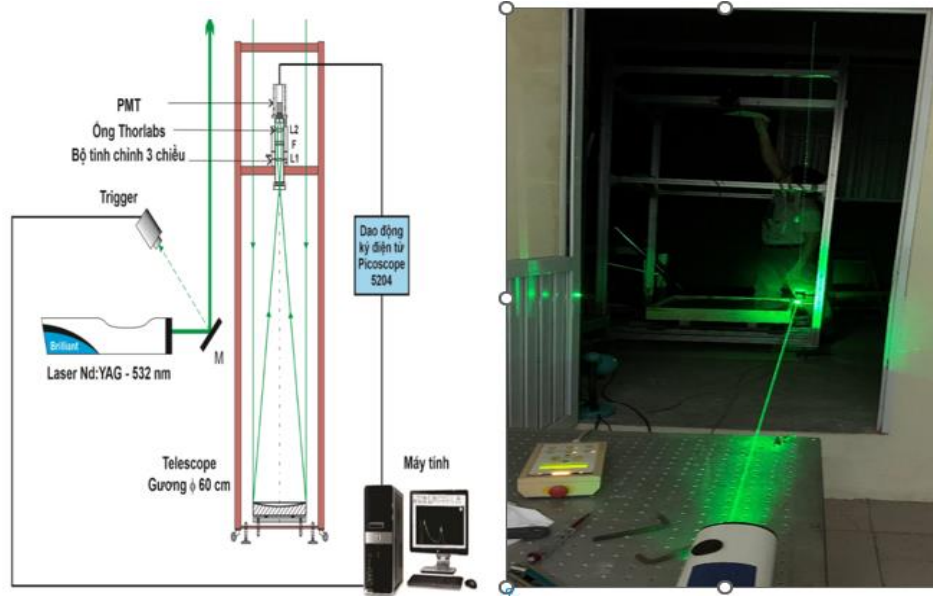
Hình 2.27. Gương cầu đường kính 60 cm tiêu cự 180 cm sau khi mạ nhôm.

Gương cầu của chúng tôi được gửi đi mạ tại trung tâm quang điện tử, viện ứng dụng công nghệ Nacentech, C6 Thanh Xuân Bắc, Q. Thanh Xuân, TP. Hà Nội. Hình 2.27 là sản phẩm gương cầu mạ nhôm đã chế tạo thành công và được đưa vào sử dụng. Các thông số chính của gương đã được nêu trong bảng 2.3.

2.4. Đánh giá hệ lidar khẩu độ thu lớn

2.4.1. Lắp đặt hệ lidar khẩu độ thu lớn

Gương cầu đường kính $D = 60$ cm sau khi hoàn thiện được mạ nhôm có khả năng phản xạ tốt ánh sáng laser có bước sóng 532 nm, được tích hợp vào hệ Lidar để tiến hành khảo sát khí quyển tại Hà Nội. Quá trình lắp đặt hệ Lidar được thực hiện chúng tôi sử dụng các thanh nhôm định hình và giá đỡ gương có khả năng vi chỉnh nhờ các ốc được gắn dưới đáy, đảm bảo sự chính xác trong việc căn chỉnh gương. Các thành phần khung nhôm định hình được cố định và kết nối với nhau bằng các vít chạy, tạo nên một cấu trúc ổn định. Hệ thu quang điện được lắp đặt trên khung nhôm, tại độ cao 1,8 m, tương ứng với mặt phẳng tiêu cự của gương cầu. Hệ thu này được thiết kế để có thể vi chỉnh vị trí nhờ các giá đỡ có khả năng dịch chuyển, giúp tối ưu hóa khả năng thu tín hiệu quang học từ hệ Lidar. Cấu trúc và tính linh hoạt của hệ thống này đảm bảo khả năng thu tín hiệu chính xác và hiệu quả từ khí quyển, phục vụ cho các phép đo và khảo sát khí quyển tầng cao. Hình 2.28 sơ đồ thiết kế hệ lidar và hệ lidar thực tế với gương cầu đường kính $D = 60$ cm.



Hình 2.28. Sơ đồ thiết kế và hệ lidar thực tế với gương cầu đường kính 60 cm.

Bảng 2.8. Các thông số chính của hệ lidar đàn hồi.

Hệ phát	Laser Nd:YAG laser	
	Bước sóng	532 nm
	Năng lượng xung (cực đại.)	180 mJ
	Tốc độ lặp lại	10 Hz
	Độ rộng xung	5 ns
	Độ phân kì	0,5 mrad
Hệ thu quang	Kính thiên văn phản xạ Newtonian	
	Đường kính kính thiên văn	600 mm
	Trường nhìn (FOV)	1 mrad
	Độ phản xạ R	> 90% vùng 500-600 nm
Hệ quang điện	R7400U	H6780-20
Thế cung cấp (V)	+11,5 đến +15,5	
Hệ số khuếch đại	7×10^6	$7,5 \times 10^5 - 10^6$
Dòng tối	40 – 800 Hz	$80 - 400 \text{ s}^{-1}$
Độ nhạy sáng của Cathode (mA/W)	78	
Hiệu suất quang điện	15 %	
Hệ xử lý tín hiệu		
	Độ phân giải của ADC	8 bit
	Băng thông	250 MHz

Việc tích hợp các bộ phận quang học vào hệ lidar của các nhóm nghiên cứu khác trên thế giới cũng được thực hiện thường xuyên. Theo bài báo của Michael Gerding et al. (2024) nhóm sử dụng kính hai thiên văn Newtonian 70 cm với các giá đỡ có động cơ bước cho phép thay đổi độ nghiêng và xoay hệ gương [96]. Kích thước

đường kính gương hệ thu quang học tương tự như gương của chúng tôi nhưng nhóm đã kết hợp được hai gương đường kính 70 cm bằng các sợi cáp quang, làm tăng đáng kể diện tích thu phổ tán xạ ngược từ khí quyển tầng cao. Kết quả nhóm đã xác định được phân bố nhiệt độ lên đến độ cao 90 km, những dữ liệu về sự phân bố nhiệt độ của nhóm thu được phù hợp với các số liệu của trung tâm dự báo thời tiết của châu Âu (ECMWF-IFS) trong khoảng từ 35 đến 50 km, nhưng kết quả cũng cho thấy sự khác biệt lớn nhiều ở độ cao trên 50 km. Theo bài báo của Robin Wing et al. (2018) nhóm đã phát triển nhiều loại gương quang học có kích thước khác nhau: hệ lidar tăng cường mạnh với 4 gương đường kính 50 cm tiêu cự 1,5 m, hệ lidar tăng cường thấp và lidar Mia son khí với gương có đường kính 20 cm tiêu cự 0,6 đến 0,8 m, hệ lidar Raman Ni tơ và lidar Raman hơi nước đường kính gương 80 cm tiêu cự 2.4 m [97]. Nhóm đã thu được kết quả khoa học quan trọng là sự phân bố nhiệt độ lên tới 90 km, các kết quả về phân bố nhiệt độ và sai số được so sánh bởi các hệ lidar khác nhau và so với mô hình MSISE-90. Theo bài báo của XuZou et al. (2021) hệ lidar Rayleigh của nhóm có thể thu được tín hiệu tán xạ ngược từ khí quyển tầng cao, giúp thu thập thông tin về nhiệt độ khí quyển ở khoảng cách lên đến 85 km bằng hệ thống thu phát khẩu độ lớn đường kính gương thu 1000 mm, năng lượng xung Laser Nd:YAG 320 mJ [98]. Tín hiệu tán xạ ngược từ hai kênh được sử dụng cùng nhau để tăng dải không gian khảo sát của hệ lidar. Mật độ khí quyển từ 35 đến 55 km được phát hiện bởi kênh thu bước sóng 589 nm, và mật độ khí quyển từ 55 đến 90 km được thu thập bởi kênh thu bước sóng 532 nm, có độ nhạy tương đối cao. Từ dữ liệu thu được nhóm xác định được phân bố nhiệt độ khí quyển từ độ cao 35 km đến 90 km độ cao khảo sát khí quyển tăng mạnh do công suất nguồn laser cao và đường kính gương thu tín hiệu lớn. Về giá trị một hệ lidar khảo sát khí quyển tầng cao trên thế giới có giá trên 100000 đô la Mỹ, hệ lidar tại Việt Nam có giá khoảng 40000 đô la Mỹ. So sánh về giá trị gương quang học có đường kính 60 cm sản phẩm của nước ngoài có giá khoảng 2,4 tỉ tiền Việt Nam trong khi gương cầu đường kính 60 cm do chúng tôi chế tạo có giá khoảng 200 triệu bằng 1/12 giá thành sản phẩm tương tự nếu mua ở nước ngoài [99].

2.4.2. Mô phỏng quá trình thu tín hiệu lidar

Phương trình Lidar: Dạng đơn giản nhất của phương trình lidar có dạng là:

$$P(R) = K.G(R).\beta(R).T(R), \quad (2.12)$$

trong đó, công suất thu được P phụ thuộc vào khoảng cách R, được tính theo (2.12). Trong đó hệ số K đặc trưng cho hiệu suất của hệ lidar; G(R) là hàm chông chập phụ thuộc vào khoảng cách R. Hàm G(R) mô tả thông số của hệ đo liên quan đến góc mở chùm laser và trường thu của kính thiên văn. Hai hệ số đầu tiên này hoàn toàn phụ

thuộc vào cách thiết lập và bố trí các bộ phận của hệ lidar và do đó có thể điều chỉnh để thu được tín hiệu tốt nhất. Hệ số $\beta(R)$ là hệ số tán xạ đàn hồi ngược ở khoảng cách R . $T(R)$ là hàm truyền qua, đặc trưng cho độ suy giảm năng lượng của ánh sáng trong quá trình truyền từ nguồn laser phát lên khí quyển và tán xạ ngược lại hệ thu. Công thức tính hiệu suất của hệ Lidar có dạng sau [78]:

$$K = P_0 \frac{c\tau}{2} \cdot A \cdot \eta, \quad (2.13)$$

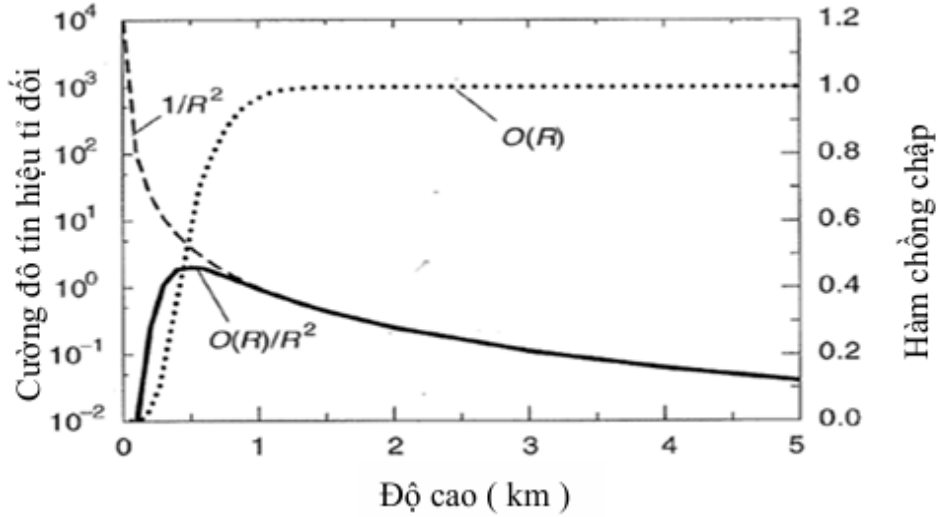
trong đó P_0 là công suất trung bình của một xung laser đơn, τ là độ rộng xung theo thời gian. Do đó, $E_0 = P_0 \cdot \tau$ là năng lượng xung, $c \cdot \tau$ là quãng đường một xung laser đi được trong không khí trong một khoảng thời gian xác định. Hệ số $\frac{1}{2}$ xuất hiện trong phương trình (2.7) vì quá trình tán xạ ngược bao gồm cả quãng đường đi và quãng đường về. Khi tín hiệu lidar thu được ở một thời điểm t sau khi phần đầu xung laser phát đi, ánh sáng tán xạ ngược sẽ di chuyển một khoảng là $R_1 = \frac{ct}{2}$. Đồng thời, phần cuối xung di chuyển một khoảng $R_2 = \frac{c(t-\tau)}{2}$. Do đó, $\Delta R = R_1 - R_2 = \frac{c\tau}{2}$ là độ rộng xung hiệu dụng khi mà từ đó ánh sáng tán xạ ngược thu được tại một thời điểm và được gọi là độ rộng xung hiệu dụng. A là diện tích của kính thiên văn quang học thu nhận các tín hiệu tán xạ ngược từ khí quyển, η là hiệu suất của toàn hệ thống, hiệu suất này bao gồm hiệu suất quang của toàn bộ đầu phát và đầu thu điện tử. Các thông số về hệ đo lidar được tính như sau [78]:

$$G(R) = \frac{O(R)}{R^2}. \quad (2.14)$$

Với $O(R)$ là hàm chồng chập trường phát chùm tia laser và trường thu của hệ quang học. Cường độ tín hiệu giảm theo hàm mũ bình phương của khoảng cách R^{-2} là do diện tích đầu thu là một phần của mặt cầu bán kính R bao quanh khối tán xạ. Nếu chúng ta xét một môi trường tán xạ đẳng hướng nằm cách đầu phát một khoảng R , tiết diện kính thiên văn hệ thu quang là A , thì cường độ tín hiệu được xác định [78]:

$$\frac{I_c}{I_s} = \frac{A}{4\pi R^2}. \quad (2.15)$$

Với I_c là cường độ tín hiệu tại kính thiên văn, I_s là cường độ tán xạ tổng, lấy trên tất cả các hướng. Nói cách khác, góc mở A/R^2 là góc thu của lidar đối với tán xạ ngược từ khoảng cách R . Hệ số 4π không xuất hiện tường minh trong phương trình lidar vì nó bị khử bởi hệ số tán xạ ngược $\beta(R)$ được mô tả sau. Nếu chúng ta bắt đầu thu tín hiệu với $O(R) = 1$ ở khoảng cách là 10m, tín hiệu sẽ nhỏ hơn 6 bậc ở khoảng cách 10km do hiệu ứng hình học.



Hình 2.29. Ảnh hưởng của hàm chông chập lên tín hiệu lidar [78].

Các kỹ thuật đo đặc điều chỉnh khoảng cách trường phát và trường thu sao cho giảm tối đa hiệu ứng hình học này. Như được minh họa trong hình 2.29, một hàm chông chập bất kỳ được nhân với R^{-2} . Các tín hiệu mạnh ở trường gần có độ lớn nhỏ đi vài bậc, trong phần lớn các trường hợp, khí quyển làm cho tín hiệu giảm dần theo khoảng cách [78].

Hệ số tán xạ ngược $\beta(R)$ là thông số khí quyển chính, quyết định cường độ của tín hiệu lidar thu được. Hệ số này đặc trưng cho độ tán xạ ánh sáng của môi trường truyền sáng theo hướng ngược về hướng phát. Hệ số tán xạ ngược là giá trị cụ thể của hệ số tán xạ cho trường hợp góc tán xạ là 180° . Gọi N_j là mật độ hạt tán xạ loại j trong thể tích khối không khí được chiếu xung laser và $d\sigma_{j,sca}(\pi, \lambda)/d\Omega$ là tiết diện tán xạ ngược của hạt ở bước sóng λ . Hệ số tán xạ ngược có dạng sau đây [78]:

$$\beta(R, \lambda) = \sum_j N_j(R) \frac{d\sigma_{j,sca}}{d\Omega}(\pi, \lambda), \quad (2.16)$$

với tổng được lấy cho tất cả các loại hạt tán xạ. Do mật độ hạt có đơn vị là m^{-3} và tiết diện tán xạ vi phân có đơn vị là $m^2 sr^{-1}$ nên hệ số tán xạ ngược có đơn vị là $m^{-1} sr^{-1}$. Nếu đơn giản hóa quá trình tán xạ bằng cách giả thiết tán xạ là đẳng hướng và chỉ có một loại hạt tán xạ trong môi trường, mối liên hệ giữa hệ số tán xạ ngược và tiết diện tán xạ ngược đẳng hướng có dạng đơn giản sau [78]:

$$4\pi\beta = N\sigma_{sca}. \quad (2.17)$$

Cường độ ánh sáng tán xạ ngược từ khối không khí có thể tích $V = A_L \Delta R = A_L c \tau / 2$, với A_L là tiết diện chùm tia Laser, tỉ lệ với tiết diện tán xạ $A_s = N\sigma_{sca} V$ của tất cả các hạt trong thể tích V . Do đó, cường độ tương đối của ánh sáng tán xạ là [78]:

$$\frac{I_s}{I_0} = \frac{A_s}{A_L} = \frac{N\sigma_{sca}c\tau}{2} = \frac{4\pi\beta c\tau}{2}. \quad (2.18)$$

Với phương trình trên, ta thu được tỉ lệ của cường độ ánh sáng thu được với cường độ ánh sáng phát đi [78]:

$$\frac{I_c}{I_0} = \frac{A\beta c\tau}{2R^2}. \quad (2.19)$$

Về phải của phương trình này cho thấy một phần của phương trình lidar liên quan trực tiếp tới kích thước, tính chất các hạt tán xạ và góc mở của lidar. Trong khí quyển, ánh sáng laser tán xạ bởi các phân tử khí và các hạt son khí. Khi đó, $\beta(R, \lambda)$ được viết dưới dạng tổng hệ số tán xạ của phân tử và của son khí [78].

$$\beta(R, \lambda) = \beta_{mol}(R, \lambda) + \beta_{aer}(R, \lambda). \quad (2.20)$$

Hệ số tán xạ phân tử (ký hiệu bằng chỉ số dưới mol), chủ yếu xảy ra cho các phân tử nitơ và oxi, phụ thuộc vào mật độ khí và do đó giá trị của nó giảm dần theo độ cao. Hệ số tán xạ ngược giảm dần theo khoảng cách nếu quan sát từ mặt đất và tăng dần nếu quan sát từ trên không do càng lên cao mật độ phân tử khí càng giảm. Hệ số tán xạ do các son khí (ký hiệu bằng chỉ số dưới aer, viết tắt của aerosol) thay đổi theo không gian và thời gian. Các hạt son khí cũng rất đa dạng: từ những hạt chất lỏng nhỏ li ti, các hạt khí thải rắn chứa sulfat, khói than, hợp chất hữu cơ, những hạt muối biển, bụi khoáng, những hạt mưa, tinh thể băng [78].

Hệ số cuối cùng trong phương trình lidar đặc trưng cho phần ánh sáng bị suy giảm khi ánh sáng laser truyền trong môi trường khí quyển và tán xạ ngược lại. Hệ số truyền qua $T(R)$ được chuẩn hóa trong vùng $[0,1]$ và có dạng sau:

$$T(R, \lambda) = \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr \right]. \quad (2.21)$$

Hệ số này được tính toán dựa trên định luật Lambert – Beer - Bouguer cho tín hiệu lidar. Tích phân được lấy theo khoảng cách từ hệ lidar đến khoảng R nơi ghi nhận tín hiệu đàn hồi từ khí quyển. Ta nhân với hệ số 2 vì quãng đường truyền gồm cả quá trình đi lẫn về. Tổng hao hụt trong quá trình truyền ánh sáng được gọi là độ suy hao và $\alpha(R, \lambda)$ là hệ số suy hao. Nó được định nghĩa tương tự như hệ số tán xạ ngược là tích của mật độ hạt tán xạ và tiết diện tán xạ $\sigma_{j,sca}$ cho các loại hạt tán xạ j khác nhau.

$$\alpha(R, \lambda) = \sum_j N_j(R) \sigma_{j,sca}(\lambda). \quad (2.22)$$

Hệ số suy hao xuất hiện bởi sự tán xạ và hấp thụ ánh sáng của các phân tử khí, các hạt son khí. Hệ số suy hao có thể viết dưới dạng tổng của 4 thành phần:

$$\alpha(R, \lambda) = \alpha_{m,sca}(R, \lambda) + \alpha_{m,abs}(R, \lambda) + \alpha_{aer,sca}(R, \lambda) + \alpha_{aer,sca}abs(R, \lambda), \quad (2.23)$$

trong đó các chỉ số sca và abs ký hiệu cho sự tán xạ và hấp thụ. Do tán xạ theo các hướng khác nhau cũng đóng góp vào sự suy hao của ánh sáng, tiết diện suy hao bằng tổng tiết diện tán xạ σ_{sca} và tiết diện hấp thụ σ_{abs} .

$$\sigma_{ext}(\lambda) = \sigma_{sca}(\lambda) + \sigma_{abs}(\lambda). \quad (2.24)$$

Đơn vị của hệ số suy hao là m^{-1} .

Như đã thấy trong phương trình (2.20) và (2.23), cả α và β đều phụ thuộc vào bước sóng ánh sáng tới. Như vậy, phương trình lidar có dạng:

$$P(R, \lambda) = P_0 \frac{c\tau}{2} \cdot A \cdot \eta \cdot \frac{O(R)}{R^2} \cdot \beta(R, \lambda) \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr \right]. \quad (2.25)$$

Phương trình lidar này được sử dụng để xử lý và phân tích các tín hiệu lidar với giả thiết tín hiệu lidar chỉ tán xạ một lần trong môi trường và chùm laser nằm hoàn toàn trong thị trường kính thiên văn tức $O(R)=1$.

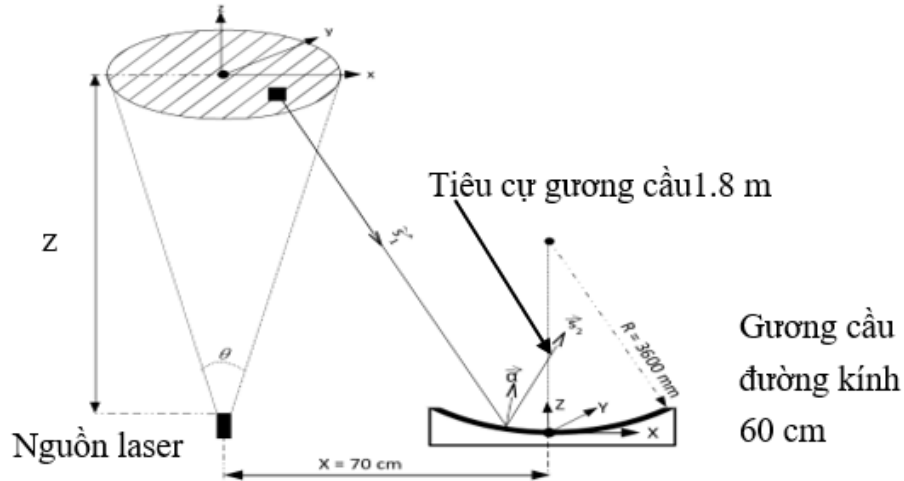
Phương pháp Raytracing mô phỏng hàm chồng chập và cường độ tín hiệu lidar

Các tính toán của tín hiệu lidar sử dụng hệ lidar của Viện Vật lý được thiết kế nhằm đo đặc khí quyển tầng cao, trong đó có ảnh ở các mặt phẳng ảnh chạy dọc theo quang trục của gương cầu. Chúng tôi khảo sát một hệ lidar được đơn giản hoá so với hệ đo đặc thực, trong đó có một gương bệ mặt nhẵn và một chùm tia laser, được minh hoạ ở hình 2.30 hệ lidar này được đặt dưới điều kiện lý tưởng, tức là không có tiêu hao năng lượng khi ánh sáng truyền đến mặt gương và phản xạ tới mặt phẳng ảnh. Mặt gương có thể là một trong hai dạng sau: gương cầu hoặc gương parabol, bán kính cong $R = 360$ cm và đường kính mặt gương $D = 60$ cm trong cả hai trường hợp. Một cửa sổ của ống nhân quang điện có bán kính 2 mm được đặt ở mặt phẳng tiêu diện của mặt gương sao cho tâm của cửa sổ hệ thu và tâm của mặt gương tạo thành một đường thẳng đứng vuông góc với mặt đất.

Trục thẳng đứng của laser được đặt trên mặt đất ở khoảng cách $X = 70$ cm tính từ tâm mặt gương. Tia laser được giả định là một chùm Gauss hình tròn với độ mở chùm tia là θ được chiếu lên thẳng đứng vuông góc so với mặt đất, vì vậy cường độ I ở điểm (x, y) trong chùm laser ở độ cao z có thể được biểu diễn như sau [79]:

$$I(x, y, z) \sim \frac{1}{\pi \sigma(z)^2} \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2(z)} \right), \quad (2.26)$$

với $\sigma(z) = 0.5(\sigma_0 + z \cdot \theta)$ và $\frac{1}{\pi\sigma(z)^2}$ là hệ số sao cho tổng cường độ của một mặt cắt laser là không đổi ở các độ cao khác nhau. Hệ thu được nghiên cứu có $\sigma_0 = 6 \text{ mm}$ và $\theta = 0.5 \text{ mrad}$. Hai hệ toạ độ được dùng cho tính toán, hệ trục thứ nhất gọi là $OXYZ$, được đặt trên mặt đất sao cho điểm gốc O trùng với tâm mặt gương và trục X song song với đường thẳng nối tâm gương với nguồn sáng. Hệ trục thứ hai $oxyz$ song song với hệ trục thứ nhất, điểm gốc là vị trí của nguồn sáng hướng thẳng đứng vào khí quyển.



Hình 2.30. Sơ đồ hệ hai trục mô phỏng thu tín hiệu lidar.

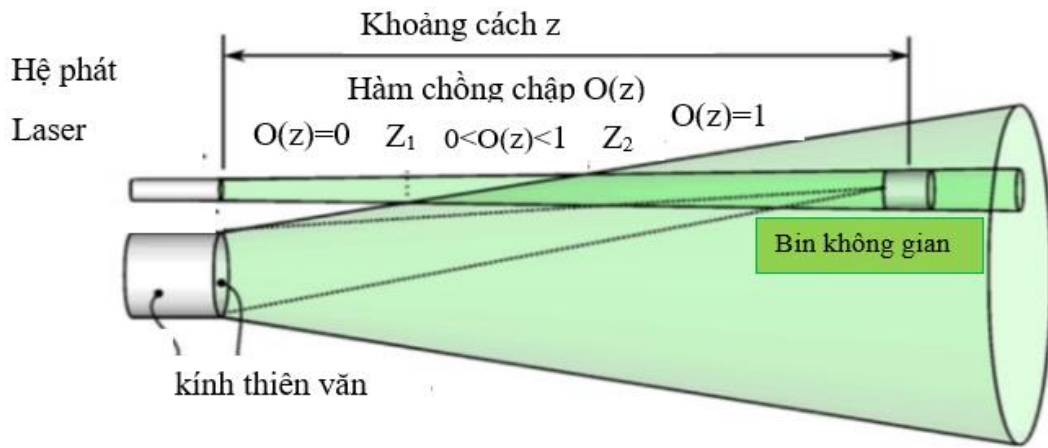
Để đơn giản cho quá trình tính toán, cả mặt gương lẫn chùm laser được coi là tổng của các “đơn vị” nhỏ hơn. Mỗi “đơn vị” của nguồn sáng đập vào từng “đơn vị” của mặt gương và được phản xạ tới một điểm trên mặt phẳng ảnh (mặt phẳng tiêu của gương cầu hoặc gương parabol). Hình ảnh tổng thể ở mặt phẳng đó là sự kết hợp của cường độ và phân bố của các điểm phản xạ này. Chùm laser chỉ được xét đến trong khoảng độ cao 100 m - 50 km, và được chia theo trục tung sao cho khoảng cách giữa hai mặt cắt liên tiếp là 10 m. Mỗi mặt cắt được phân chia tiếp thành các diện tích nhỏ hơn bằng cách đặt một ô lưới vuông $n_1 \times n_1$ sao cho mặt cắt nội tiếp trong ô lưới. Diện tích của mỗi điểm sáng ở độ cao z là $dS_1 = [(z \cdot \theta)/n_1]^2$, θ là góc nhìn diện tích S_1 từ nguồn phát laser. Mặt gương cũng được phân chia theo cách tương tự, một lưới ô vuông $n_2 \times n_2$ được đặt lên mặt gương sao cho mặt gương nội tiếp với ô lưới. Do bán kính gương $r = \frac{D}{2}$ nhỏ hơn nhiều lần so với z , độ cong của mặt gương có thể bỏ qua và diện tích của một ô lưới trên mặt gương xấp xỉ bằng $dS_2 = \left(\frac{D}{n_2}\right)^2$. Ảnh phản xạ có thể coi là tập hợp các “đơn vị”, trong đó mỗi đơn vị là ảnh phản xạ của một điểm sáng bởi một đơn vị mặt gương. Cường độ của mỗi điểm ảnh có thể được biểu diễn như sau:

$$dI = I(x, y, z) \cdot dS_1 \cdot dS_2 \cdot \frac{\cos \alpha}{d^2}, \quad (2.27)$$

với α là góc giữa tia tới và góc pháp tuyến của đơn vị mặt gương, d là khoảng cách giữa điểm sáng và đơn vị mặt gương (như có thể thấy ở hình 2.30). Ở nghiên cứu mô phỏng này ta xét : $n_1 = 128$, $n_2 = 90$. Chú ý là $\sigma(z) \propto z$ và $d \approx z$, $dI \propto z^{-4}$.

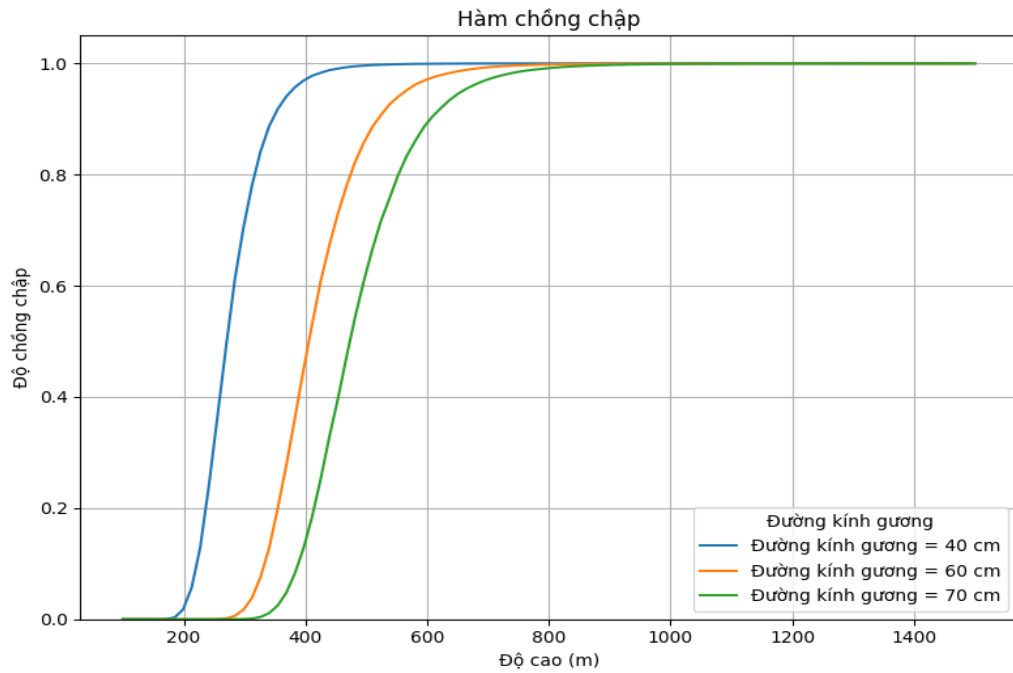
Phân bố cường độ tán xạ ngược trong mô phỏng này một ô lưới vuông $n_3 \times n_3$ được đặt ở mặt phẳng tiêu cự sao cho tâm ô lưới cũng tạo một đường thẳng đứng với tâm gương và tâm pinhole. Khi tọa độ và cường độ của điểm ảnh được xác định, điểm ảnh này sẽ rơi vào vào ô lưới tương ứng, do đó cường độ của một ô lưới sẽ là tổng cường độ của mọi điểm ảnh trong ô lưới [80].

Xác định hàm chồng chập



Hình 2.31. Sự chồng chập của trường nhìn máy phát Laser và kính thiên văn thu ánh sáng tán xạ [82].

Hàm chồng chập xác định sự kết hợp của yếu tố không gian giữa chùm tia laser và trường nhìn của máy thu (kính thiên văn) theo độ cao [81, 82]. Hàm chồng chập đặc trưng cho sự chồng chập không gian giữa nguồn phát laser và trường nhìn của máy thu. Điều này phụ thuộc vào trường nhìn của kính thiên văn, độ phân kỳ của chùm tia laser cũng như khoảng cách giữa trục quang giữa chúng. Quá trình thu tín hiệu lidar, số photon thu được do tán xạ ngược từ khí quyển có liên quan trực tiếp đến hàm chồng chập giữa máy thu và máy phát phụ thuộc vào độ cao. Kết quả mô phỏng hình 2.31, trường hợp khoảng cách trục của laser và trục quang học của gương được đặt cách nhau 70 cm, trường nhìn của gương cầu thu tín hiệu tán xạ ngược có dạng hình nón khiến nó không phủ lên vùng tín hiệu phát ra bởi chùm tia laser dưới một độ cao tối thiểu $Z_1 = 350$ m khi đó $O(z)=0$. Tín hiệu có hàm chồng chập $0 < O(z) < 1$ được ghi lại từ độ cao $Z_1 = 350$ m đến $Z_2 = 800$ m có giá trị tín hiệu nhỏ hơn so với giá trị thực tế. Độ cao lớn hơn $Z_2 = 800$ m có $O(z)=1$, có sự chồng chập hoàn toàn giữa trường nhìn của chùm tia laser và kính thiên văn thu.



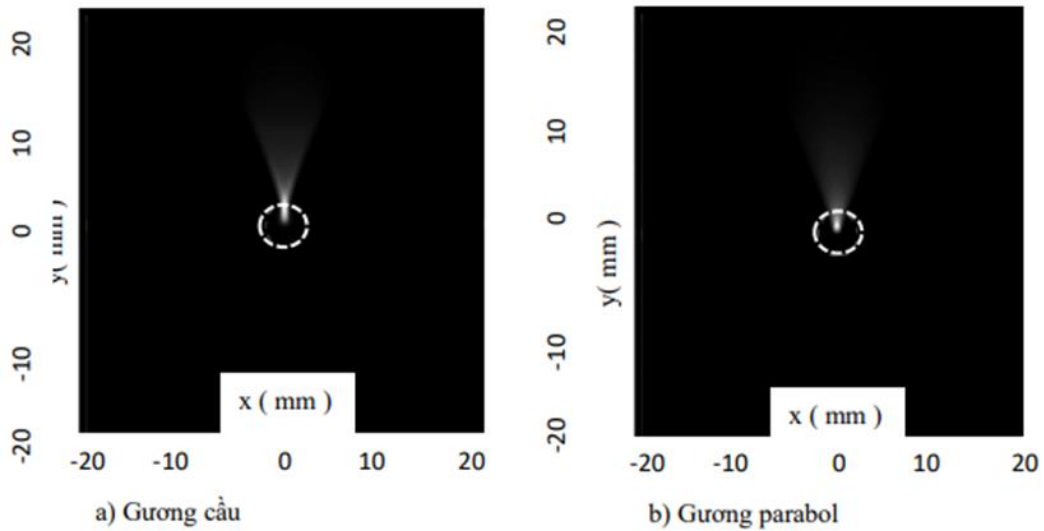
Hình 2.32. Hàm chồng chập.

Các tính toán và mô phỏng được thực hiện với thông số của hệ đã thiết kế đường kính gương 60 cm, tiêu cự 1,8 m. Kết quả mô phỏng hình 2.32 cho thấy hàm chồng chập overlap có dạng gần như tương tự nhau: bắt đầu ở 0 ở độ cao thấp, sau đó tăng dần đến 1 ở độ cao trên 800 m. Đối với các phép đo khảo sát khí quyển tầng cao thì hàm chồng chập nhỏ hơn 1 ở độ cao dưới 800 m không ảnh hưởng đến tín hiệu vùng khí quyển cần khảo sát.

Mô phỏng cường độ tín hiệu thu được tại mặt phẳng tiêu.

Kết quả mô phỏng hình ảnh cường độ sáng thu được tại mặt phẳng tiêu được thể hiện ở hình 2.33a và hình 2.33b. Hình ảnh phản xạ thu được có hình dạng tương tự một tam giác trong cả hai trường hợp gương cầu và gương parabol. Tuy nhiên, cường độ sáng tập trung ở biên đối với gương cầu và phân bố đều hơn trong trường hợp gương parabol, đặc điểm này do đặc tính phản xạ của mặt gương.

Với độ cao của mặt cắt laser tăng dần, góc tạo bởi tia tới với mặt gương tiến đến 90° , do vậy hình ảnh của mặt cắt laser sẽ tiệm cận hình ảnh tạo bởi chùm tia song song cùng bán kính. Đối với mặt gương parabol, chùm tia song song hội tụ ở tiêu điểm, thế nên kích thước ảnh của các mặt cắt laser giảm dần theo độ cao. Tuy vậy, trường hợp gương cầu phức tạp hơn bởi vì tia phản xạ của tia tới song song với quang trục và cắt quang trục ở một điểm thấp hơn tiêu cự rồi tới mặt phẳng tiêu ở phía bên kia đối với quang trục. Khi khoảng cách so với mặt gương tăng dần, kích cỡ ảnh tạo bởi gương cầu sẽ giảm về gần bằng 0 trước khi tăng dần ở phía trên mặt phẳng tiêu cự.



Hình 2.33. Kết quả mô phỏng hình ảnh thu được tại mặt phẳng tiêu trở lên của a) gương cầu và b) gương parabol, đường tròn biểu diễn cho pinhole chặn trường.

Mô phỏng số photon thu được tại hệ thu

Dựa vào phương trình lidar chúng tôi mô phỏng tính toán số photon thu được tại hệ thu quang [75]:

$$P(R, \lambda) = P_0 \frac{c\tau}{2} \cdot A \cdot \eta \cdot \frac{O(R)}{R^2} \cdot \beta(R, \lambda) \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr \right]. \quad (2.28)$$

Với mô phỏng năng lượng xung laser $W = 100 \text{ mJ}$ và bước sóng $\lambda = 532 \text{ nm}$ của nguồn laser xung Nd:YAG.

Số photon mỗi xung thực tế:

$$N_0 = \frac{W}{\varepsilon} = \frac{W}{\frac{hc}{\lambda}} = \frac{W \cdot \lambda}{h \cdot c} = \frac{0,1532 \cdot 10^{-9}}{6.625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 2,67 \cdot 10^{17},$$

trong đó : W là năng lượng xung laser.

h là hằng số Plank.

c là vận tốc ánh sáng trong chân không.

λ là bước sóng ánh sáng.

Thời gian xung $\tau = 5 \cdot 10^{-9} \text{ s}$.

$$\frac{c\tau}{2} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 5 \cdot 10^{-9}}{2} = 0,75 \text{ m} \text{ là độ rộng xung hiệu dụng xung laser.}$$

$A = \frac{\pi D^2}{4}$ có giá trị tương ứng $0,126 \text{ m}^2$; $0,283 \text{ m}^2$; $0,5 \text{ m}^2$ là diện tích hệ thu quang là gương cầu lõm với đường kính tương ứng $D = 0,4 \text{ m}$; $0,6 \text{ m}$; $0,8 \text{ m}$.

$\eta = 0.15$ là hiệu suất hệ thu quang điện.

Hàm chõng chập $O(R) = 1$ khi toàn bộ chùm tia laser nằm trong trường thu của gương cầu.

Hệ số suy hao trong môi trường son khí trường gần tại Hà nội có giá trị từ 0.04 đến 0.18 km^{-1} [21], giá trị suy hao ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình truyền ánh sáng do đó số phõ tôn thu được giảm mạnh khi lớp son khí hoặc mây càng dày.

$$\begin{aligned}\beta(R, \lambda) &= N \cdot \sigma_{\pi}^R = 2,55 \cdot 10^{25} \cdot 5,45 \cdot \left(\frac{550}{\lambda}\right)^4 \cdot 10^{-32} \\ &= 15,86 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^{-1} \text{sr}^{-1})\end{aligned}\quad (2.29)$$

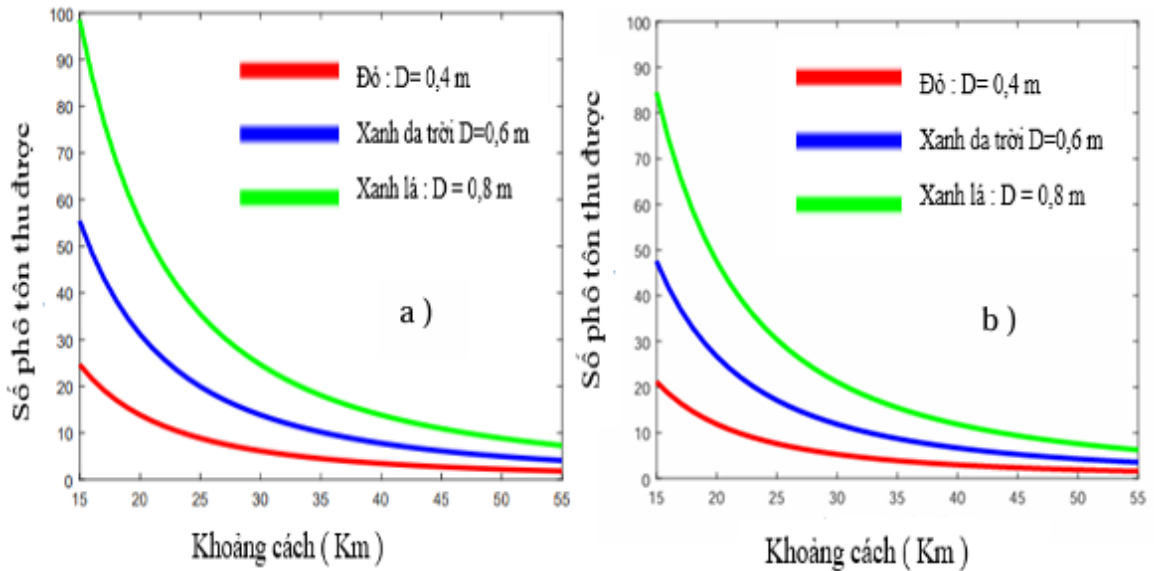
là hệ số tán xạ đàn hồi ngược một đơn vị thể tích khí quyển. $N = 2,55 \cdot 10^{25}$ là mật độ phân tử khí quyển.

Trong mô phỏng của chúng tôi mật độ phân tử thay đổi theo áp suất và nhiệt độ tuyệt đối ở độ cao z tương ứng:

$$\sigma_B^R n_R(z) = 3.6 \times 10^{-31} \frac{P(z)}{T(z)} \lambda_L^{-4.0117} \quad (2.30)$$

$T^2 = \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr \right] = 0,96^2$ là hàm truyền trong không khí tính cả quá trình truyền đi và về từ hệ lidar đến tâm tán xạ đàn hồi.

R là khoảng cách từ tâm tán xạ ngược đến hệ lidar.



Hình 2.34. Mô phỏng số photon tán xạ đàn hồi ngược thu được tại hệ thu quang
điện a) Hàm truyền $T = 0,96$ b) Hàm truyền $T = 0,93$.

Hình 2.34 mô phỏng số phõ tôn thu được theo khoảng cách từ tâm tán xạ đến hệ thu lidar. Số phõ tôn thu được tỉ lệ thuận với diện tích kính quang học là gương cầu. Chúng tôi mô phỏng tính toán số phõ tôn thu được với các kính quang học có đường kính lần lượt là 0,4 m; 0,6 m; 0,8 m. Từ các đường mô phỏng có thể thấy số

phô tôn thu được tăng lên rõ rệt khi đường kính gương tăng. Số phô tôn thu được tăng tỉ lệ thuận với bình phương đường kính gương quang học. So với gương quang học có đường kính 0,4m thì gương quang học có đường kính 0,6m có số phô tôn thu được tăng 125%. So với gương quang học có đường kính 0,4m thì gương quang học có đường kính 0,8m có số phô tôn thu được tăng 300%. Với cùng một hệ lidar với gương quang học có kích thước xác định, số phô tôn thu được sẽ thay đổi theo điều kiện môi trường son khí và mây. Với điều kiện thời tiết nhiều mây và mật độ son khí lớn thì sự suy hao ánh sáng laser khi đo đạc lidar là đáng kể, hình 2.34 a) và 2.34 b) được mô phỏng với hàm truyền khác nhau. Do đó việc tiến hành thực nghiệm đo lidar cần thực hiện vào ban đêm và vào lúc trời trong ít mây. Như vậy có thể thấy để khảo sát khí quyển tầng cao nơi cường độ tín hiệu đàn hồi rất nhỏ cần phát triển hệ thu quang có kích thước lớn. Với hệ lidar có anten thu là gương cầu có kích thước lớn cho phép thu được tín hiệu từ khoảng cách xa, khảo sát phân bố nhiệt độ, mật độ khí quyển, đối tượng mây Ti cũng được khảo sát bằng hệ lidar của chúng tôi.

Mô phỏng tín hiệu lidar của mây Ti

Quá trình tán xạ và hấp thụ ánh sáng trong khí quyển có ảnh hưởng đến các phương pháp khảo sát khí quyển, đặc biệt trong kỹ thuật Lidar. Các hiện tượng này phụ thuộc vào bước sóng, độ rộng quang phổ của ánh sáng là yếu tố quan trọng quyết định độ chính xác và khả năng ứng dụng của hệ đo. Trong quá trình tán xạ, một phần ánh sáng tới bị tán xạ theo nhiều hướng và cường độ tán xạ sẽ thay đổi theo góc giữa hướng ánh sáng tới và ánh sáng tán xạ. Cường độ tán xạ này phụ thuộc vào đặc tính của các hạt tán xạ, kích thước và hình dạng của chúng trong khí quyển. Quá trình hấp thụ ánh sáng cũng diễn ra khi các thành phần khí như hơi nước, CO₂ hay O₃ hấp thụ một phần năng lượng của chùm sáng, làm ảnh hưởng đến kết quả đo. Do đó, việc mô phỏng chính xác các quá trình tán xạ và hấp thụ ánh sáng là cần thiết trong việc tối ưu hóa hiệu quả của hệ Lidar.

Đối với sự suy hao của ánh sáng theo định luật Beer–Lambert-Bouger ta có [2]:

$$F_{\lambda} = F_{0,\lambda} e^{-\int_0^H \alpha_{t,\lambda}(r) dr} \quad (2.31)$$

trong đó $F_{0,\lambda}$, F_{λ} lần lượt là thông lượng bức xạ tới và sau lớp không khí có độ dày hình học H. Độ truyền qua của lớp không khí có thể được viết là:

$$T(H) = \frac{F_{\lambda}}{F_{0,\lambda}} = e^{-\int_0^H \alpha_{t,\lambda}(r) dr}. \quad (2.32)$$

Trong công thức trên, $\alpha_{t,\lambda}(r)$ là hệ số suy hao do môi trường tán xạ và hấp thụ ánh sáng. Đối với hầu hết các ứng dụng lidar, hệ số suy hao về cơ bản là tổng của bốn

đóng góp chính, hệ số tán xạ đàn hồi, hệ số hấp thụ của phân tử và các hạt son khí [11]:

$$\alpha_{t,\lambda} = \alpha_{\text{mol},\text{sca}}(R, \lambda) + \alpha_{\text{mol},\text{abs}}(R, \lambda) + \alpha_{\text{aer},\text{sca}}(R, \lambda) + \alpha_{\text{aer},\text{abs}}(R, \lambda). \quad (2.33)$$

Sự suy hao ánh sáng của chùm ánh sáng sau khi đi qua lớp không khí có độ dày hình học H phụ thuộc theo hàm số mũ (2.31). Biểu thức tích phân [79]:

$$\tau = \int_0^H \alpha_{t,\lambda}(r) dr, \quad (2.34)$$

τ được xác định là độ sâu quang học của lớp không khí có suy hao. Mối quan hệ giữa cường độ tín hiệu đo được ở đỉnh, đáy đám mây và cường độ tín hiệu phân tử ở cùng độ cao được suy ra từ phương trình lidar [57, 79]:

$$P(R) \sim \frac{1}{R^2} (\beta_{\text{mol}}(R) + \beta_{\text{cir}}(R)) \exp \left[-2 \int_0^H \alpha(r) dr \right]. \quad (2.35)$$

Trong đường tín hiệu lidar đã hiệu chỉnh khoảng cách ở phía trên và dưới lớp mây không có sự tán xạ ngược từ đám mây, do đó số hạng β_{cir} bằng 0 và phương trình lidar có thể được viết là [11, 79]:

$$\begin{aligned} P(R) &\sim \frac{1}{R^2} \beta_{\text{mol}}(R) \exp \left[-2 \int_0^R (\alpha_{\text{mol}}(r) + \alpha_{\text{cir}}(r)) dr \right] \\ &= \frac{1}{R^2} \beta_{\text{mol}}(R) \exp \left[-2 \left(\int_0^R \alpha_{\text{mol}}(r) dr + \int_0^R \alpha_{\text{cir}}(r) dr \right) \right] \\ &= \frac{1}{R^2} \beta_{\text{mol}}(R) \exp(-2 \int_0^R \alpha_{\text{mol}}(r) dr) \exp(-2 \int_0^R \alpha_{\text{cir}}(r) dr) \end{aligned} \quad (2.36)$$

Áp dụng phương trình này với cường độ tín hiệu tại đáy đám mây $R_{\text{đáy}}$ và đỉnh đám mây $R_{\text{đỉnh}}$, ta thu được [10, 80]:

$$\begin{aligned} P(R_{\text{đáy}}) &= \frac{1}{R_{\text{đáy}}^2} \beta_{\text{mol}}(R_{\text{đáy}}) \exp \left[-2 \int_0^{R_{\text{đáy}}} \alpha_{\text{mol}}(r) dr \right] \exp \left(-2 \int_0^{R_{\text{đáy}}} \alpha_{\text{cir}}(r) dr \right) \\ &= P_{\text{mol}}(R_{\text{đáy}}) \exp(-2 \int_0^{R_{\text{đáy}}} \alpha_{\text{cir}}(r) dr) = P_{\text{mol}}(R_{\text{đáy}}) \cdot 1 \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} P(R_{\text{đỉnh}}) &= \frac{1}{R_{\text{đỉnh}}^2} \beta_{\text{mol}}(R_{\text{đỉnh}}) \exp \left[-2 \int_0^{R_{\text{đỉnh}}} \alpha_{\text{mol}}(r) dr \right] \exp \left(-2 \int_0^{R_{\text{đỉnh}}} \alpha_{\text{cir}}(r) dr \right) \\ &= P_{\text{mol}}(R_{\text{đỉnh}}) \exp \left(-2 \int_0^{R_{\text{đỉnh}}} \alpha_{\text{cir}}(r) dr \right) = P_{\text{mol}}(R_{\text{đỉnh}}) \cdot \exp(-2 \cdot \tau_{\text{cir}}). \end{aligned} \quad (2.38)$$

Bằng cách chia phương trình (2.32) cho phương trình (2.31) ta thu được:

$$\frac{P(R_{đỉnh})}{P(R_{đáy})} = \frac{P_{mol}(R_{đỉnh})\exp(-2 \cdot \tau_{cir})}{P_{mol}(R_{đáy})}. \quad (2.39)$$

Sắp xếp lại phương trình (2.33) ta thu được:

$$T = \exp(-2 \cdot \tau_{cir}) = \frac{P(R_{đỉnh})}{P(R_{đáy})} / \frac{P_{mol}(R_{đỉnh})}{P_{mol}(R_{đáy})}. \quad (2.40)$$

Ở đây T là hàm truyền qua, bằng giải tích ta có thể tính ra τ_{cir} là độ sâu quang học của đám mây Ti được xác định như sau [11, 80]:

$$\tau_{cir}(R) = -\frac{\ln(T)}{2} = -\frac{\ln\left(\frac{P(R_{đỉnh})}{P(R_{đáy})} / \frac{P_{mol}(R_{đỉnh})}{P_{mol}(R_{đáy})}\right)}{2}. \quad (2.41)$$

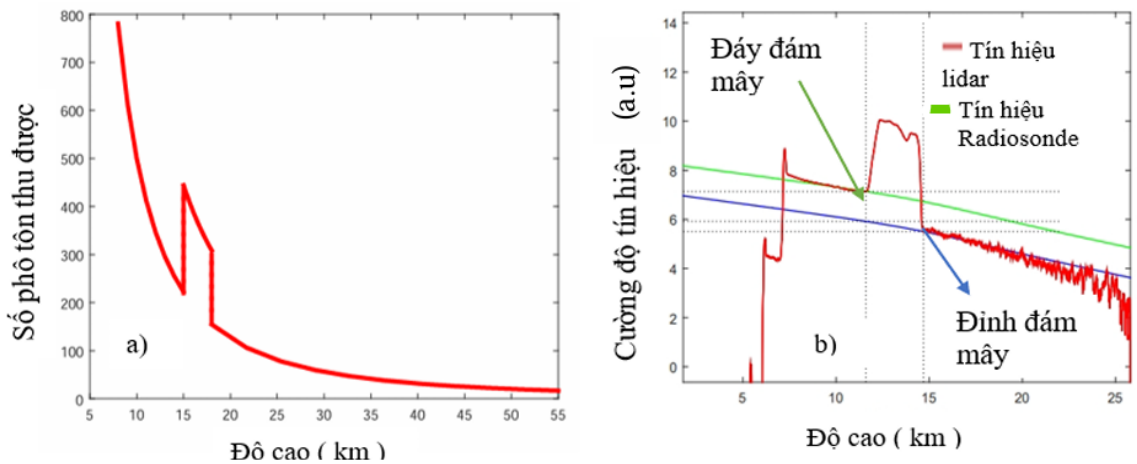
Tuy nhiên để phương pháp tính này thực hiện được đơn giản thì tín hiệu đo được ở đỉnh đám mây phải nhỏ hơn tín hiệu phân tử ở đỉnh đám mây, với giả thiết cường độ tín hiệu phân tử được điều chỉnh sao cho chúng có cùng giá trị ở đỉnh, đáy đám mây [79, 81]:

$$\frac{P_{mol}(R_{đỉnh})}{P_{mol}(R_{đáy})} = 1. \quad (2.42)$$

Độ sâu quang học $\tau_{cir}(R)$ của lớp mây ti có dạng đơn giản sau [79, 80]:

$$\tau_{cir}(R) = -\frac{1}{2} \log\left(\frac{P_{đỉnh}(R)}{P_{đáy}(R)}\right), \quad (2.43)$$

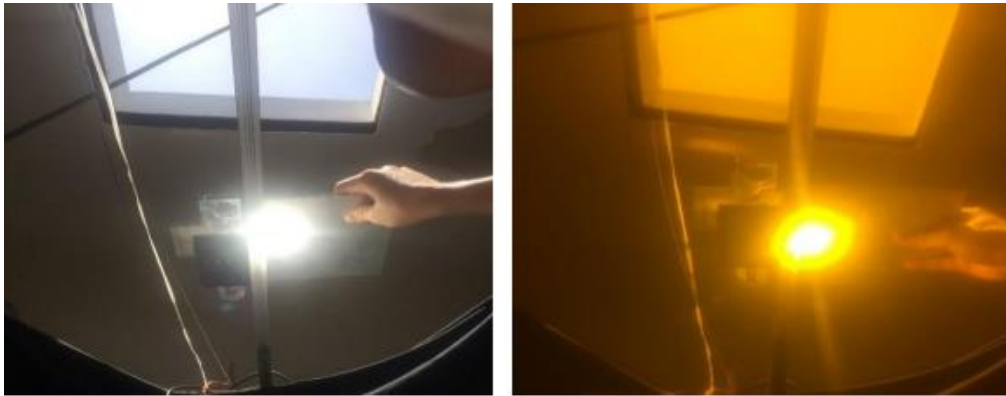
Trong đó cường độ tín hiệu $P_{đỉnh}(R)$ và $P_{đáy}(R)$ ứng với cường độ tín hiệu lidar ở các lớp khí quyển, ở bên trên và bên dưới của đám mây Ti.



Hình 2.35. Quá trình truyền ánh sáng qua đám mây Ti a) Đường mô phỏng lý thuyết. b) Đường tín hiệu lidar đã hiệu chỉnh khoảng cách

Hình 2.35 mô phỏng đường tín hiệu lidar khi có sự xuất hiện của mây Ti. Trong đường tín hiệu có mây Ti thì cường độ tín hiệu tăng mạnh so với các điểm lân cận, đáy đám mây ở độ cao thấp hơn và có cường độ lớn hơn so với đỉnh đám mây. Cường độ tín hiệu đỉnh đám mây nhỏ hơn so với đáy đám mây do chùm tia laser bị suy hao khi đi qua đám mây. Dựa vào cường độ đỉnh và đáy đám mây có thể tính được độ sâu quang học bằng biểu thức 2.43.

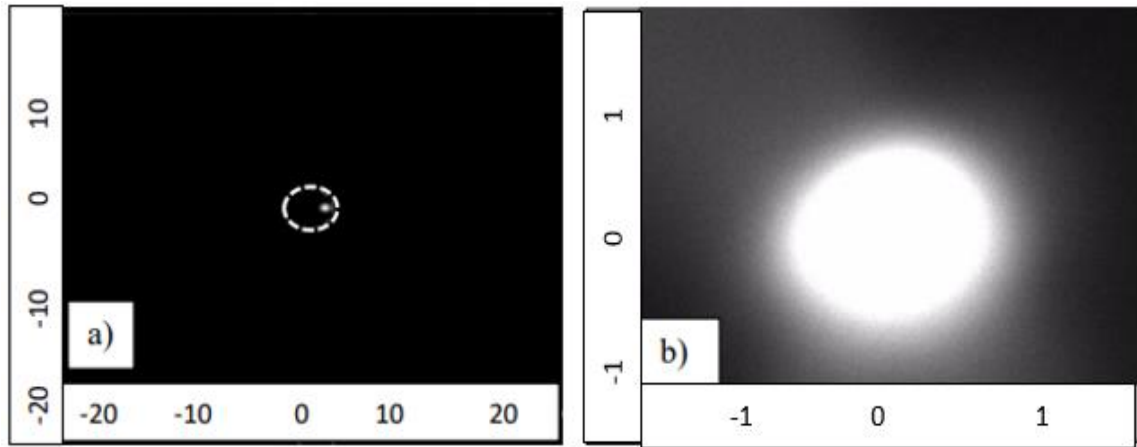
2.4.3. So sánh kết quả mô phỏng và tín hiệu lidar tại mặt phẳng tiêu của hệ thu lidar



Hình 2.36. Ảnh Mặt trời thu ở mặt phẳng tiêu cự.

Để đánh giá chất lượng thu tín hiệu từ khí quyển tầng cao chúng tôi tiến hành thí nghiệm đo vết sáng là ảnh của Mặt trời tại mặt phẳng tiêu của gương cầu. Thí nghiệm được tiến hành vào ngày có nắng, thời gian tiến hành thí nghiệm 12 giờ trưa. Quá trình chụp ảnh của điểm hội tụ ánh sáng Mặt trời tại mặt phẳng tiêu chúng tôi sử dụng tấm chắn sáng bằng tấm nhôm, kết quả thu được vết sáng có dạng hình tròn, kích thước điểm hội tụ cỡ 1mm trên Hình 2.36. Với kích thước ảnh thu được tại mặt phẳng tiêu của gương cầu đủ nhỏ có thể lọt qua chặn trường (pinhole) cho thấy hệ thu quang học đã chế tạo thành công và có thể sử dụng để tích hợp vào hệ đo lidar khảo sát khí quyển tầng cao [75, 76].

Quá trình chụp ảnh chùm tia laser được tiến hành vào ban đêm chúng tôi sử dụng camera High-Resolution USB CCD kích thước mỗi điểm ảnh là $4,65\text{ }\mu\text{m} \times 4,65\text{ }\mu\text{m}$, kích thước vùng thu ảnh là $5,95\text{mm} \times 4,76\text{mm}$, có cảm biến CCD đen trắng với độ phân giải 1280×1024 pixel. Dựa vào kích thước ảnh thu được và kích thước vùng thu ảnh trên CCD ta có thể tích được kích thước vết laser thu được tại mặt phẳng tiêu gương cầu.



Hình 2.37. Ảnh mặt cắt tia laser thu ở mặt phẳng cách mặt phẳng tiêu cự 1 mm.

Kết quả mô phỏng hình 2.37 cho thấy ở độ cao $z = 1$ km vết chùm tia laser lọt qua lỗ chặn trường. Để kiểm tra việc thu tín hiệu đàn hồi chúng tôi tiến hành đo vết chùm tia laser, quá trình thực nghiệm được tiến hành vào ban đêm và kết quả thu được tương tự việc mô phỏng. Vết chùm tia laser thu được có dạng tròn có đường kính 1,6 mm, ứng với độ cao 1 km. Kết quả so sánh kiểm chứng các mô phỏng và ảnh chụp thực tế cho thấy cường độ chùm laser thu được giống với mô phỏng lý thuyết. Gương cầu chúng tôi chế tạo đã chụp ảnh và thu được kết quả tốt. Vết sáng thu được đủ nhỏ và lọt qua được chặn trường của hệ thu quang điện do đó hệ có thể thu tốt tín hiệu lidar từ khoảng cách xa.

2.5. Kết luận chương 2

Chương 2 đã trình bày quá trình nghiên cứu và phát triển hệ thống lidar sử dụng khối thu quang học có khẩu độ lớn, nhằm nâng cao khả năng thu nhận tín hiệu. Hệ thống được xây dựng từ cơ sở là lidar đàn hồi một kênh, sau đó được nâng cấp bằng cách thay thế kính thiên văn Schmidt-Cassegrain bằng gương cầu lõm có đường kính 60 cm và tiêu cự 1,8 m. Việc chế tạo gương cầu trong nước, với lớp mạ nhôm đạt độ phản xạ cao là bước cải tiến quan trọng giúp nâng cao năng lực thu tín hiệu.

Trên cơ sở mô hình hóa hình học và trường nhìn, các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả thu nhận như độ rộng xung, thời gian phản hồi, trường nhìn đã được khảo sát chi tiết. Mô phỏng phân bố chồng chập giữa chùm tia phát và vùng trường thu được thực hiện để tối ưu hóa cấu hình hệ. Kết quả mô phỏng cho thấy khả năng mở rộng vùng chồng chập hiệu quả từ 40 km đến trên 70 km, nhờ thiết kế phù hợp giữa gương cầu, khẩu độ và detector. Phần mềm Origin, ZEMAX và các công cụ mô phỏng đã được tích hợp để xử lý tín hiệu thu được và tối ưu cấu trúc hệ.

Luận án cũng trình bày chi tiết quá trình đo kiểm bề mặt gương cầu sau chế tạo, sử dụng phương pháp Foucault và Hartmann để đánh giá độ chính xác hình học. Kết quả đo thực nghiệm cho thấy sai số biên dạng nhỏ hơn $0,5 \mu\text{m}$ và chất lượng phản xạ

đáp ứng yêu cầu kỹ thuật đặt ra đối với hệ lidar. Ngoài ra, luận án đã mô phỏng đáp ứng tín hiệu với nhiều thông số môi trường và thiết bị, góp phần xác định mối quan hệ giữa thiết kế quang học và khả năng phát hiện tín hiệu yếu ở tầng cao.

Những kết quả đạt được trong chương 2 là nền tảng quan trọng để triển khai chế tạo hoàn chỉnh hệ lidar đàn hồi có khẩu độ thu lớn, phục vụ quan trắc nhiệt độ khí quyển và khảo sát mây tầng cao. Đây cũng là minh chứng cho khả năng làm chủ thiết kế và chế tạo thiết bị quang học chính xác trong nước, có tiềm năng ứng dụng thực tiễn và mở rộng trong các lĩnh vực khí tượng, môi trường và khoa học khí quyển.

CHƯƠNG 3. ĐẶC TRƯNG THÔNG SỐ KHÍ QUYỂN TẦNG CAO

Lớp mây Ti tầng cao, phân bố rộng rãi trên diện tích hơn 30% bề mặt Trái Đất và nằm ở độ cao từ 6 đến 20 km, đóng vai trò quan trọng trong chu trình tuần hoàn nước và điều hòa khí hậu [6, 40]. Các phép đo từ xa bằng công nghệ lidar cho phép thu thập thông tin chi tiết về độ cao, độ sâu quang học và tỉ số lidar của mây Ti, qua đó cung cấp những dữ liệu quan trọng cho nghiên cứu biến đổi khí hậu và dự báo thời tiết [11, 79]. Đối với các phép đo này chúng tôi sử dụng hệ lidar kính thiên văn để khảo sát.

Lớp khí quyển tầng cao mà chúng tôi khảo sát có độ cao từ 10 đến trên 50 km, bao gồm phần trên tầng đối lưu, tầng bình lưu và phần dưới của tầng trung lưu.. Những năm gần đây, cộng đồng khoa học đã chú trọng đến tầng khí quyển này vì sự ảnh hưởng trực tiếp của nó đến khí hậu toàn cầu [14, 25]. Sự biến đổi nhiệt độ trong tầng bình lưu tác động đến tầng đối lưu và các lớp khí quyển gần bề mặt Trái Đất thông qua cơ chế trao đổi năng lượng và truyền nhiệt [58]. Những quá trình này có mối quan hệ mật thiết với các hiện tượng thời tiết cực đoan như El Nino và La Nina. Thông số nhiệt độ trong khí quyển tầng cao là thông số động học quan trọng trong việc mô tả trạng thái và các quá trình diễn ra trong khí quyển tầng cao. Đối với các phép đo này, chúng tôi sử dụng hệ lidar đã được nâng cấp lên khẩu độ thu lớn.

Kết quả thu được từ các phép đo nhiệt độ và phân bố nhiệt độ của khí quyển tầng cao được so sánh với mô hình khí quyển MSISE-90 để xác nhận độ tin cậy của dữ liệu thu được từ hệ lidar với gương cầu có khẩu độ lớn [63].

3.1. Khảo sát mây Ti tại Hà Nội

3.1.1. Cơ sở vật lý xác định các thông số mây Ti

Các thông số như độ cao, độ dày, độ sâu quang học và tỉ số lidar của mây Ti được xác định thông qua việc xử lý tín hiệu lidar đàn hồi. Cơ sở vật lý xác định các thông số mây Ti dựa vào phương trình lidar và phân tích số liệu thu được từ phép đo lidar.

Phương trình cơ bản của Lidar cho ta mối quan hệ giữa cường độ tín hiệu tán xạ ngược phụ thuộc vào độ cao z [11, 79]:

$$P_{Mie-Rayleigh}(z) = P_{laser} \cdot C \cdot Z^{-2} \cdot [\beta_c(z) + \beta_m(z)] \cdot T_c^2(z) \cdot T_m^2(z) . \quad (3.1)$$

Trong phương trình 3.1, $\beta_c(z)$ và $\beta_m(z)$ là hệ số tán xạ đàn hồi ngược của các hạt trong đám mây và các phân tử trong khí quyển từ độ cao z [10, 81].

$$T_c(z) = \exp \left[- \int_0^z \sigma_c(z) dz \right]. \quad (3.2)$$

$$T_m(z) = \exp \left[- \int_0^z \sigma_m(z) dz \right] \quad (3.3)$$

$T_c(z)$ và $T_m(z)$ trong phương trình. (3.2) và (3.3) là hàm truyền qua của đám mây và các phân tử. P_{Laser} là năng lượng của xung laser. C là hệ số chuẩn hóa, nó phụ thuộc vào các thông số của hệ lidar (các thông số của chùm tia laser, diện tích kính thiên văn, hiệu suất của hệ lidar) và các thông số của khí quyển (loại tín hiệu được thu nhận, độ phân giải không gian của dữ liệu đo được). $P_{\text{Mie-Rayleigh}}(z)$ là cường độ tín hiệu tán xạ ngược mà hệ lidar nhận được từ vùng tán xạ ở độ cao z [11, 79].

Tỷ số giữa độ suy hao phân tử σ_a và hệ số tán xạ ngược β_a từ phân tử được xác định từ lý thuyết tán xạ Rayleigh được gọi là tỉ số lidar [79]:

$$S_a = \frac{\sigma_a}{\beta_a} = \frac{8\pi}{3}. \quad (3.4)$$

Tỷ số lidar cho đám mây T_i được xác định bởi [11, 80]:

$$S_c = \frac{\sigma_c}{\beta_c}. \quad (3.5)$$

Độ sâu quang học τ_c của lớp mây T_i được xác định trong phép đo tán xạ đơn và nó có dạng sau [79, 81]:

$$\tau_c = \int_{Z_{\text{đáy}}}^{Z_{\text{đỉnh}}} \sigma(z') \cdot dz' = \int_{Z_{\text{đáy}}}^{Z_{\text{đỉnh}}} S_c(z') \cdot \beta(z') dz' = -\log \left(\frac{P_{\text{đỉnh}}}{P_{\text{đáy}}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.6)$$

trong đó $Z_{\text{đáy}}$ và $Z_{\text{đỉnh}}$ lần lượt là độ cao đáy và độ cao đỉnh của đám mây T_i . $P_{\text{đỉnh}}$ và $P_{\text{đáy}}$ lần lượt là cường độ tín hiệu lidar ở đỉnh và đáy đám mây T_i . Thuật toán viết trên Matlab cho phép xác định độ cao tâm đám mây như sau [80, 81]:

$$Z_{\text{tâm}} = \frac{\int_{Z_{\text{đáy}}}^{Z_{\text{đỉnh}}} z' \cdot R(z') \cdot dz'}{\int_{Z_{\text{đáy}}}^{Z_{\text{đỉnh}}} R(z') \cdot dz'}. \quad (3.7)$$

trong đó $R(z)$ là tỷ lệ tán xạ ngược ở độ cao z được xác định:

$$R(z) = \frac{\beta_c(z) + \beta_m(z)}{\beta_m(z)}. \quad (3.8)$$

Nói chung, tỷ số lidar $S_c(z)$ có thể thay đổi theo độ cao z trong lớp mây. Tuy nhiên, để đơn giản chúng tôi giả định rằng $S_c(z)$ là không đổi trong toàn bộ đám mây [81].

$$S_C = \frac{\int_{z_{\text{đáy}}}^{z_{\text{đỉnh}}} \sigma_C(z).dz}{\int_{z_{\text{đáy}}}^{z_{\text{đỉnh}}} \beta_C(z).dz} . \quad (3.9)$$

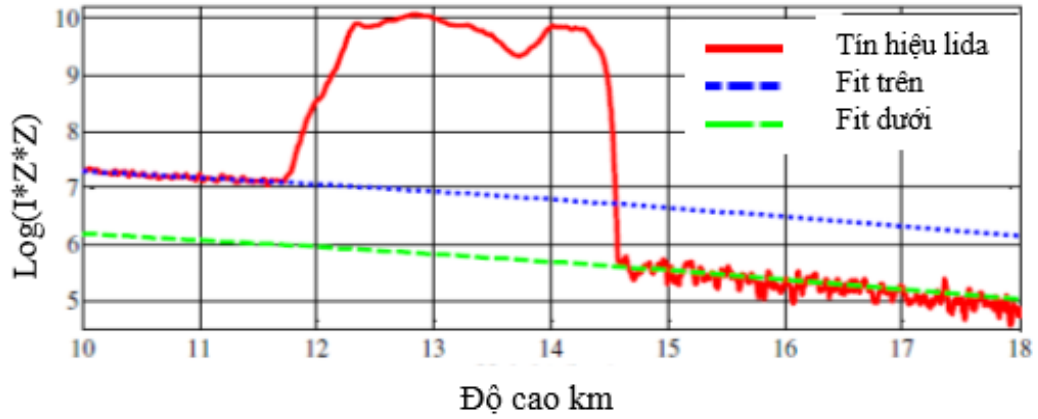
Chúng tôi ước tính chiều cao đáy và đỉnh của các đám mây bằng cách sử dụng phương pháp ngưỡng cho mỗi tệp số liệu lidar. Phương pháp này đã được phát triển trước đó bởi Platt và cộng sự [83], và sau đó được sử dụng bởi các tác giả khác (Giannakaki và cộng sự, Jin và cộng sự, Lakkis et al., và Mao et al. [84 - 87]) để xác định các đặc điểm hình học của các đám mây. Trong phương pháp này, đầu tiên chúng tôi xác định điểm trong đường tín hiệu lidar ứng với đáy và ở đỉnh lớp mây. Sau đó dịch chuyển lên hoặc xuống từ vị trí đó, chúng tôi xác định điểm tại đó có sự gia tăng đáng kể trong cường độ tín hiệu lidar (khoảng năm lần độ lệch chuẩn của nền tín hiệu lidar do tán xạ phân tử). Sau đó, chúng tôi kiểm tra trực quan dựa vào đường tín hiệu lidar các điểm ứng với đáy hoặc đỉnh của đám mây. Mặc dù có nhiều phương pháp khác nhau để xác định đỉnh và đáy đám mây, các phương pháp này thiên về tự động hóa cho việc phân tích tập dữ liệu lớn. Phương pháp của chúng tôi có ưu việt là phân tích dữ liệu đơn giản và thuận tiện cho phân tích tập dữ liệu kích thước nhỏ.

Độ dày hình học của đám mây Ti được tính bằng hiệu số giữa độ cao đỉnh và độ cao đáy của đám mây ($z_{\text{đỉnh}} - z_{\text{đáy}}$). Tỷ số lidar trung bình của đám mây được tính bằng cách tích phân hệ số suy hao và hệ số tán xạ ngược trên toàn bộ đám mây từ độ cao đáy đến đỉnh từ phương trình 3.9.

Trong phương trình 3.9, hệ số tán xạ ngược được tính toán bằng phương pháp Klett – Fernald [59, 79]. Trong thực tế nhiều đám mây có độ dày tương đối lớn về mặt hình học, chúng tôi phải tính đến hiệu ứng tán xạ nhiều lần (đa tán xạ) trong việc xác định các thông số đặc trưng của các đám mây Ti [11]. Tham số tán xạ η có thể được tính toán thông qua phương trình [11, 79]:

$$\eta = \frac{\tau_c}{e^{\tau_c} - 1} \quad (3.10)$$

Hiệu ứng này liên quan trực tiếp với độ sâu quang học τ_c của đám mây Ti. Trong dữ liệu của chúng tôi, độ sâu quang học τ_c và hệ số tán xạ η có liên quan với nhau thông qua phương trình (3.10). Tỷ số lidar đã hiệu chỉnh đối với các đám mây được xác định là $S_C^* = \eta * S_C$ khi những đám mây mỏng về mặt quang học, tức là các đám mây có $\tau_c \leq 0,1$ thì tham số tán xạ được ước tính $\eta \geq 0,95$, khi đó tỷ số Lidar đã hiệu chỉnh S_C^* về cơ bản giống như S_C . Tuy nhiên, đối với các trường hợp các đám mây dày hơn về mặt quang học chẳng hạn như khi $\tau_c = 0,8$ thì $\eta = 0,82$ và S_C^* trở nên khác biệt đáng kể so với S_C , khi đó phải sử dụng phương pháp tính liên quan đến quá trình đa tán xạ.



Hình 3.1. Tín hiệu lidar đã hiệu chỉnh khoảng cách. Các tín hiệu lidar màu đỏ, đường mô phỏng nét chấm và gạch ngang thể hiện cho biên dạng các lớp khí quyển bên trên và bên dưới đám mây.

Trong hình 3.1, hiển thị biên dạng tín hiệu lidar đã hiệu chỉnh khoảng cách và các tín hiệu lidar mô phỏng. Cường độ tín hiệu $P_{\text{đỉnh}}$ và $P_{\text{đáy}}$ ứng với các lớp khí quyển, ở trên (lớn hơn 11,6 km) và bên dưới (nhỏ hơn 14,6 km) của đám mây Ti. Sự thay đổi cường độ tín hiệu lidar được sử dụng để tính độ sâu quang học theo phương trình (3.6) [79]. Hệ số tán xạ ngược trung bình trên lớp mây Ti được tính toán bằng cách sử dụng phương pháp Fernald [59, 88]. Dữ liệu khí quyển để so sánh với tín hiệu lidar đo được ở Hà Nội được lấy từ Mô hình MSISE-90.

Độ sâu quang học được xác định thông qua logarit tự nhiên (ln) tỷ số cường độ tín hiệu giữa đỉnh đám mây và đáy đám mây được hiển thị trong phương trình (3.6). Sai số độ sâu quang học tỷ lệ với tỉ số tín hiệu trên nhiễu được chỉ ra bởi Chen và cộng sự [89]:

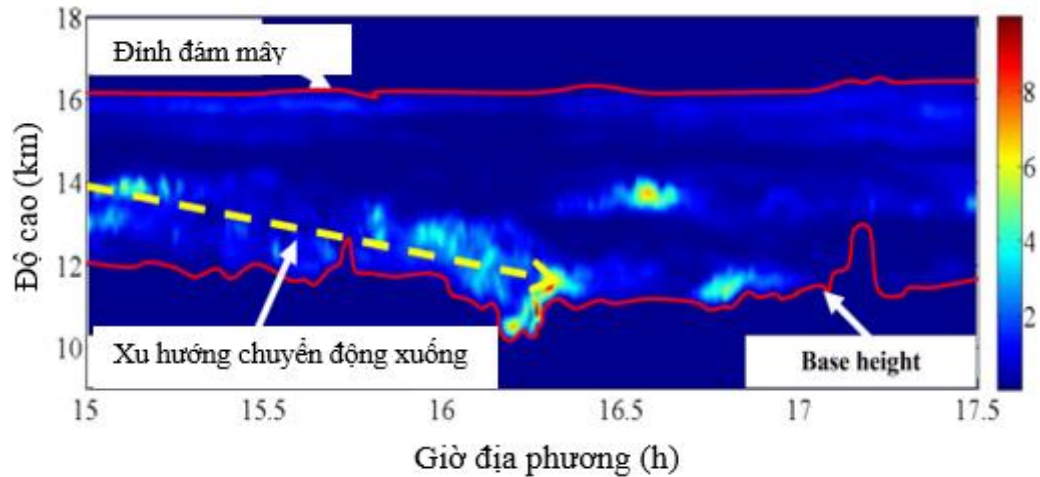
$$\Delta\tau \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta P_{\text{đỉnh}}^2}{P_{\text{đỉnh}}^2} + \frac{\Delta P_{\text{đáy}}^2}{P_{\text{đáy}}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{SNR_{\text{đỉnh}}^2} + \frac{1}{SNR_{\text{đáy}}^2} \right) \quad (3.11)$$

Với tín hiệu trong các tệp dữ liệu được tích lũy dữ liệu trong 10 phút, tỷ số tín hiệu trên nhiễu ở đỉnh đám mây thường lớn hơn 20, do đó sai số $\Delta\tau$ thường nhỏ, khoảng 0,001 hoặc nhỏ hơn.

3.1.2. Độ cao đám mây Ti

Mây Ti thường xuất hiện ở độ cao từ 6 đến 20 km so với bề mặt Trái Đất. Đây là loại mây hình thành ở các tầng khí quyển cao, chủ yếu cấu thành từ các tinh thể băng, nên thường xuất hiện tại những khu vực khí quyển có nhiệt độ thấp. Độ cao của mây Ti thay đổi theo vĩ độ và điều kiện khí hậu, tuy nhiên chúng luôn tồn tại ở các tầng cao nhất của khí quyển, chủ yếu trong tầng đối lưu trên và tầng dưới của tầng bình lưu [6, 40].

Do chứa nhiều tinh thể băng, mây Ti có khả năng tán xạ mạnh ánh sáng laser, tạo ra tín hiệu tán xạ ngược có cường độ cao trong quan trắc bằng lidar. Nhờ phân tích cường độ và cấu trúc hình dạng của tín hiệu lidar, có thể xác định được độ cao, độ dày hình học và các đặc điểm quang học khác của mây Ti [11, 79].



Hình 3.2. Quan sát đám mây Cirrus, Cường độ được mã hóa màu đại diện cho cường độ tín hiệu lidar đã hiệu chỉnh theo khoảng cách.

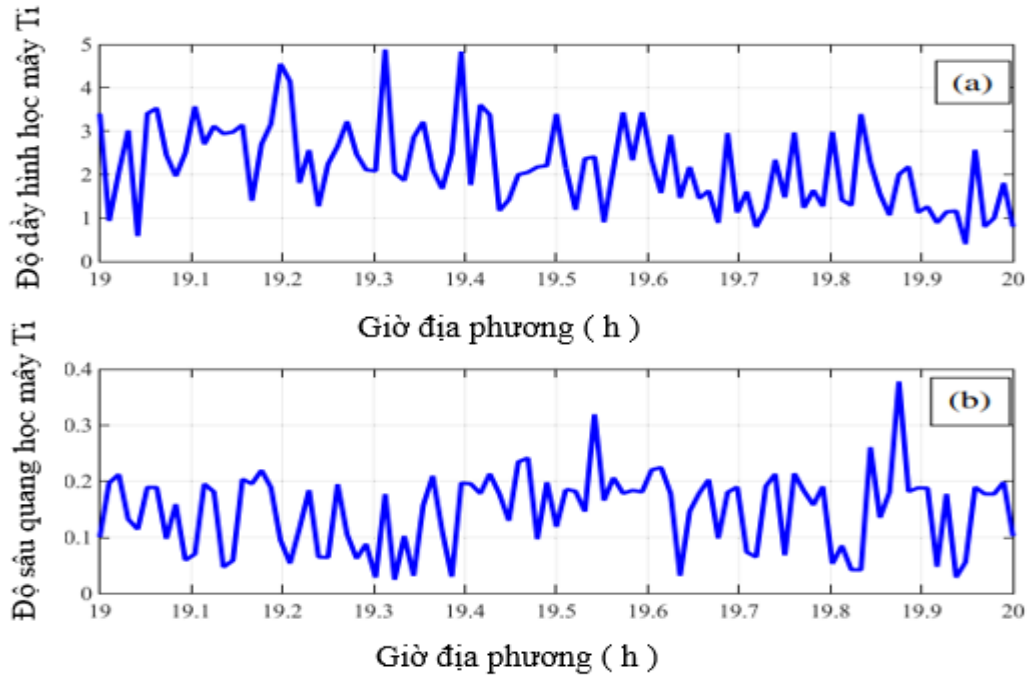
Trong hình 3.2, phần trên cùng của đám mây và phần đáy của đám mây được đánh dấu bằng đường màu đỏ. Xu hướng giảm được đánh dấu bằng mũi tên đứt nét. Trong quá trình thu tín hiệu lidar mỗi tệp số liệu lidar được tích lũy trong 30 giây hoặc 300 xung laser. Kết quả cho thấy sự thay đổi theo thời gian của biên dạng tín hiệu lidar thu được trong một phiên quan sát. Đám mây Ti có nhiều lớp riêng biệt, độ cao đỉnh đám mây tương đối ổn định theo thời gian ở độ cao cỡ 16,7 km, trong khi độ cao đáy của đám mây thay đổi liên tục theo thời gian và đôi khi giảm xuống đến độ cao khoảng 12,5 km. Xu hướng chuyển động xuống này tương tự như xu hướng thu được bởi nghiên cứu của Lakkis et al [86], và Nee et al [90]. Dữ liệu lidar theo thời gian cho thấy rõ sự thay đổi của cấu trúc đám mây. Xu thế chuyển động đi xuống của đám mây Ti đã được nghiên cứu trước đó và có thể liên quan đến sự nhiễu loạn, đối lưu hoặc cấu trúc tinh thể băng biến đổi.

3.1.3. Độ dày hình học và độ sâu quang học của mây Ti

Mối quan hệ giữa độ dày hình học và độ sâu quang học của mây Ti là một yếu tố quan trọng trong nghiên cứu các đặc tính quang học và ảnh hưởng khí hậu của loại mây này. Độ dày hình học phản ánh khoảng cách giữa đáy và đỉnh của lớp mây, trong khi độ sâu quang học mô tả khả năng suy giảm ánh sáng do hấp thụ và tán xạ khi ánh sáng truyền qua đám mây. Đại lượng này phụ thuộc vào mật độ số hạt, kích thước và đặc tính của tinh thể băng cấu thành mây [6, 11].

Do đó, khi độ dày hình học tăng lên, lượng vật chất trong lớp mây cũng tăng, kéo theo sự gia tăng độ sâu quang học. Mối tương quan này cho thấy rằng một lớp mây Ti dày hơn có xu hướng tán xạ và hấp thụ ánh sáng mạnh hơn, từ đó ảnh hưởng rõ rệt đến cân bằng bức xạ mặt trời và chu trình năng lượng khí quyển [40, 89].

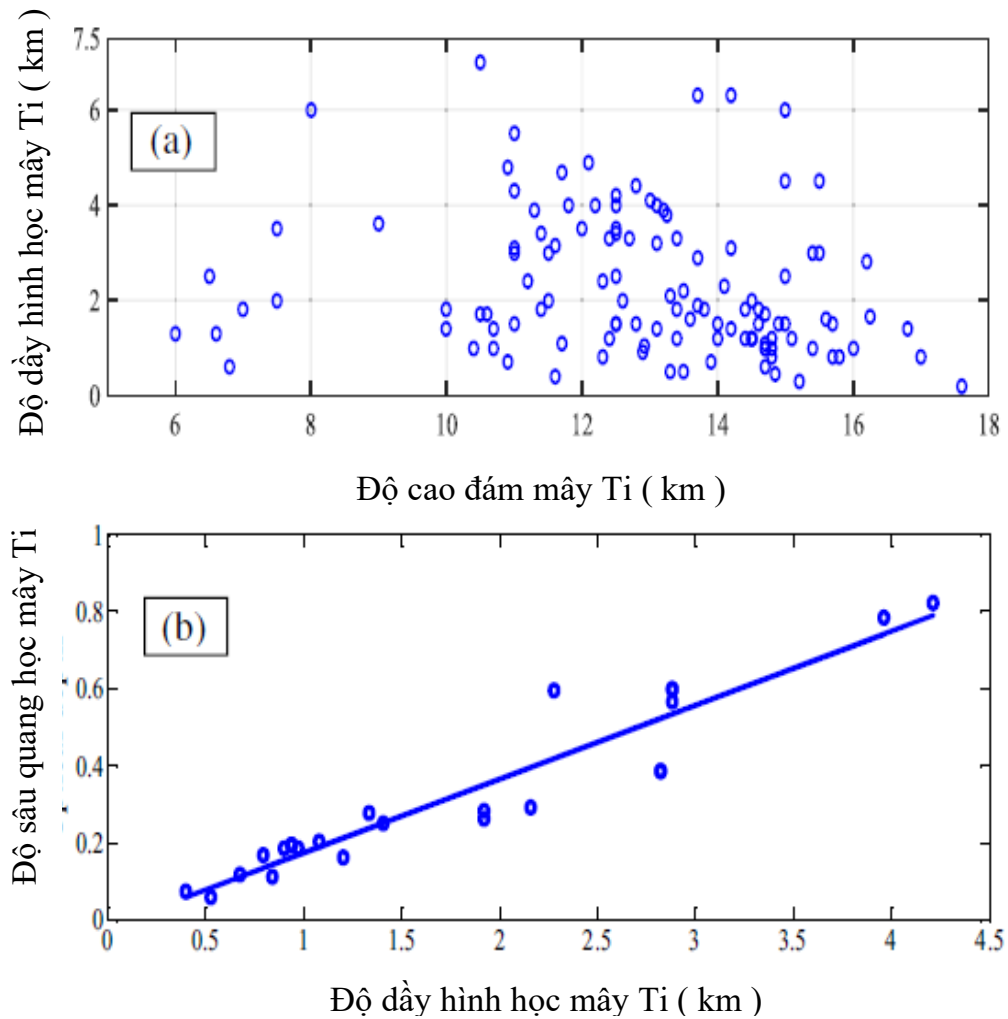
Việc nghiên cứu mối liên hệ này giúp cải thiện đánh giá về tác động bức xạ của mây tầng cao và đóng góp cho các mô hình khí hậu trong việc mô phỏng biến đổi khí hậu toàn cầu [58].



Hình 3.3. (a) Sự thay đổi theo thời gian thực của độ dày hình học của mây Ti (b) sự thay đổi theo thời gian của độ sâu quang học mây Ti thu được từ cùng một dữ liệu .

Sự thay đổi theo thời gian của độ dày hình học đám mây Ti được thể hiện rõ trong hình 3.3(a). Trong trường hợp này, lớp mây thay đổi rất nhanh theo thời gian, với độ dày dao động từ vài trăm mét đến tối đa khoảng 5 km. Sự biến động tương ứng cũng được ghi nhận trong độ sâu quang học, như minh họa trong Hình 3.3(b). Độ sâu quang học dao động liên tục trong suốt thời gian quan sát, với các giá trị từ 0,05 đến 0,36, và giá trị trung bình khoảng 0,13. Mối liên hệ giữa sự thay đổi của độ dày hình học và độ sâu quang học cũng đã được quan sát trong nhiều nghiên cứu trước đây [6, 84, 85, 90].

Trong khảo sát của chúng tôi, phần lớn các đám mây Ti có độ dày hình học trong khoảng 0,2–7,0 km, với giá trị trung bình là $2,3 \pm 1,2$ km. Một số trường hợp mây rất mỏng có độ dày chỉ 0,2 km, trong khi các lớp mây dày hơn, có độ dày lên tới 7,0 km, cũng được ghi nhận nhưng tương đối hiếm. Các nghiên cứu trước đây như của Das et al. [91] và Lakkis et al. [86] cũng đã báo cáo về mối tương quan giữa độ dày hình học và độ cao của các đám mây Ti.



Hình 3.4. (a) Độ dày hình học mây ti theo độ cao; (b) Độ sâu quang học theo độ dày hình học của mây Ti.

Sunilkumar và cộng sự [92] đã báo cáo độ dày hình học trung bình của mây Ti là $3,0 \pm 0,9$ km, với khoảng thay đổi từ 1,2 đến 5,0 km, dựa trên số liệu lidar tại một trạm ở Ấn Độ. Giannakaki và cộng sự [84] cũng ghi nhận độ dày trung bình của đám mây Ti $2,7 \pm 0,9$ km với phạm vi từ 1,0 đến 5,0 km trong điều kiện khí quyển tại châu Âu. Kết quả đo đạc của chúng tôi cho thấy các đám mây Ti có độ dày hình học trong khoảng từ 0,2 đến 7,0 km, với giá trị trung bình $2,3 \pm 1,2$ km, tương đương với các nghiên cứu trước nhưng phân bố rộng hơn. Phạm vi dao động lớn hơn có thể liên quan đến đặc điểm vĩ độ thấp và khí hậu nhiệt đới ẩm của khu vực quan trắc – Hà Nội, nơi hệ thống lidar được triển khai để khảo sát mây Ti.

Hình 3.4(a) thể hiện mối quan hệ giữa độ cao trung bình của mây Ti và độ dày hình học. Dữ liệu không cho thấy tương quan tuyến tính rõ ràng giữa hai đại lượng này ($R^2 \approx 0,05$), cho thấy độ dày mây không phụ thuộc đơn giản vào độ cao hình thành mà chịu tác động của các điều kiện vi khí hậu, độ ẩm, và dòng đối lưu tại thời điểm hình thành mây.

Ngược lại, hình 3.4(b) cho thấy mối quan hệ tuyến tính rõ rệt giữa độ sâu quang học và độ dày hình học. Phân tích hồi quy tuyến tính cho thấy hệ số tương quan cao ($R^2 = 0,88$), chứng tỏ rằng phần lớn biến thiên trong độ sâu quang học có thể được giải thích bằng biến thiên của độ dày hình học. Mối quan hệ này phản ánh thực tế vật lý rằng các lớp mây dày hơn thường chứa nhiều tinh thể băng hơn, dẫn đến khả năng tán xạ và hấp thụ ánh sáng lớn hơn. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây như của Seifert et al. [93] – với dữ liệu từ mạng EARLINET tại châu Âu – và Das et al. [91] – tại Ấn Độ, đều ghi nhận mối quan hệ gần tuyến tính giữa độ sâu quang học optical depth (OD) và độ dày hình học của mây Ti. Những kết quả tương đồng giữa các khu vực khác nhau của chúng tôi và các nhóm nghiên cứu khác trên thế giới cho thấy mối quan hệ quang – hình học này là phổ biến và đặc trưng cho mây tầng cao. Nghiên cứu về mây Ti tại khu vực nhiệt đới như Việt Nam sẽ đóng góp vào việc hoàn thiện hiểu biết toàn cầu về các thông số và đặc trưng của mây Ti.

Các phép đo lidar của chúng tôi ở Hà Nội ghi nhận sự xuất hiện của mây Ti khá nhiều tuy nhiên điều kiện thời tiết ẩm và nhiều mây tại Hà Nội hạn chế việc thu thập số liệu đều đặn theo tháng, theo mùa và theo năm do đó cần có thêm số liệu để so sánh với số liệu từ vệ tinh CALIPSO. Trong tương lai với hệ lidar đã phát triển chúng tôi có thể thực hiện nhiều phép đo hơn nữa để có số liệu thống kê đủ lớn theo tháng, theo mùa, theo năm và có thể so sánh với các số liệu từ vệ tinh CALIPSO. Ngoài ra chúng tôi có thể đo lidar ở nhiều địa điểm trong nước để thu thập thông số về khí quyển, có thêm các kết quả thực nghiệm về khí quyển trên cả nước.

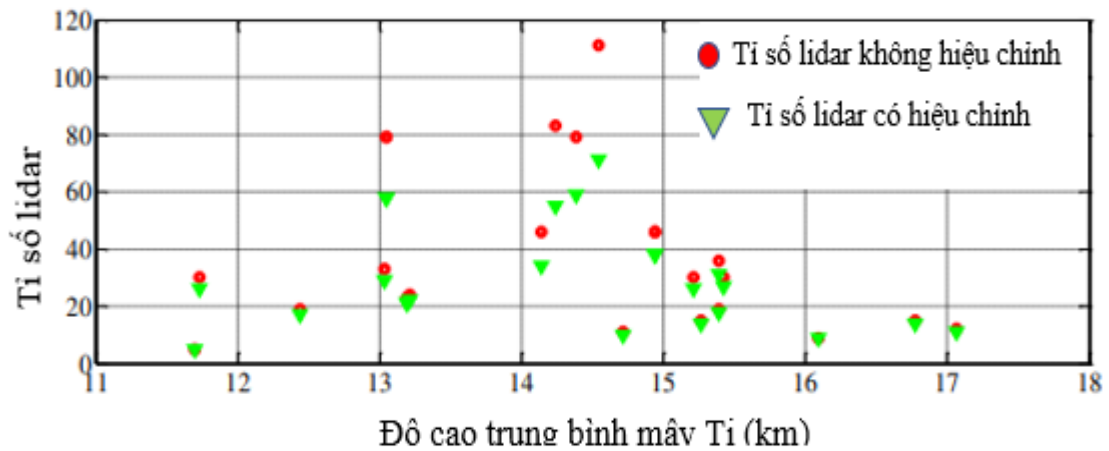
3.1.4. Tỉ số lidar của mây Ti

Tỉ số lidar là một tham số quang học quan trọng trong nghiên cứu mây Ti, phản ánh mối quan hệ giữa mức độ suy hao ánh sáng và cường độ tán xạ ngược của các hạt trong lớp mây. Về định nghĩa, tỉ số lidar được tính bằng tỷ số giữa hệ số suy hao tổng và hệ số tán xạ ngược. Tham số này giúp phân biệt mây Ti với các loại mây khác và là yếu tố then chốt trong việc đánh giá tác động bức xạ của mây đến sự cân bằng năng lượng khí quyển [6, 11, 40].

Do mây Ti chủ yếu được cấu thành từ các tinh thể băng, có khả năng tán xạ mạnh, nên tỉ số lidar thường có giá trị cao hơn so với mây chứa giọt nước. Ngoài ra, việc theo dõi sự thay đổi của tỉ số lidar giúp đánh giá sự biến đổi cấu trúc vi mô của mây Ti dưới tác động của biến đổi khí hậu [58].

Dựa trên dữ liệu lidar thu được, chúng tôi đã xác định tỉ số lidar cho một số trường hợp đám mây Ti. Giá trị trung bình của tỉ số lidar đo được là 30 ± 18 , nằm trong khoảng biến thiên tương đối lớn, phản ánh sự khác biệt đáng kể giữa các đám

mây quan sát được. Không có mối quan hệ rõ ràng giữa tỉ số lidar và độ cao trung bình của mây, cho thấy rằng đặc tính quang học này phụ thuộc nhiều hơn vào cấu trúc vi mô bên trong lớp mây hơn là vào độ cao hình thành.



Hình 3.5. Tỉ số lidar không hiệu chỉnh và có hiệu chỉnh theo chiều cao trung bình đám mây của các đám mây Ti.

Sự phụ thuộc giữa tỉ số lidar và độ cao trung bình của các đám mây Ti được chỉ ra trên hình 3.5. Dữ liệu được chia thành hai nhóm: tỉ số lidar không hiệu chỉnh (chấm tròn đỏ) và đã hiệu chỉnh (tam giác xanh) theo cấu hình hệ thống lidar. Tỉ số lidar dao động từ dưới 10 đến hơn 100, tập trung nhiều nhất trong khoảng từ 15 đến 50. Dù có sự hiệu chỉnh, xu hướng phân bố tổng thể của hai nhóm không khác biệt đáng kể, điều này xác nhận rằng tỉ số lidar là một đại lượng ổn định về mặt phân tích, miễn là quy trình hiệu chỉnh được thực hiện nhất quán.

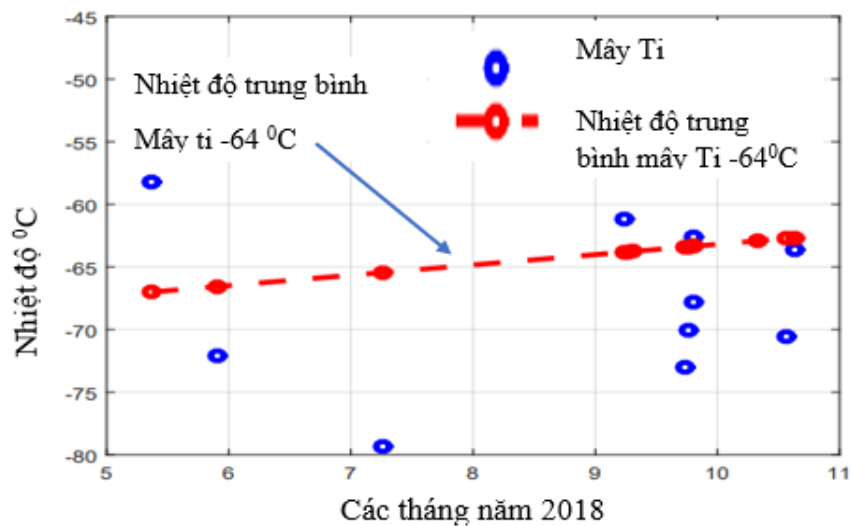
Phân tích này phù hợp với các nghiên cứu trước như của Chen et al. [89], Giannakaki et al. [84], Chiang và Nee [90] tại khu vực Đài Loan, và Lakkis et al. [86] tại Nam Mỹ, khi các tác giả cũng ghi nhận giá trị trung bình của tỉ số lidar nằm trong khoảng từ 25 đến 35, với sai số dao động theo điều kiện khí tượng. Do đó, kết quả của chúng tôi là tương thích về mặt thống kê với các nghiên cứu quốc tế, đồng thời góp phần mở rộng hiểu biết về mây Ti tại khu vực nhiệt đới ẩm như Hà Nội – nơi các điều kiện vi khí hậu có thể tạo ra sự khác biệt nhất định trong phân bố tỉ số lidar.

Ngoài mây Ti, tỉ số lidar còn được xác định cho nhiều loại mây khác như mây tầng, mây tích hoặc mây trung tầng. Tuy nhiên, các nghiên cứu đã chỉ ra rằng tỉ số lidar của mây Ti thường lớn hơn đáng kể so với các loại mây chứa chủ yếu là giọt nước lỏng. Theo tổng hợp của Seifert et al. [93], các lớp mây nước có tỉ số lidar phổ biến nằm trong khoảng 10–20, trong khi mây Ti – do cấu tạo bởi tinh thể băng – thường có tỉ số dao động từ 20 đến 50 hoặc hơn, tùy theo kích thước và mật độ của các hạt băng.

Sự khác biệt rõ ràng này cho phép sử dụng tỉ số lidar như một chỉ số phân loại loại mây, đặc biệt là trong các hệ thống phân tích tự động dữ liệu lidar. Trong bối cảnh nghiên cứu khí hậu, tỉ số lidar đóng vai trò quan trọng trong việc ước tính các thông số vi mô như kích thước hạt, mật độ số hạt và hàm phân bố kích thước hạt (PSD) của đám mây. Những thông số này là đầu vào cần thiết cho các mô hình bức xạ khí quyển nhằm tính toán cân bằng năng lượng Trái Đất [40, 58].

Trong các mô hình khí hậu toàn cầu (GCMs) và mô hình khu vực (RCMs), tỉ số lidar được sử dụng để hiệu chỉnh các tham số mây, từ đó nâng cao độ chính xác trong mô phỏng lưu lượng bức xạ mặt trời và sóng dài đi qua khí quyển, đặc biệt tại tầng cao nơi mây Ti thường tồn tại. Việc tích hợp các tỉ số lidar đo thực tế như trong nghiên cứu này sẽ giúp thu hẹp sai số mô hình hóa và cải thiện dự báo xu hướng biến đổi khí hậu toàn cầu trong các kịch bản tương lai.

3.1.5. Kết quả khảo sát thông số nhiệt độ mây Ti.



Hình 3.6. Kết quả khảo sát nhiệt độ của mây Ti năm 2018.

Hình 3.6. trình bày kết quả khảo sát nhiệt độ của các đám mây Ti trong khoảng thời gian từ tháng 5 đến tháng 11 năm 2018. Các điểm màu xanh biểu thị nhiệt độ của từng đám mây Ti được xác định thông qua đo đạc lidar kết hợp với mô hình nhiệt độ khí quyển (MSISE-90), còn các điểm màu đỏ đậm và đường gạch đứt thể hiện giá trị nhiệt độ trung bình của các đám mây Ti theo từng tháng. So sánh nghiên cứu của chúng tôi với nhóm nghiên cứu của Huang et al. (2019) nhiệt độ đám mây ti từ Vệ tinh thời tiết nhật bản Himawari-8 so sánh với Calipso cùng với khoảng thời gian chúng tôi thực hiện các phép đo lidar khảo sát mây Ti. Nhiều phép đo xác định nhiệt độ đám mây Ti từ -20°C đến -60°C [95], các kết quả này tương tự với khảo sát của chúng tôi tuy nhiên một số phép đo của chúng tôi khảo sát mây Ti có nhiệt độ thấp hơn từ -75°C đến -55°C .

Kết quả thu được khi khảo sát cho thấy mây Ti hình thành và tồn tại ở mức nhiệt độ rất thấp, dao động từ -75°C đến -55°C , với nhiệt độ trung bình toàn bộ giai đoạn khảo sát là khoảng -64°C . Sự phân bố này phù hợp với các điều kiện vật lý đặc trưng cho sự hình thành mây tầng cao, vốn thường xảy ra ở tầng đối lưu trên hoặc tầng bình lưu dưới, nơi nhiệt độ môi trường đủ thấp để hơi nước có thể ngưng tụ trực tiếp thành các tinh thể băng nhỏ.

Khi so sánh với các nghiên cứu trước, có thể thấy kết quả của chúng tôi hoàn toàn nhất quán về mặt vật lý và thống kê. Tại Ấn Độ, Sunilkumar và cộng sự [92] đã ghi nhận rằng các đám mây Ti thường hình thành ở nhiệt độ khoảng -63°C , trong khi Chiang và Nee [90] tại Chung-Li, Đài Loan cũng xác định vùng nhiệt độ hình thành mây Ti phổ biến nằm trong khoảng -60°C đến -70°C . Sự tương đồng này cho thấy tính toàn cầu của vùng nhiệt độ đặc trưng cho sự tồn tại của mây Ti, bất kể điều kiện địa phương hay vĩ độ.

Bên cạnh ý nghĩa trong phân tích cấu trúc nhiệt động học, nhiệt độ của mây Ti cũng có liên hệ chặt chẽ với các đặc tính quang học như tỉ số lidar và độ sâu quang học. Các nghiên cứu như của Seifert et al. [93] và Das et al. [91] cho thấy rằng ở nhiệt độ thấp hơn, các tinh thể băng có xu hướng nhỏ hơn, hình thái phức tạp hơn và mật độ cao hơn, từ đó dẫn đến khả năng tán xạ ngược mạnh hơn, thể hiện qua tỉ số lidar cao hơn. Mặt khác, các lớp mây ở điều kiện nhiệt độ thấp thường có độ dày hình học nhỏ hơn, nhưng độ sâu quang học (OD) lớn hơn, do lượng vật chất tham gia vào quá trình tán xạ lớn hơn trên mỗi đơn vị chiều sâu.

Điều này giải thích tại sao trong các quan trắc đi kèm, nhiều đám mây Ti có nhiệt độ thấp hơn -70°C lại cho thấy tỉ số lidar vượt mức trung bình hoặc OD lớn dù có độ dày hình học nhỏ. Như vậy, phân tích đồng thời về nhiệt độ và tính chất quang học là chìa khóa để đánh giá chính xác vi cấu trúc mây và vai trò của chúng trong quá trình hấp thụ – phản xạ bức xạ mặt trời và hồng ngoại.

Kết quả thu được tại Hà Nội – khu vực thuộc vĩ độ thấp với điều kiện nhiệt đới ẩm đặc trưng – không chỉ góp phần làm sáng tỏ đặc điểm mây Ti trong khu vực mà còn mở rộng cơ sở dữ liệu thực nghiệm cho các nghiên cứu khí hậu và dự báo biến đổi khí hậu. Những quan sát này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh hiện nay khi các mô hình khí hậu cần được hiệu chỉnh với dữ liệu đầu vào thực tế chính xác hơn để mô tả đúng vai trò của các đám mây tầng cao trong chu trình năng lượng và luân chuyển nước của khí quyển.

Bảng 3.1. Số liệu nhiệt độ lớp phân tầng Tropopause và mây Ti.

Trôppause °C	-78,9	-82,9	-83	-82,8	-83	-82,4
Mây Ti °C	-67,0	-66,6	-65,4	-63,8	-63,8	-63,8
Trôppause °C	-81,7	-80,2	-84,2	-80,7	-82,4	-81,4
Mây Ti °C	-63,4	-63,4	-63,4	-63,4	-62,9	-62,7

Bảng 3.1 trình bày chi tiết nhiệt độ của các đám mây Ti và lớp tropopause tương ứng, dựa trên các lần quan trắc năm 2018. Kết quả cho thấy nhiệt độ tại tropopause luôn thấp hơn mây Ti từ 15–20°C, phản ánh đặc trưng phân tầng nhiệt độ trong khí quyển. Dữ liệu cũng khẳng định rằng các đám mây Ti hình thành ở gần vùng rìa dưới của tropopause, nơi có điều kiện thuận lợi để hình thành tinh thể băng từ hơi nước.

Việc đối chiếu trực tiếp nhiệt độ giữa mây Ti và tropopause giúp củng cố kết luận rút ra từ hình 3.6 về vị trí hình thành và tính ổn định nhiệt động học của mây Ti. Ngoài ra, sự phân tầng nhiệt độ rõ rệt này còn hỗ trợ đánh giá ranh giới động học giữa tầng đối lưu và tầng bình lưu, đóng vai trò quan trọng trong mô hình hóa vận chuyển năng lượng theo chiều đứng trong khí quyển. Những số liệu thống kê trong bảng 3.1 là cần thiết để kết hợp với dữ liệu lidar, góp phần nâng cao hiểu biết về cấu trúc của khí quyển tầng cao và sự tương tác với các lớp mây lạnh như mây Ti.

Vì vậy, việc thống kê nhiệt độ mây Ti từ các phép đo lidar là vô cùng cần thiết để hiểu rõ mối liên hệ giữa điều kiện nhiệt động học và tính chất quang học của mây. Những hiểu biết này không chỉ giúp cải thiện độ chính xác của các mô hình bức xạ khí quyển, mà còn cung cấp đầu vào quan trọng cho các mô hình khí hậu toàn cầu, nơi vai trò của mây tầng cao như mây Ti đang ngày càng được nhận thức rõ hơn về tác động của chúng đến cân bằng năng lượng và biến đổi khí hậu [40, 58].

3.1.6. Thống kê phép đo lidar khảo sát mây Ti

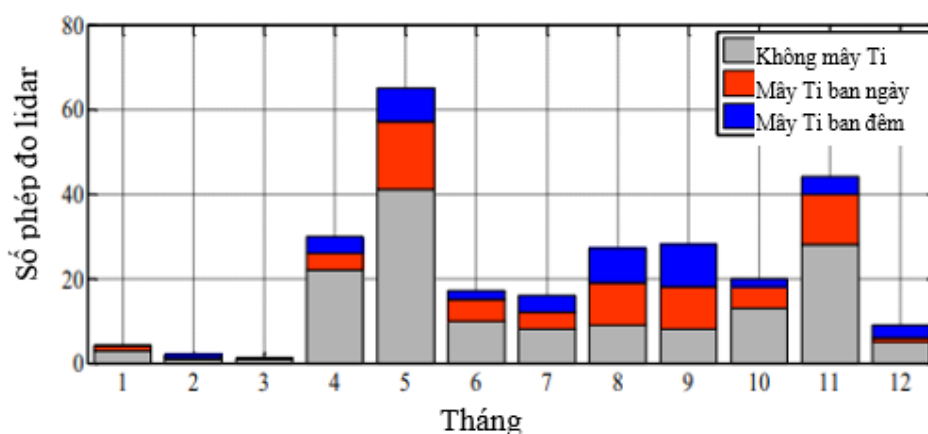
Việc thống kê sự xuất hiện của mây Ti đóng vai trò quan trọng trong nghiên cứu khí quyển và bức xạ khí hậu, bởi mây Ti là một trong những lớp mây có ảnh hưởng lớn đến cân bằng năng lượng toàn cầu nhờ khả năng tán xạ và phản xạ bức xạ mặt trời ở tầng khí quyển cao. Ngoài ra, việc khảo sát mây Ti còn có ý nghĩa thiết thực trong nhiều lĩnh vực ứng dụng như viễn thám khí quyển, hàng không vũ trụ, và nâng cao độ chính xác trong mô hình dự báo thời tiết – khí hậu.

Trong quá trình khảo sát, chúng tôi đã thu được 263 phép đo lidar, trong đó có 104 phép đo ban ngày thực hiện ở chế độ tín hiệu tương tự (analog), và 159 phép đo ban đêm sử dụng chế độ đếm photon. Số liệu phân bố theo mùa cho thấy có 33 phép

đo vào mùa xuân, 98 vào mùa hè, 75 vào mùa thu, và 57 vào mùa đông. Kết quả phân tích cho thấy mây Ti xuất hiện trong 114 trường hợp, trong đó có 68 trường hợp vào ban ngày và 46 trường hợp vào ban đêm.

Đáng chú ý, các phân tích chuyên sâu như xác định độ sâu quang học và tỉ số lidar đòi hỏi tín hiệu lidar phải có chất lượng cao, độ nhiễu thấp và độ phân giải tốt. Qua quá trình sàng lọc, chúng tôi xác định rằng có 24 trường hợp mây Ti ban đêm đủ điều kiện chất lượng để tiến hành phân tích chi tiết các tham số quang học này. Điều đó cho thấy rằng, bên cạnh số lượng, chất lượng dữ liệu lidar là yếu tố then chốt trong việc trích xuất chính xác các đặc trưng vật lý của mây Ti.

Những thông kê định lượng như vậy không chỉ cung cấp cái nhìn tổng thể về tần suất xuất hiện của mây Ti theo mùa, mà còn hỗ trợ trong việc thiết lập cơ sở dữ liệu đầu vào cho các mô hình khí hậu, qua đó góp phần nâng cao khả năng mô phỏng và dự báo các hiện tượng khí quyển quy mô lớn, đặc biệt là ở tầng cao nơi mây Ti đóng vai trò chi phối.



Hình 3.7. Biểu đồ thống kê về số lần xuất hiện của các lớp Ti và tổng số các phép đo lidar từ năm 2011 đến năm 2017.

Hình 3.7 trình bày biểu đồ thống kê số lần xuất hiện của mây Ti và tổng số phép đo lidar được thực hiện từ năm 2011 đến năm 2017 tại Hà Nội, Việt Nam. Các cột được chia thành ba phần đại diện cho: phép đo không ghi nhận mây Ti, mây Ti xuất hiện vào ban ngày, và mây Ti xuất hiện vào ban đêm. Biểu đồ cho thấy rõ sự biến thiên mạnh mẽ theo mùa, với số phép đo cao nhất vào các tháng 5, 6 và 9 – vốn tương ứng với mùa hè và đầu mùa thu ở miền Bắc Việt Nam. Các thông số đặc trưng vật lý của mây Ti do chúng tôi khảo sát tại Hà nội được tổng hợp trong bảng 3.2

Bảng 3.2 tổng hợp các đặc trưng vật lý của mây Ti tại Hà nội.

Đặc trưng vật lý mây Ti	Vị trí	Độ cao đáy(km)	Độ cao trung bình(km)	Độ cao đỉnh(km)	Độ dày hình học(km)	Độ sâu quang học	Tỉ số LIDAR
Hanoi, Vietnam	21,03°N, 105,85°E	12,9± 2,3	14,0 ± 2,3	15,2 ±2,5	2,3 ± 1,2	0,32± 0,22	30 ± 18

Bảng 3.3 tổng hợp các đặc trưng vật lý của mây Ti tại nhiều địa điểm trên thế giới, bao gồm các thông số: độ cao đáy, độ cao đỉnh, độ cao trung bình, độ dày hình học, độ sâu quang học và tỉ số lidar. Dữ liệu được sắp xếp theo thứ tự tăng dần của vĩ độ, từ vùng nhiệt đới (4°N) đến vùng ôn đới cao (55,5°N), nhằm phân tích xu hướng phân bố theo vị trí địa lý.

Bảng 3.3. Kết quả thống kê của một số nhóm nghiên cứu mây Ti trên thế giới trong những năm gần đây.

Đặc trưng vật lý mây Ti	Vị trí	Độ cao đáy(km)	Độ cao trung bình(km)	Độ cao đỉnh(km)	Độ dày hình học(km)	Độ sâu quang học	Tỉ số LIDAR
Hulule, Maldives	4,1°N; 73,3°E	11,9 (1,6)		13,7 (1,4)	1,8 (1,0)		
Gadanki, India	13,5°N; 79,2°E	14	14,5	15,5			
Hanoi, Vietnam	21,03°N; 105,85°E	12,9 ± 2,3	14,0 ± 2,3	15,2 ± 2,5	2,3 ± 1,2	0,32 ± 0,22	30 ± 18
Chung-Li, Taiwan	24,58°N; 121,10°E	12,34 ± 2,2	13,37 ± 2,1	14,43 ± 1,9	2,08 ± 1,2	0,17 ± 0,29	23 ± 16
Buenos Aires	34,6°S; 58,5°W	8,3	8 ÷ 14	11,8	3 ± 0,9	0,26 ± 0,11	32 ± 17
Lanzhou, China	35,95°N; 104,14°E	8,0 ± 1,0	9,0 ± 1	10,0 ± 1,0	2 ± 0,6	0,35 ± 0,31	26 ± 16
Thesaloniki, Greece	40,6°N; 22,9°E	8,6	8,6 ÷ 13	13	2,7 ± 0,9	0,31 ± 0,24	30 ± 17
Salt Lake City	40,8°N; 111,8°E	8,78		11,2	1,81		
Haute Provence, France	44°N; 6°E	9,3		10,7	1,4		
Punta Arenas, Chile ³	53,1°S; 71°W	8,8 ± 7,9		9,5	1,4		
Prestwick, Scotland	55,5°N; 4,6°W	8,3 ± 8,5		9,6	1,2		

Phân tích các giá trị trong bảng cho thấy một xu hướng rõ rệt theo vĩ độ: tại vùng vĩ độ thấp, mây Ti có xu hướng hình thành ở độ cao lớn hơn trong khí quyển, trong khi tại các vĩ độ trung bình và cao, mây Ti xuất hiện ở độ cao thấp hơn. Ví dụ, tại Maldives (4,1°N) và Gadanki, Ấn Độ (13,5°N), đám mây Ti được ghi nhận ở độ cao trung bình từ 13,7–15,5 km; trong khi tại Scotland (55,5°N) và Chile (53,1°S), mây Ti chỉ đạt độ cao khoảng 9,5–9,6 km. Xu hướng này phù hợp với đặc điểm khí quyển toàn cầu, khi nhiệt độ giảm mạnh theo vĩ độ, dẫn đến điểm băng hóa (ice-supersaturation layer) xảy ra ở độ cao thấp hơn ở vùng ôn đới và cực.

Tuy nhiên, các thông số như độ dày hình học, độ sâu quang học và tỉ số lidar lại không cho thấy sự khác biệt đáng kể theo vĩ độ. Các nghiên cứu tại nhiều địa điểm khác nhau đều ghi nhận độ dày mây Ti dao động phổ biến trong khoảng 1–3 km, tỉ số lidar trung bình từ 23 đến 32, và độ sâu quang học trong khoảng 0,2–0,35.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã sử dụng hệ thống lidar được phát triển tại nhóm nghiên cứu để khảo sát các đám mây Ti tại Hà Nội (21,03°N). Kết quả cho thấy mây Ti phân bố ở độ cao từ 6,7 đến 18,0 km, với giá trị trung bình là $14,0 \pm 2,3$ km, phù hợp với xu hướng của các trạm vùng nhiệt đới. Độ dày hình học dao động trong khoảng 0,2 đến 7,0 km, trung bình $2,3 \pm 1,2$ km; độ sâu quang học trung bình là $0,32 \pm 0,22$ và tỉ số lidar trung bình là 30 ± 18 .

So sánh với các địa điểm như Chung-Li, Đài Loan [90], Lanzhou, Trung Quốc, hoặc Thessaloniki, Hy Lạp [93], các kết quả đo tại Hà Nội tương đồng cả về đặc tính hình học lẫn quang học, khẳng định độ tin cậy và độ chính xác của hệ lidar trong nước. Điều này cho thấy các đặc trưng vật lý của mây Ti có tính ổn định tương đối theo vùng khí hậu, và các trạm lidar ở vĩ độ thấp như Hà Nội có thể đóng góp dữ liệu quan trọng vào mạng lưới nghiên cứu mây Ti toàn cầu.

Dựa trên dữ liệu tổng hợp từ nhiều trạm quan trắc tại các vĩ độ khác nhau trong bảng 3.3, có thể nhận thấy một số xu hướng toàn cầu rõ rệt về sự phân bố và đặc tính vật lý của mây Ti:

Độ cao mây Ti phụ thuộc mạnh vào vĩ độ địa lý

Một trong những xu hướng nổi bật là độ cao xuất hiện của mây Ti giảm dần theo vĩ độ tăng. Tại các khu vực gần xích đạo như Maldives, Ấn Độ, Việt Nam, độ cao trung bình của đám mây Ti dao động từ 13,7 km đến hơn 15 km. Ngược lại, tại các trạm vùng ôn đới như Pháp, Chile, Scotland, độ cao trung bình chỉ còn khoảng 9–10 km. Xu hướng này phản ánh đặc điểm nhiệt động học toàn cầu, nơi nhiệt độ tầng đối lưu và tropopause giảm dần về các vĩ độ cao, làm cho điều kiện hình thành mây băng (ice clouds) xảy ra ở độ cao thấp hơn.

Độ dày hình học và độ sâu quang học tương đối ổn định theo vĩ độ

Khác với độ cao, độ dày hình học của mây Ti được ghi nhận có sự biến động nhưng không phụ thuộc rõ rệt vào vĩ độ. Các trạm từ nhiệt đới đến ôn đới đều cho thấy độ dày trung bình nằm trong khoảng 1,5–3,0 km, bất kể độ cao trung bình khác biệt. Điều này cho thấy cơ chế phát triển chiều dày của mây Ti chủ yếu phụ thuộc vào điều kiện vi khí hậu cục bộ, như độ ẩm tầng cao, tốc độ nâng và phân bố bức xạ, hơn là yếu tố vĩ độ.

Tương tự, độ sâu quang học (OD) và tỉ số lidar cũng duy trì trong phạm vi tương tự giữa các địa điểm, với OD dao động quanh 0,2–0,35, và tỉ số lidar phổ biến từ 23 đến 32. Mức độ tương đồng này cho thấy tính chất vi mô và vi cấu trúc của tinh thể băng trong mây Ti có tính ổn định toàn cầu – phần lớn phụ thuộc vào nhiệt độ và mức bão hòa hơi nước tầng cao, hơn là vị trí địa lý.

Ý nghĩa khí hậu và mô hình hóa

Từ những xu hướng trên, có thể thấy rằng mây Ti là loại mây tầng cao có tính chất ổn định và dễ quy chuẩn trong các mô hình khí hậu. Điều này mở ra khả năng sử dụng các thông số trung bình (climatology) cho mây Ti ở từng vùng khí hậu để đưa vào mô hình bức xạ khí quyển và mô phỏng khí hậu toàn cầu. Việc hệ thống hóa các quan trắc lidar tại nhiều vĩ độ – như được tổng hợp trong bảng 3.2 – là tiền đề quan trọng cho việc xây dựng các cơ sở dữ liệu toàn cầu về mây tầng cao phục vụ nghiên cứu biến đổi khí hậu.

3.2. Xác định thông số vật lý khí quyển tầng cao

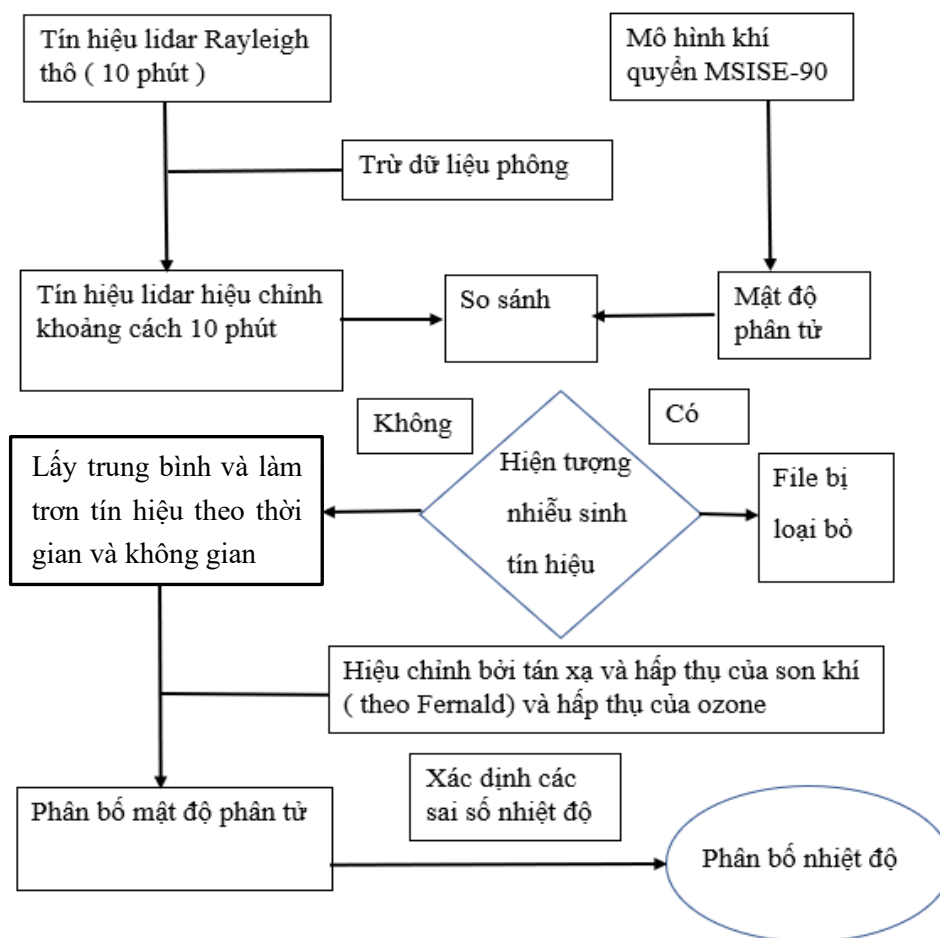
Phần này trình bày các kết quả thu được từ các phép đo nhiệt độ và phân bố nhiệt độ của khí quyển tầng cao thu được từ hệ lidar đã được nâng cấp bộ thu gương cầu có khẩu độ lớn được và các kết quả này được so sánh với mô hình khí quyển MSISE-90 để xác nhận độ tin cậy của dữ liệu.

3.2.1. Thuật giải xác định phân bố nhiệt độ

Hình 3.8 trình bày sơ đồ khối quy trình xử lý dữ liệu từ hệ lidar Rayleigh nhằm xác định phân bố nhiệt độ khí quyển tầng cao. Hệ thống được thiết lập và điều khiển qua phần mềm Labview, trong đó mỗi tệp dữ liệu được tạo ra từ quá trình tích lũy 6000 xung laser trong 10 phút, đảm bảo tín hiệu có tỷ số tín hiệu–trên–nhiều (SNR) đủ cao cho xử lý tiếp theo.

Bước đầu tiên là trừ ánh sáng nền (photon nền) khỏi tín hiệu thô để thu được tín hiệu lidar đã hiệu chỉnh. Tín hiệu này tiếp tục được chuẩn hóa khoảng cách, thông qua phép nhân với bình phương khoảng cách đo, nhằm hiệu chỉnh tổn hao hình học theo nguyên lý lan truyền ánh sáng trong môi trường khí quyển.

Để kiểm tra độ tin cậy của phép đo, tín hiệu lidar đã chuẩn hóa được so sánh với đường phân bố mật độ phân tử từ mô hình khí quyển MSISE-90 trên thang logarit. Nếu phát hiện sự nhiễu sinh tín hiệu (do mây dày, thời tiết xấu, hoặc lỗi hệ thống), tệp dữ liệu sẽ bị loại bỏ khỏi quá trình xử lý tiếp theo. Với các tín hiệu đạt yêu cầu, chúng tôi tiến hành làm mượt tín hiệu theo thời gian và không gian bằng cách trung bình 20 điểm theo thang logarit và gom nhóm 100 bin khoảng cách, tương ứng với độ phân giải không gian là 120 m. Việc này giúp giảm sai số ngẫu nhiên, cải thiện độ chính xác trong việc trích xuất thông tin vật lý.



Hình 3.8. Sơ đồ khối thuật giải nhiệt độ.

Tín hiệu sau khi làm mượt tiếp tục được hiệu chỉnh bởi sự hấp thụ của ô dôn và son khí (theo phương pháp Fernald), để thu được tín hiệu lidar hiệu dụng – phản ánh trung thực độ suy hao do phân tử khí quyển gây ra. Từ đây, chương trình xử lý số liệu trên nền tảng Matlab sẽ xác định phân bố mật độ phân tử và tính toán phân bố nhiệt độ dựa trên các giả định khí lý tưởng và cân bằng thủy tĩnh.

Một trong những thách thức lớn trong quan trắc là tín hiệu tán xạ ngược mạnh từ trường gần (dưới ~10 km), gây bão hòa ống nhân quang điện (PMT) ở bước sóng 532 nm. Để khắc phục, chúng tôi sử dụng mô-đun gated-PMT hoạt động ở chế độ đếm photon, được điều khiển trong phần mềm và chỉ mở cửa nhận tín hiệu khi chùm

laser đạt tới các độ cao xa. Nhờ đó, hệ thống chỉ thu nhận tín hiệu yếu từ tầng khí quyển trên (15–50 km), đảm bảo độ nhạy cao và tránh bão hòa PMT.

Tín hiệu photon tán xạ ngược được ghi nhận bởi hệ đếm photon tích hợp từ mô-đun gated-PMT, bộ khuếch đại, và máy hiện sóng kỹ thuật số. Dữ liệu được lưu dưới định dạng *.txt trên máy tính, thuận tiện cho xử lý hậu kỳ và phân tích thống kê. Như vậy, với cấu hình tối ưu và chu trình xử lý như mô tả trong hình 3.8, hệ lidar đã được nâng cấp cho phép xác định phân bố nhiệt độ trong tầng đối lưu, tầng bình lưu, và thậm chí cả tầng trung lưu với độ chính xác cao, hỗ trợ hiệu quả cho các nghiên cứu khí quyển và khí hậu tầng cao.

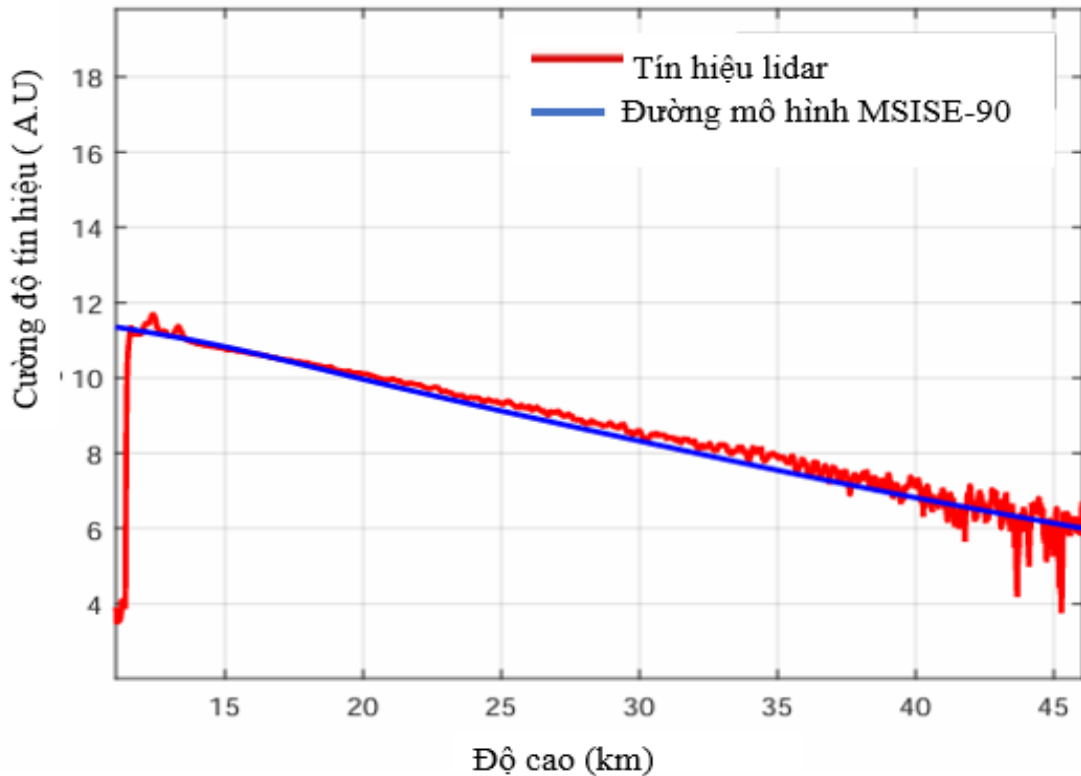
3.2.2. Đánh giá chất lượng tín hiệu lidar thu được từ hệ lidar gương khẩu độ

Hình 3.9 trình bày kết quả đo tín hiệu lidar thực hiện vào lúc 22h ngày 25 tháng 8 năm 2018 tại địa điểm 18 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội. Dữ liệu thể hiện đường biểu diễn cường độ tín hiệu lidar đã được xử lý, bao gồm các bước loại bỏ nhiễu, hiệu chỉnh tín hiệu và chuẩn hóa khoảng cách. Kết quả sau xử lý được thể hiện bằng đường màu đỏ, ứng với tín hiệu lidar hiệu dụng, được thể hiện trong khoảng độ cao từ 10 km đến 45 km.

Tại độ cao dưới 10 km, tín hiệu tán xạ ngược rất mạnh từ lớp khí quyển gần gây ra hiện tượng bão hòa ống nhân quang điện (PMT), do đó các giá trị ở vùng này được loại bỏ (gated) và không được sử dụng trong phân tích. Đường màu xanh trên đồ thị biểu diễn phân bố mật độ phân tử từ mô hình khí quyển MSISE-90 được chuẩn hóa và biểu diễn trên cùng một hệ tọa độ logarit để tiện so sánh. Dễ dàng nhận thấy hai đường biểu diễn (tín hiệu lidar và mô hình MSISE-90) gần như song song trong khoảng từ 15 km đến 40 km, cho thấy sự phù hợp rất tốt giữa kết quả thực nghiệm và mô hình lý thuyết. Sự phù hợp này phản ánh tính ổn định và độ chính xác cao của hệ thống lidar Rayleigh trong việc đo đặc cấu trúc khí quyển tầng cao tại Việt Nam.

Tuy nhiên, bắt đầu từ độ cao khoảng 40 km trở lên, tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) bắt đầu giảm nhanh, dẫn đến độ chính xác của tín hiệu suy giảm rõ rệt. Ở độ cao trên 45 km, tín hiệu trở nên quá yếu so với nhiễu và không còn đủ điều kiện tin cậy để phân tích. Điều này là một đặc điểm phổ biến trong các phép đo lidar Rayleigh do sự suy giảm cường độ tín hiệu theo qui luật bình phương khoảng cách và mật độ phân tử thấp ở tầng trung trung lưu.

Tín hiệu thu được đã chứng minh rằng hệ thống lidar hiện tại có thể cung cấp tín hiệu ổn định và chính xác đến độ cao khoảng 40–45 km, mở ra khả năng áp dụng cho việc nghiên cứu phân bố mật độ, nhiệt độ khí quyển và các hiện tượng động lực học tầng cao tại khu vực vĩ độ thấp như Hà Nội.



Hình 3.9. Tín hiệu lidar 22h ngày / 25 tháng 8 năm 2018 / tại 18 Hoàng Quốc Việt- Nghĩa đô – Cầu giấy – Hà Nội.

Hình 3.10 trình bày kết quả tín hiệu lidar thu được vào ngày 28 tháng 8 năm 2018 tại Hà Nội. Tín hiệu biểu diễn bằng đường màu đỏ thể hiện tín hiệu đã hiệu chỉnh và chuẩn hóa theo khoảng cách. Đường màu xanh lam thể hiện mô phỏng lý thuyết theo mô hình khí quyển MSISE-90, được sử dụng làm chuẩn để đánh giá mức độ phù hợp của tín hiệu thực nghiệm.

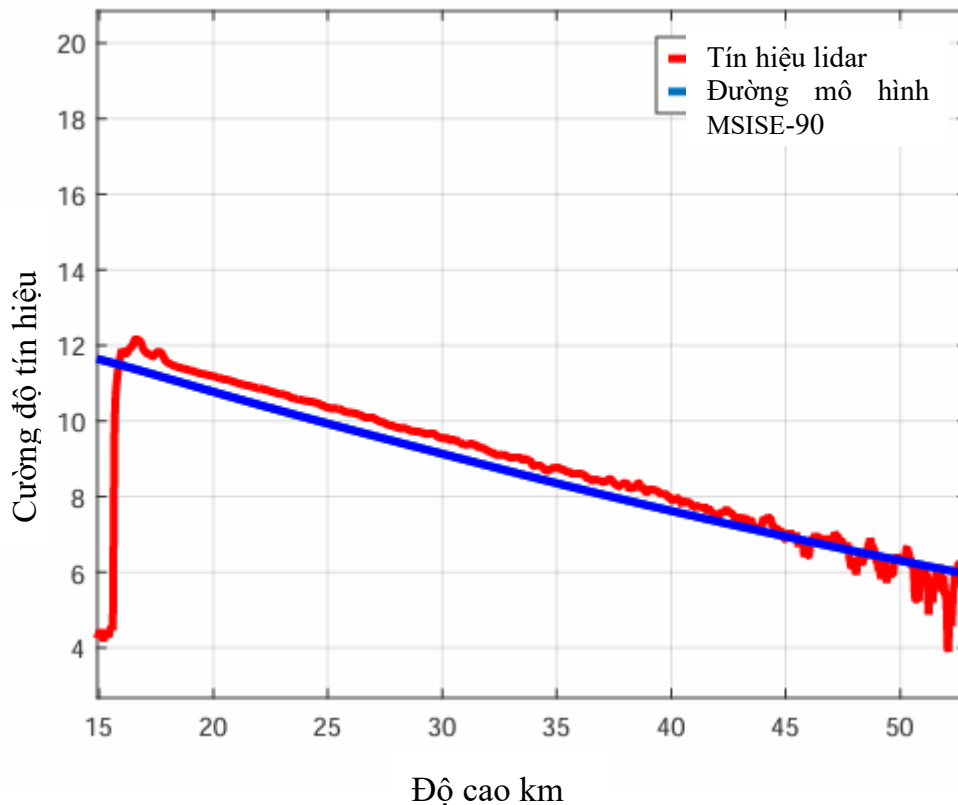
Trong phép đo này, điểm "gate" được đặt tại độ cao 16 km, nhằm loại bỏ tín hiệu tán xạ ngược mạnh từ tầng đối lưu thấp gây bão hòa hệ thống đếm photon. Sau khi hiệu chỉnh, tín hiệu lidar thu được có chất lượng rất tốt, đạt đến độ cao trên 55 km – điều hiếm gặp trong điều kiện khí hậu Việt Nam.

Có thể quan sát thấy tín hiệu thực nghiệm bám sát đường mô hình MSISE-90, cho thấy sự tương thích rất tốt giữa kết quả quan trắc và lý thuyết, đặc biệt trong khoảng từ 16 đến 50 km. Sự sai lệch nhẹ ở độ cao trên 50 km là do tỉ số tín hiệu–trên–nhiều (SNR) bắt đầu giảm nhanh và tín hiệu bắt đầu bị nhiễu ngẫu nhiên chi phối.

Một yếu tố then chốt làm nên thành công của phép đo là việc sử dụng gương cầu khẩu độ lớn mà chúng tôi đã nâng cấp cho hệ lidar. So sánh với các phép đo trước đây sử dụng kính thiên văn 25 cm, hệ thống mới cho phép rút ngắn thời gian tích lũy từ 60 phút xuống chỉ còn 10 phút, nhưng vẫn đảm bảo tín hiệu có chất lượng cao và độ cao đo đạt đến 55 km.

Điều này chứng tỏ rằng việc tăng khẩu độ thu của bộ thu quang không chỉ nâng cao giới hạn độ cao đo, mà còn cải thiện đáng kể độ phân giải thời gian, giúp hệ thống lidar trở nên linh hoạt hơn trong điều kiện khí quyển thay đổi nhanh.

Với hệ lidar này, chúng tôi có thể thu nhận và phân tích các đặc trưng vật lý quan trọng của khí quyển tầng cao như phân bố nhiệt độ, mật độ phân tử, và độ sâu quang học, cung cấp dữ liệu có độ tin cậy cao cho nghiên cứu khí hậu, động lực học khí quyển và các quá trình bức xạ – truyền năng lượng trong tầng trung quyển.

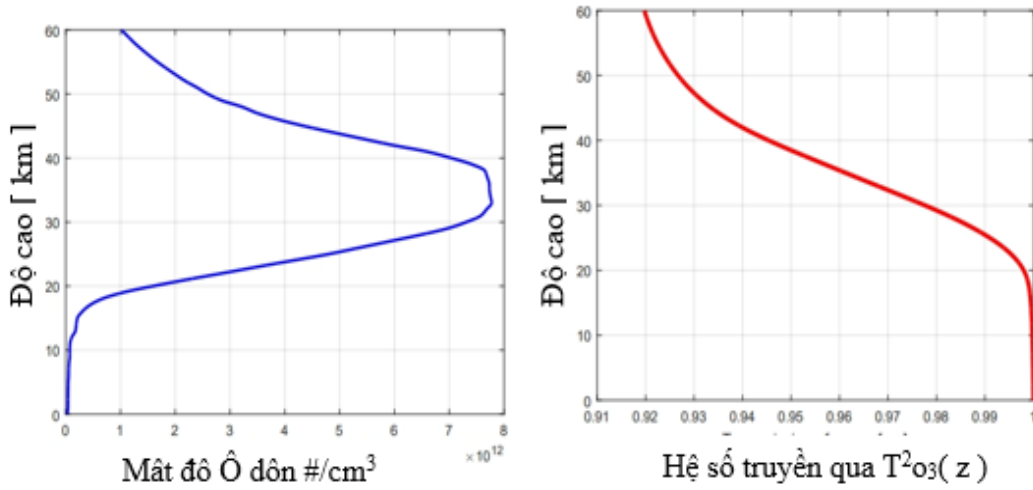


Hình 3.10. Tín hiệu lidar 23 h ngày 28 tháng 8 năm 2018 tại 18 Hoàng Quốc Việt – Nghĩa đô – Cầu giấy – Hà Nội.

3.2.3. Xác định mật độ phân tử từ tín hiệu lidar hiệu dụng

Tín hiệu lidar hiệu dụng thu được sau khi hiệu chỉnh sự hấp thụ khí ô dôn trong quá trình truyền từ hệ lidar tới khí quyển rồi về hệ thu. Chúng tôi sử dụng một kênh tham chiếu số liệu mật độ ô dôn từ vệ tinh SAGE [55]. Mật độ phân tử ô dôn và sự truyền đi rồi vòng lại hệ thu qua môi trường không khí có sự hiện diện của ô dôn được trình bày trong hình 3.11. Tín hiệu lidar hiệu dụng cho biết sự tán xạ của phân tử khí quyển nói chung. Sự suy hao của tín hiệu lidar Rayleigh gây ra bởi hấp thụ của khí ô dôn trong quá trình lan truyền ánh sáng. Sự suy hao của ô dôn được xác định từ phân bố mật độ ô dôn theo độ cao cho phép xác định hệ số truyền qua một vòng từ hệ lidar lên khí quyển rồi trở lại hệ thu $T^2_{O_3}(z)$ của ô dôn. Tín hiệu lidar hiệu dụng

thu được bằng cách lấy tín hiệu lidar đo được chia cho hệ số truyền qua khí ô dôn.



Hình 3.11. Mật độ khí ô dôn và quá trình truyền qua khí ô dôn với đường truyền một vòng đi và về hệ thu lidar.

Tín hiệu lidar được hiệu chỉnh bởi quá trình truyền qua ô dôn sẽ được dùng để xác định mật độ phân tử, hệ số tán xạ ngược và hệ số suy hao của phân tử. Sự suy hao của tín hiệu lidar còn có sự đóng góp của các thành phần son khí, ô dôn và các đám mây. Các hệ số này cho phép xác định tỉ số tán xạ ngược son khí $R_{aer}(z)$ và hệ số truyền qua một vòng khí quyển của son khí $T^2_{aer}(z)$. Cuối cùng tín hiệu lidar hiệu dụng phụ thuộc vào độ cao $P_{eff}(z)$ được xác định sau khi hiệu chỉnh suy hao của son khí và ô dôn từ tín hiệu lidar đo được $P(z)$.

Mật độ phân tử của khí quyển suy ra bằng cách biến đổi phương trình lidar. Đại lượng tỉ số tán xạ ngược của son khí phụ thuộc vào độ cao $R_{aer}(z)$ được định nghĩa như sau [61]:

$$R_{aer}(z) = 1 + \frac{\beta_{aer}(\lambda, z)}{\beta_{mol}(\lambda, z)} \quad (3.12)$$

Khi đó cường độ tín hiệu lidar hiệu dụng được xác định [61]:

$$P_{eff}(z) = P(z) \times [R_{aer}(z) \times \exp(-2\alpha_{aer}(\lambda, z))]^{-1} \times [\exp(-2\alpha_{O_3}(\lambda, z))]^{-1} \quad (3.13)$$

Hàm truyền qua son khí và ô dôn [61]:

$$T_{aer}(z) = \exp(-2\alpha_{aer}(\lambda, z)) \quad (3.14)$$

$$T_{O_3}(z) = \exp(-2\alpha_{O_3}(\lambda, z)) \quad (3.15)$$

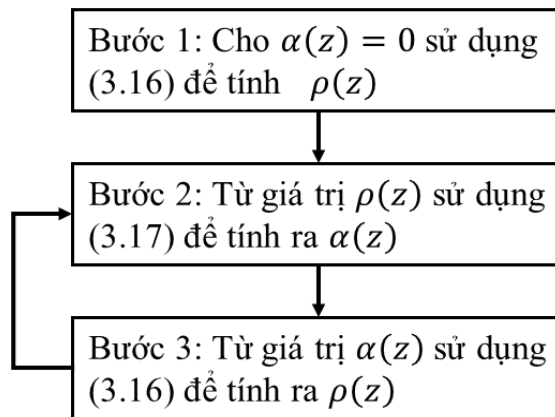
Mật độ phân tử khí quyển có thể được suy ra từ phương trình lidar sau khi chúng ta thay công thức hệ số tán xạ Rayleigh vào phương trình lidar (3.13) [61]:

$$\rho_{mol}(z) = C \times P_{eff}(z) \times z^2 \times [\exp(-2\alpha_{mol}(z))]^{-1} \quad (3.16)$$

Trong đó, C là hệ số chuẩn hóa, nó phụ thuộc các thông số của hệ lidar (thông số chùm laser, diện tích kính thiên văn, hiệu suất hệ lidar) và các thông số của khí quyển (loại tín hiệu được đo đạc, độ phân giải không gian và thời gian, sự xuất hiện của son khí và ô dôn). Vì trong công thức xác định C bao gồm cả hệ số suy hao của son khí, nên các tính toán để xác định mật độ và phân bố nhiệt độ bắt đầu được thực hiện ở những nơi không có son khí hoặc son khí không đáng kể. Trong khi C là chưa biết và không có đủ dữ kiện để xác định chính xác nên chúng ta chỉ có thể xác định phân bố mật độ phân tử tương đối được suy ra trực tiếp từ tín hiệu lidar. Để thu được phân bố mật độ phân tử tuyệt đối, C được xác định bằng cách chuẩn hóa $\rho_{mol}(z)$ với một giá trị mật độ tham khảo ở một độ cao chuẩn hóa z_{norm} nơi không có sự xuất hiện của son khí, C được tính theo phương trình [61]:

$$C = \rho_{mod}(z_{norm}) \times [P_{eff}(z_{norm}) \times z_{norm}^2]^{-1} \times \exp[-2\alpha_{mol}(z_{norm})] \quad (3.17)$$

Ở đây, $\rho_{mod}(z_{norm})$ là giá trị mật độ phân tử tham khảo ở một độ cao chuẩn hóa thu được từ phép đo thám không hoặc từ mô hình khí quyển. Hệ số suy hao phân tử α_{mol} trong phương trình (3.16) là chưa biết nhưng nó có thể được tính bằng phương pháp lặp dựa vào phương trình (3.16) và (3.17). Các biểu thức này áp dụng trong điều kiện tán xạ đàn hồi, không xét đến tán xạ Raman hay fluorescence. Ngoài ra, son khí cần phân bố ổn định trong vùng quan trắc, hệ số lidar ratio coi là không đổi theo độ cao hoặc đã được hiệu chỉnh từ quan trắc thực nghiệm. Hình 3.12 sơ đồ khối mô tả quá trình lặp để xác định mật độ phân tử.



Hình 3.12. Sơ đồ khối vòng lặp xác định mật độ phân tử.

Hình 3.12 mô tả sơ đồ khối thuật toán lặp nhằm xác định mật độ phân tử khí quyển $\rho_{mol}(z)$ từ tín hiệu lidar Rayleigh đã hiệu chỉnh. Thuật toán bao gồm ba bước chính:

Bước 1: Giả sử ban đầu $\alpha_{mol}(z) = 0$, sau đó tính $\rho_{mol}(z)$ từ phương trình (3.16).

Bước 2: Dựa vào giá trị $\rho_{mol}(z)$ vừa thu được, tính hệ số suy hao phân tử $\alpha_{mol}(z)$ theo phương trình (3.17).

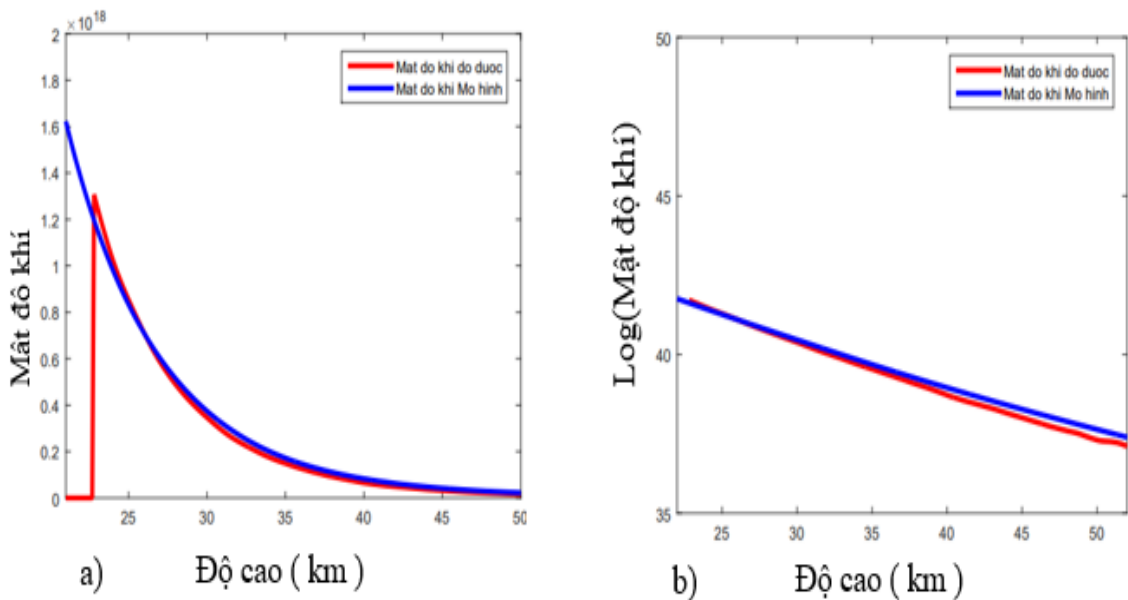
Bước 3: Sử dụng $\alpha_{mol}(z)$ cập nhật để tính lại $\rho_{mol}(z)$ bằng phương trình (3.16).

Hai bước cuối được lặp lại cho đến khi kết quả hội tụ, tức là giá trị của $\rho_{mol}(z)$ và $\alpha_{mol}(z)$ không thay đổi đáng kể giữa các vòng lặp. Sau khi đạt được kết quả ổn định, có thể sử dụng phương trình khí lý tưởng cùng cân bằng thủy tĩnh để xác định phân bố nhiệt độ khí quyển từ mật độ phân tử.

Phương pháp lặp này đã được áp dụng thực nghiệm cho các phép đo lidar Rayleigh tại Hà Nội. Các tín hiệu được thu thập ban đêm trong điều kiện quang mây có tỷ số tín hiệu trên nhiễu cao, cho phép thuật toán hội tụ nhanh chóng và chính xác. Trên thực tế, quá trình hội tụ thường đạt được sau 4–6 vòng lặp, khi sai số tương đối giữa hai vòng lặp kế tiếp của $\rho_{mol}(z)$ giảm xuống dưới 1% trên toàn miền độ cao.

Ngoài ra, việc làm mịn tín hiệu theo không gian và thời gian trước khi xử lý cũng giúp giảm nhiễu và tăng độ ổn định của kết quả. Sau khi xác định phân bố $\rho_{mol}(z)$, việc suy ra phân bố nhiệt độ từ lidar Rayleigh có thể đạt độ chính xác tương đương hoặc tốt hơn so với các phép đo radiosonde trong tầng bình lưu thấp [61, 63].

Phương pháp này phù hợp với các nghiên cứu trước đây sử dụng lidar Rayleigh để xác định nhiệt độ khí quyển từ tín hiệu đàn hồi như trong nghiên cứu của Hauchecorne và Chanin [62], hoặc của Leblanc et al. (2016) [61], và được xem là phương pháp chuẩn trong phân tích dữ liệu lidar khí quyển hiện nay.



Hình 3.13. Đường mật độ phân tử của phép đo lidar 23 h ngày 25 tháng 8 năm 2018 tại 18 Hoàng Quốc Việt- Nghĩa đô – Cầu giấy – Hà Nội.

Hình 3.13 trình bày so sánh giữa phân bố mật độ phân tử khí quyển thu được từ phép đo lidar Rayleigh và giá trị lý thuyết từ mô hình khí quyển MSISE-90. Phép đo được thực hiện lúc 23h ngày 25 tháng 8 năm 2018 tại địa điểm 18 Hoàng Quốc Việt

– Cầu Giấy – Hà Nội. Trong đó, Hình 3.13a thể hiện phân bố mật độ theo thang tuyến tính, còn hình 3.13b trình bày cùng dữ liệu nhưng theo thang logarit nhằm làm rõ hơn sự tương quan giữa hai đường trong các lớp khí quyển tầng cao.

Đường màu đỏ là kết quả đo thực nghiệm bằng hệ thống lidar Rayleigh sử dụng gương cầu đường kính 60 cm với thời gian tích lũy tín hiệu 10 phút. Đường màu xanh là phân bố mật độ khí theo mô hình MSISE-90 tại cùng vị trí và thời gian. Có thể thấy rằng trong phần lớn dải độ cao khảo sát từ 23 km đến 50 km, hai đường biểu diễn gần như trùng nhau, đặc biệt rõ trong hình 3.13b với thang logarit – điều này minh chứng cho độ tin cậy cao của hệ thống đo đạc và thuật toán xử lý dữ liệu lidar đã áp dụng.

Tuy nhiên, một sai khác nhỏ được ghi nhận trong khoảng độ cao từ 23 km đến 26 km, khi đường mật độ khí đo được cao hơn một chút so với mô hình. Ngược lại, ở độ cao lớn hơn 26 km, mô hình MSISE-90 cho kết quả hơi cao hơn so với lidar. Sai khác này có thể lý giải bằng một số nguyên nhân: (i) mô hình khí quyển MSISE-90 là mô hình trung bình theo thời gian và không gian nên không phản ánh hoàn toàn chính xác điều kiện thực tế tại thời điểm quan trắc; (ii) độ nhạy của lidar với sự thay đổi nhiệt độ và mật độ khí quyển ảnh hưởng đến giá trị suy ra, đặc biệt ở tầng cao nơi tín hiệu yếu hơn; và (iii) tác động của sai số hệ thống, như căn chỉnh optomechanical, hiệu chỉnh hấp thụ ozone và son khí vẫn tồn tại ở mức nhỏ nhưng không thể bỏ qua.

Việc hai đường gần như song song trên thang logarit từ 26 km đến 50 km khẳng định rằng độ dốc phân bố mật độ – vốn phản ánh trực tiếp phân bố nhiệt độ theo độ cao – là phù hợp giữa đo thực nghiệm và mô hình. Điều này chứng tỏ rằng các phương pháp xử lý dữ liệu đã triển khai, bao gồm hiệu chỉnh hấp thụ ô dôn, tán xạ của son khí, và thuật toán lặp xác định mật độ phân tử, hoạt động hiệu quả trong điều kiện đo thực tế. Sự khác biệt tại vùng cao (trên 50 km) chủ yếu do giảm tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR), vốn là giới hạn chung của phép đo lidar Rayleigh đàn hồi. Trong các nghiên cứu khác, ví dụ như Hauchecorne & Chanin (1980) [62] và Leblanc et al. (2016) [61], các nhóm tác giả cũng ghi nhận rằng ở độ cao lớn, SNR giảm nhanh khiến độ chính xác của mật độ khí và nhiệt độ bị ảnh hưởng rõ rệt.

Kết quả này cũng cho thấy tầm quan trọng của việc thực hiện các phép đo thực nghiệm để hiệu chỉnh và bổ sung cho mô hình khí quyển. Mô hình MSISE-90 mặc dù được sử dụng rộng rãi nhưng không phản ánh đầy đủ tính biến thiên thời gian – không gian tại từng khu vực cụ thể. Việc triển khai hệ thống lidar tại Hà Nội đã chứng minh tính khả thi trong việc cung cấp số liệu có độ phân giải cao về mật độ và nhiệt độ khí quyển, góp phần xây dựng bộ cơ sở dữ liệu thực nghiệm cho khu vực vĩ độ thấp. Những dữ liệu này có thể được dùng để đánh giá xu hướng thay đổi khí quyển trong bối cảnh biến đổi khí hậu hiện nay.

Do đó, cần mở rộng các chiến dịch đo đạc tương tự tại nhiều thời điểm và địa điểm khác nhau nhằm xây dựng các thống kê khí quyển đáng tin cậy và cập nhật cho các mô hình toàn cầu. Đồng thời, việc tối ưu hóa hệ thống thu phát, đặc biệt với các cấu hình gương cầu lớn và kỹ thuật gated-PMT, sẽ cho phép khảo sát đến các độ cao trên 60 km với thời gian tích lũy ngắn hơn, tăng cường khả năng nghiên cứu khí quyển tầng cao một cách chi tiết và thường xuyên hơn trong tương lai.

3.2.4. Sai số trong xác định nhiệt độ khí quyển từ các phép đo lidar

Sai số nhiệt độ trong phép đo nhiệt độ lidar tích hợp có thể bắt nguồn từ các nguồn khác nhau như: sai số do son khí, sự hấp thụ của ô dôn, nhiễu thống kê, nhiệt độ tham khảo đã chọn, sự hấp thụ của đám mây. Sai số do sự hấp thụ ô dôn ở tầng đối lưu phía trên là không đáng kể vì mật độ ô dôn ở tầng đối lưu rất nhỏ. Sai số xảy ra do việc lựa chọn nhiệt độ tham khảo $T(z_{ref})$ có thể được suy ra từ biểu thức [61, 64, 86]:

$$\Delta T(z) \approx \frac{\rho(z_{ref})}{\rho(z)} \Delta T(z_{ref}), \quad (3.18)$$

trong đó $\Delta T(z_{ref})$ là sai số của nhiệt độ tham chiếu. Hệ lidar của chúng tôi hoạt động ở chế độ đếm photon nên nhiễu photon tuân theo thống kê Poisson.

Sai số do nhiễu thống kê có thể được tính toán bằng phương trình:

$$\Delta T(z) \approx \frac{T(z)}{\sqrt{m \cdot P(\lambda_R, z)}}, \quad (3.19)$$

trong đó m là số xung laser, $P(\lambda_R, z)$ là số lượng photon tán xạ ngược từ phân tử nitơ. Từ phương trình 3.19 cho thấy chúng ta có thể giảm sai số nhiễu thống kê bằng cách tăng số lượng xung. Sai số nhiệt độ do sai số từ sự suy hao do son khí được tính theo phương trình:

$$\Delta T \leq T \left\{ \left[\frac{\Delta \exp(-\alpha^{aer}(\lambda_0, \lambda_R, z))}{\exp(-\alpha^{aer}(\lambda_0, \lambda_R, z))} \right]^2 \right\}. \quad (3.20)$$

Việc phân tích dữ liệu lidar Rayleigh để đánh giá phân bố nhiệt độ khí quyển đã được trình bày trong nhiều công trình trước đây, trong đó có phương pháp hiệu chỉnh sự suy hao tín hiệu do son khí ở tầng bình lưu thông qua kỹ thuật Fernald [88]. Tuy nhiên phương pháp Fernald cũng bị giới hạn bởi lớp son khí dày đặc, khi chùm ánh sáng laser truyền qua lớp son khí dày có các hạt rắn nó bị suy hao mạnh do đó số photon tán xạ ngược thu được ít làm hạn chế độ cao của tín hiệu thu được. Đặc biệt thời tiết ẩm và nhiều mây ở Hà Nội, chúng tôi gặp nhiều khó khăn thi đo lidar khảo

sát khí quyển tầng cao. Để thu được tín hiệu tốt ở khoảng cách xa các phép đo lidar cần thực hiện vào ban đêm, với điều kiện trời trong không có mây. Trong luận án này, toàn bộ chu trình xử lý dữ liệu lidar được áp dụng phương pháp hiệu chỉnh tín hiệu để tăng độ chính xác trong xác định phân bố nhiệt độ khí quyển. Sai số do son khí sau khi được hiệu chỉnh sẽ được cộng dồn vào sai số tổng gồm có sai số do nhiễu nền, sai số của thông số tham khảo, sai số do ô dôn của phép đo lidar. Quy trình xử lý dữ liệu được thiết kế dưới dạng vòng lặp ba bước nhằm loại bỏ ảnh hưởng của các thông số tham chiếu lên kết quả đo. Cụ thể:

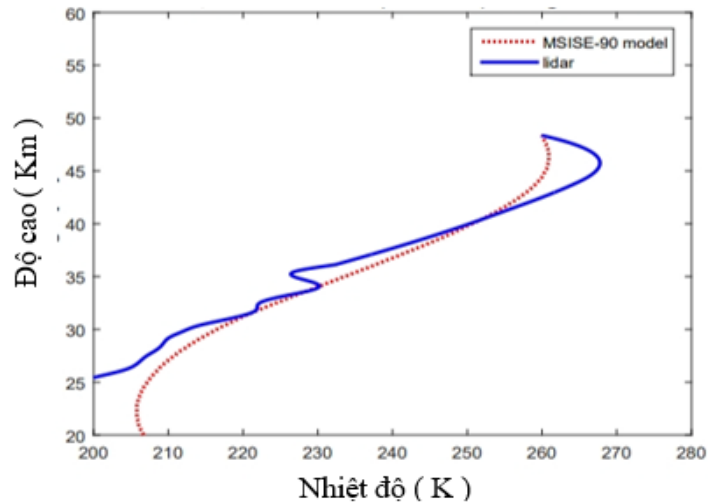
Bước 1: Sử dụng mô hình khí quyển MSISE-90 hoặc dữ liệu sóng vô tuyến làm giá trị tham chiếu để tính toán sơ bộ hệ số suy hao do son khí.

Bước 2: Từ hệ số suy hao trên, tiến hành xác định mật độ phân tử khí quyển bằng cách giải ngược từ tín hiệu lidar Rayleigh.

Bước 3: Sử dụng mật độ vừa xác định để tính lại hệ số suy hao và cập nhật thông số khí quyển. Hai bước cuối được lặp lại cho đến khi sự sai khác giữa hai lần lặp kế tiếp đạt ngưỡng hội tụ cho phép.

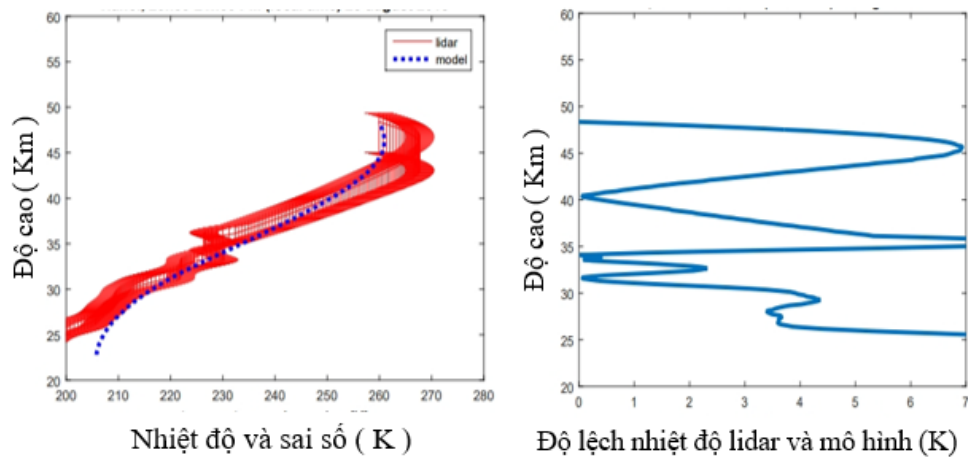
Một yếu tố cần lưu ý là: quá trình xác định mật độ phân tử khí quyển từ tín hiệu lidar đàn hồi luôn cần một giá trị tỉ số lidar tham chiếu. Giá trị này có thể là nguồn gây ra sai số hệ thống trong phân bố nhiệt độ. Tuy nhiên, nhờ việc áp dụng các kỹ thuật hiệu chỉnh hấp thụ bởi son khí và ô dôn, tín hiệu lidar hiệu dụng cuối cùng vẫn cho kết quả đáng tin cậy. Điều này đặc biệt hữu ích trong khảo sát khí quyển tầng trung lưu và tầng bình lưu, nơi mà mật độ son khí có thể ảnh hưởng đáng kể đến tín hiệu lidar. Phương pháp này không chỉ đảm bảo độ chính xác cao mà còn giúp tái cấu trúc toàn bộ hồ sơ nhiệt độ khí quyển từ dữ liệu lidar đàn hồi, góp phần quan trọng trong việc nghiên cứu động lực học và nhiệt học của khí quyển tầng cao [64, 88].

3.2.5. Phân bố nhiệt độ và sai số nhiệt độ của phép đo lidar khảo sát khí quyển tầng cao.



Hình 3.14. Tín hiệu lidar 20h50' ngày 28 tháng 8 năm 2018 tại 18 Hoàng Quốc Việt- Nghĩa đô – Cầu giấy – Hà Nội.

Sử dụng thuật toán như đã mô tả để tính toán nhiệt độ cho kết quả được biểu diễn trên hình 3.14.



Hình 3.15. Sai số và độ lệch nhiệt độ so với mô hình.

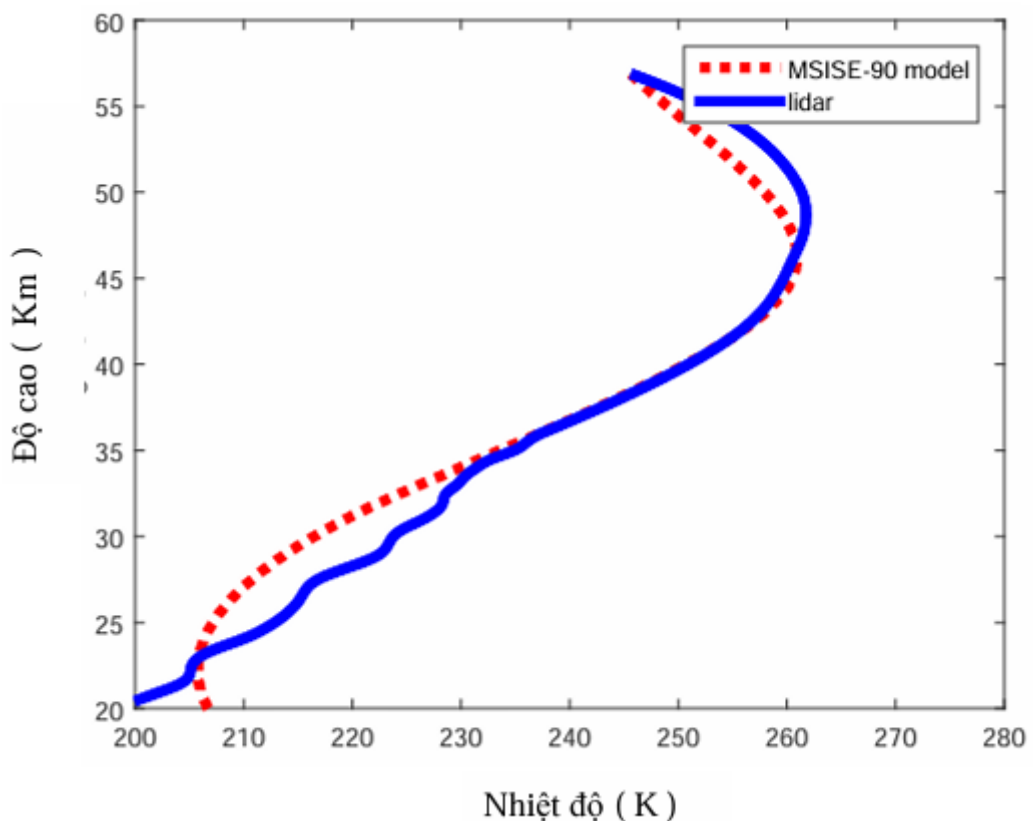
Phân bố nhiệt độ khí quyển thu được từ tín hiệu lidar tại Hà Nội vào thời gian từ 20h50' đến 21h50' ngày 28 tháng 8 năm 2018 được thể hiện trong hình 3.14. Điều kiện thời tiết ngày 28 tháng 8 năm 2018 khi chúng tôi tiến hành đo lidar tại Hà nội gió nhẹ, độ ẩm từ 60 - 95%, nhiệt độ thấp nhất từ: 26 - 28°C, nhiệt độ cao nhất từ: 31 - 33°C. Thời điểm chúng tôi tiến hành đo lidar trời quang, trong, ít mây do đó phép đo của chúng tôi thu được kết quả rất tốt lên đến độ cao trên 50 km.

Trong hình, đường màu xanh biểu diễn phân bố nhiệt độ được suy ra từ tín hiệu lidar đàn hồi sau khi hiệu chỉnh, còn đường nét chấm đỏ là phân bố nhiệt độ theo mô hình lý thuyết MSISE-90. Tín hiệu lidar thu được cho phép khảo sát nhiệt độ trong

miền độ cao từ 20 km đến 50 km, với chất lượng dữ liệu tốt. Dễ dàng nhận thấy hai đường phân bố nhiệt độ có sự tương đồng rõ rệt, đặc biệt trong khoảng từ 30 km đến 40 km, thể hiện tính chính xác của phép đo lidar.

Mặc dù có sự trùng khớp về xu hướng, nhưng phân bố nhiệt độ từ lidar có độ biến thiên lớn hơn so với mô hình. Nhiệt độ lớp bình lưu hạn theo mô hình MSISE-90 được ghi nhận ở độ cao khoảng 45 km với giá trị 261 K, trong khi phép đo lidar tại cùng độ cao ghi nhận nhiệt độ cao hơn, khoảng 268 K. Điều này cho thấy sự chênh lệch nhỏ nhưng đáng kể giữa quan trắc thực tế và mô hình lý thuyết.

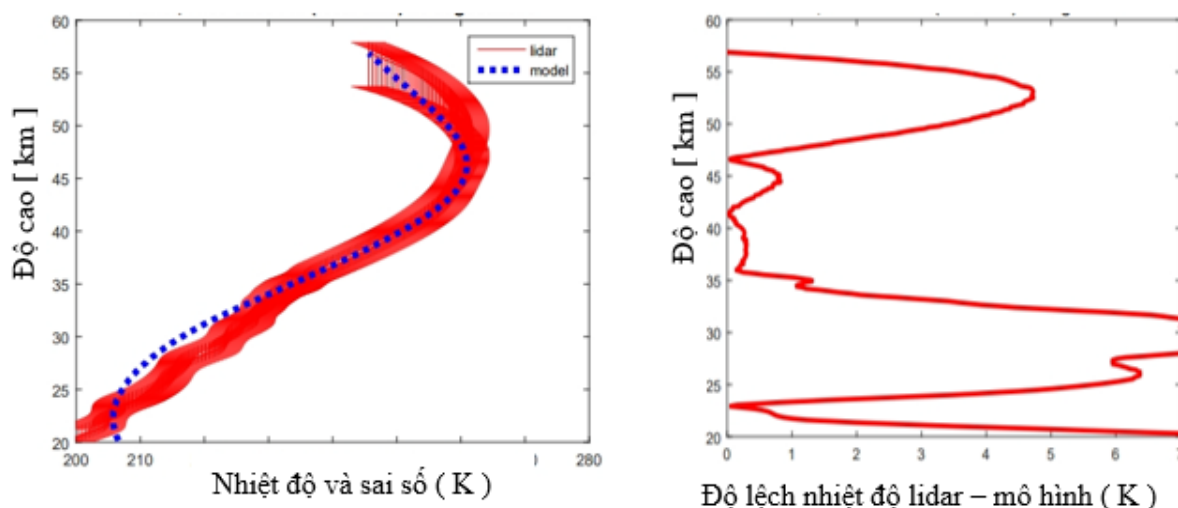
Để đánh giá chính xác hơn độ tin cậy của dữ liệu lidar, Hình 3.15 trình bày sai số đo nhiệt độ (trái) và độ lệch giữa nhiệt độ lidar và mô hình (phải). Độ lệch nhiệt độ lớn nhất lên tới 7 K xuất hiện tại độ cao khoảng 35 km và 45 km. Sự sai lệch này một phần do ảnh hưởng của son khí, ô dôn hoặc sai số hệ thống từ tỷ số lidar tham chiếu. Tuy nhiên, nhìn chung, sự phù hợp về xu hướng giữa hai đường là rất tốt, khẳng định khả năng áp dụng kỹ thuật lidar trong khảo sát phân bố nhiệt độ khí quyển tầng cao, phù hợp với các nghiên cứu trước đó như trong [88].



Hình 3.16. Tín hiệu lidar 21h00' ngày 5 tháng 12 năm 2018 tại 18 Hoàng Quốc Việt- Nghĩa đô – Cầu giấy – Hà nội. Phân bố nhiệt độ trong miền quan trắc từ 20 km tới 55 km, tín hiệu lidar là đường màu xanh, đường nét chấm là phân bố nhiệt độ theo mô hình lý thuyết MSISE-90.

Phân bố nhiệt độ khí quyển tầng cao được xác định từ tín hiệu lidar đo tại Hà Nội trong khoảng thời gian từ 21h00 đến 22h00 ngày 5 tháng 12 năm 2018, được thể hiện trong hình 3.16. Dữ liệu đo được được xử lý thông qua các bước hiệu chỉnh nhiễu, bù suy hao do hấp thụ của ô dôn và son khí, từ đó tín hiệu lidar hiệu dụng được sử dụng để tính toán phân bố nhiệt độ. Trong hình, đường màu xanh biểu diễn kết quả từ lidar, trong khi đường nét chấm màu đỏ thể hiện phân bố nhiệt độ tương ứng từ mô hình khí quyển MSISE-90.

Kết quả cho thấy sự tương đồng đáng kể giữa hai đường phân bố nhiệt độ, đặc biệt trong khoảng độ cao từ 35 km đến 45 km, nơi hai đường gần như trùng khớp. Vị trí lớp bình lưu hạn được xác định theo mô hình MSISE-90 tại độ cao 45 km với nhiệt độ khoảng 261 K, trong khi tín hiệu lidar xác định vị trí này cao hơn khoảng 5 km với giá trị nhiệt độ là 263 K. Sự khác biệt này phản ánh khả năng lidar có thể phát hiện chi tiết hơn về sự thay đổi cấu trúc nhiệt độ trong khí quyển tại khu vực khảo sát.



Hình 3.17. Tín hiệu lidar 21h00' ngày 5 tháng 12 năm 2018 tại 18 Hoàng Quốc Việt- Nghĩa đô – Cầu giấy – Hà nội, phân bố nhiệt độ và sai số.

Hình 3.17 tiếp tục làm rõ sai số và độ lệch nhiệt độ giữa kết quả đo từ lidar và mô hình lý thuyết MSISE-90. Hình bên trái thể hiện phân bố nhiệt độ lidar kèm theo dải sai số, còn hình bên phải thể hiện độ lệch tuyệt đối giữa hai kết quả. Sai lệch nhiệt độ lớn nhất ghi nhận khoảng 7 K tại độ cao 30 km và khoảng 5 K tại độ cao 54 km, trong khi vùng từ 35–47 km cho thấy sự phù hợp tốt với mô hình. Sai số 4 K ở độ cao 55 km được ghi nhận ở phía trên lớp phân tầng bình lưu hạn nơi nhiệt độ có xu hướng giảm tuyến tính, ít có sự thay đổi đột ngột. Chúng tôi có thể thay đổi độ phân giải không gian nhỏ hơn để có nhiều điểm ghi nhận số liệu, thời gian đo đủ dài trong điều kiện thời tiết trời trong, ít mây số liệu thu được tốt sai số của phép đo giảm hơn.

Sai khác về nhiệt độ có thể do ảnh hưởng của son khí, ô dôn, tham số độ cao tham khảo hoặc do đặc trưng nhiệt động không đồng nhất tại tầng bình lưu trong thời điểm đo. Để cải thiện độ chính xác của kết quả đo, trong quá trình xử lý tín hiệu chúng ta có thể chọn giá trị độ cao tham khảo phù hợp hơn, cần xét đến sự có mặt của các loại son khí khác ngoài ô dôn và có tính đến ảnh hưởng của nhiễu nền. Ngoài ra nếu nguồn laser được đầu tư tăng công suất, có thể thu được tín hiệu ở độ cao lớn hơn tuy nhiên việc thay đổi công suất nguồn laser thường đi kèm với việc mua nguồn laser với giá thành đắt hơn. Với hệ thu quang việc tăng kích thước kính thiên văn ở hệ thu để tăng số lượng photon thu được từ khoảng cách xa giải pháp nâng cấp hệ thu quang là khả thi nhất. Việc tăng kích thước kính thiên văn cũng tăng nhiễu từ môi trường, để hạn chế nhiễu từ môi trường chúng tôi sử dụng các kính lọc hiệu suất cao để loại bỏ các photon nhiễu nền. Về thực nghiệm nếu thực hiện được nhiều phép đo hơn nữa, số liệu đủ lớn để thống kê và lấy giá trị trung bình có thể cho kết quả tốt hơn, sai số nhỏ hơn.

Các nghiên cứu trước đây cũng ghi nhận các sai khác tương tự giữa dữ liệu lidar và mô hình lý thuyết. Chen và cộng sự [89] cho thấy rằng sai lệch giữa nhiệt độ từ lidar và mô hình có thể tăng đáng kể ở các tầng cao do ảnh hưởng của tán xạ và hấp thụ bởi son khí. Nghiên cứu của Nee et al. [90] cũng ghi nhận hiện tượng phân tầng nhiệt độ thay đổi theo thời gian và vị trí địa lý, đặc biệt tại các vùng có hoạt động đối lưu mạnh. Kết quả đo tại Hà Nội phù hợp với các nhận định này, đồng thời khẳng định tính khả thi và độ tin cậy của kỹ thuật lidar trong nghiên cứu phân bố nhiệt độ khí quyển tầng cao. Phân bố nhiệt độ trong tầng bình lưu là yếu tố then chốt để xác định vị trí lớp phân tầng bình lưu hạn – ranh giới phân chia giữa tầng bình lưu và tầng trung lưu trong khí quyển. Vùng chuyển tiếp này đặc trưng bởi sự đảo ngược xu hướng nhiệt độ: thay vì giảm theo độ cao như ở tầng đối lưu, nhiệt độ trong tầng bình lưu tăng dần với độ cao. Hiện tượng này chủ yếu là do quá trình hấp thụ bức xạ tử ngoại của Mặt Trời bởi các phân tử ô dôn, dẫn đến sự gia tăng nhiệt độ tại các lớp khí quyển có mật độ ô dôn cao [88].

Việc xác định chính xác vị trí và nhiệt độ của lớp phân tầng bình lưu hạn không chỉ cung cấp thông tin về cấu trúc nhiệt động của khí quyển, mà còn cho phép suy đoán gián tiếp sự phân bố của ô dôn trong vùng quan trắc. Kết quả khảo sát tại Hà Nội bằng hệ lidar khẩu độ thu lớn cho thấy lớp phân tầng bình lưu hạn nằm ở độ cao khoảng 49,8 km, với nhiệt độ tương ứng là 270,6 K. So sánh với kết quả từ mô hình khí quyển MSISE-90 cho cùng thời điểm, lớp phân tầng bình lưu hạn được mô hình dự đoán ở độ cao 45,5 km với nhiệt độ khoảng 260,8 K. Sự khác biệt khoảng 4,3 km về độ cao và 9,8 K về nhiệt độ phản ánh ảnh hưởng của các điều kiện địa phương,

cũng như sự biến động thực tế của khí quyển so với mô hình trung bình toàn cầu.

Để đánh giá tính hợp lý của kết quả, chúng tôi đã so sánh vị trí lớp phân tầng bình lưu hạn thu được tại Hà Nội với các phép đo lidar được thực hiện tại các địa điểm khác trên thế giới. Kết quả đo tại trạm lidar đặt tại Guru Shikhar, Mount Abu, Ấn Độ ($24^{\circ}39'17,34''\text{N}$; $72^{\circ}46'45,18''\text{E}$), được báo cáo bởi Das et al. [91], cho thấy độ cao trung bình của lớp phân tầng bình lưu hạn là 48 km với độ lệch chuẩn khoảng $\pm 1,7$ km. Như vậy, độ cao lớp phân tầng bình lưu hạn tại Hà Nội là hoàn toàn tương đương trong sai số cho phép, củng cố độ tin cậy của phép đo.

Ngoài ra, nhờ việc sử dụng hệ thu quang có khẩu độ lớn (gương cầu đường kính 60 cm), hệ lidar Rayleigh tại Hà Nội đã thu được tín hiệu có chất lượng cao lên tới độ cao 60 km – vượt ngưỡng tối thiểu thường gặp ở các hệ thống lidar tiêu chuẩn. Kết quả đo không chỉ thể hiện sự tương thích với mô hình lý thuyết, mà còn phù hợp với dữ liệu lidar từ các nghiên cứu quốc tế trước đó, như được chỉ ra bởi Chen et al. [89], Nee et al. [90] và Das et al. [91]. Những so sánh này không chỉ góp phần xác thực dữ liệu thu được tại Hà Nội, mà còn chứng minh tính hiệu quả và độ chính xác của hệ lidar trong nghiên cứu khí quyển tầng cao tại khu vực vĩ độ thấp.

Với hệ lidar gương cầu mạ nhôm phản xạ tốt các bức xạ tử ngoại, chúng tôi có thể tiến hành khảo sát ô dôn tầng đối lưu đến tầng thấp của tầng bình lưu. Việc khảo sát ô dôn cũng cần nguồn laser tử ngoại, nhóm sẽ kết hợp với các nhóm nghiên cứu khác để phát triển nguồn laser tử ngoại khảo sát ô dôn từ tầng thấp đến tầng cao của khí quyển. Việc nâng cấp hệ lidar với gương cầu kích thước lớn có thể được phát triển theo hướng sử dụng đồng thời nhiều gương quang học cùng lúc, với việc dùng sợi quang để truyền dẫn và kết hợp các tín hiệu thu được từ hệ gương. Hướng nghiên cứu nâng cấp hệ lidar sử dụng nhiều gương quang học rất khả thi vì chúng tôi có thể chủ động trong việc chế tạo các gương quang học có kích thước khác nhau tùy thuộc vào yêu cầu của nội dung nghiên cứu.

Với hệ lidar gương cầu kích thước lớn, được bổ sung thêm nguồn laser có thể sử dụng để khảo sát ở nhiều địa điểm trên cả nước, các số liệu có thể kết hợp với các kênh từ vệ tinh để có số liệu thực cùng với thời điểm tiến hành thu tín hiệu lidar. Trong quá trình chọn lọc số liệu, chúng tôi có thể sử dụng các phần mềm, các công cụ trí tuệ nhân tạo để loại bỏ các tệp số liệu có chất lượng không tốt. Với các tệp số liệu đã được chọn, chúng tôi có thể so sánh trực tiếp với số liệu từ vệ tinh, các số liệu có sai số quá lớn cũng được loại bỏ. Để đánh giá số liệu thu được từ hệ lidar của chúng tôi, ngoài việc so sánh với mô hình, với dữ liệu từ vệ tinh, chúng tôi cũng có thể kết hợp với các nhóm nghiên cứu khác ở Nhật bản, Trung quốc, Nga ... để trao đổi, chia sẻ và học hỏi các nội dung nghiên cứu vật lý khí quyển.

3.3. Kết luận chương 3

Chương 3 Chúng tôi tập trung xử lý số liệu từ phép đo lidar để từ đó có thể suy ra các thông số động học của khí quyển: Phân bố nhiệt độ và đặc điểm của đối tượng mây ti, độ cao của đám mây, độ dày hình học, độ sâu quang học, tỉ số lidar.

Phần đầu là kết quả khảo sát được đối tượng mây Ti bằng hệ lidar sử dụng kính quang học loại Schmidt-Cassegrain có đường kính 25 cm và tiêu cự 2,5 m. Kết quả nghiên cứu của nhóm thu được khi khảo sát về đối tượng mây ti, độ cao các đám mây Ti tại Hà nội phân bố chủ yếu từ 6,7 km đến 18,0 km với độ cao trung bình 14,0 km. Độ dày hình học mây Ti trong khoảng 0,2 km đến 7 km, với giá trị trung bình $2,3 \pm 1,2$ km. Kết quả của chúng tôi cho thấy các đám mây Ti xuất hiện ở Việt Nam với độ dày gần như tương tự với các nghiên cứu khác trên thế giới nhưng trong một phạm vi lớn hơn về độ cao. Nhóm nghiên cứu chúng tôi cũng thu được độ sâu quang học trung bình của mây Ti là $0,32 \pm 0,22$ và tỷ số lidar trung bình 30 ± 18 cho các đám mây Ti được phát hiện trong thời gian đo đạc.

Phần cuối là các kết quả khảo sát sử dụng hệ lidar đã được nâng cấp bộ thu quang học gương cầu khẩu độ lớn. Các phép đo đã thu được tín hiệu đàn hồi từ khí quyển tầng cao, đường tín hiệu đạt tới độ cao trên 50 km. Đường tín hiệu lidar thu được phù hợp với đường mô phỏng MSISE-90. Với số liệu đo được chúng tôi đã xác định được phân bố nhiệt độ khí quyển đến độ cao 60 km. Kết quả của chúng tôi phù hợp với các nghiên cứu khác trên thế giới và cũng phù hợp với mô hình khí quyển MSISE-90.

KẾT LUẬN

Luận án đã tập trung nghiên cứu toàn diện và hệ thống về thiết kế, phát triển và ứng dụng hệ thống lidar sử dụng bộ thu quang học có khẩu độ lớn nhằm khảo sát khí quyển tầng cao tại khu vực Hà Nội. Nghiên cứu này không chỉ góp phần làm sáng tỏ cấu trúc và đặc điểm của khí quyển trên lãnh thổ Việt Nam, mà còn thể hiện bước tiến đáng kể trong việc làm chủ công nghệ quan trắc hiện đại bằng lidar – một công nghệ tiên tiến đang được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực khí tượng, khí hậu và môi trường.

Về mặt lý thuyết, luận án đã trình bày được cơ sở khoa học vững chắc cho toàn bộ quá trình nghiên cứu. Các hiện tượng vật lý nền tảng như tán xạ Rayleigh và tán xạ Mie đã được trình bày và phân tích đầy đủ, trong đó chú trọng đến cơ chế tương tác của ánh sáng laser với các thành phần khí quyển như phân tử khí, son khí và các loại mây, đặc biệt là mây tầng cao. Trên cơ sở các mô hình lý thuyết chuẩn về lidar, các phương trình ngược đã được triển khai và hiệu chỉnh bằng kỹ thuật xử lý tín hiệu hiện đại, cho phép truy hồi chính xác các thông số vật lý của khí quyển. Phương pháp hiệu chỉnh tín hiệu lidar theo mô hình hồi tiếp cũng đã được áp dụng hiệu quả để loại bỏ ảnh hưởng của son khí và ô dôn, từ đó nâng cao độ tin cậy khi xác định hệ số suy hao, hệ số tán xạ ngược và mật độ phân tử khí.

Về mặt kỹ thuật, một đóng góp nổi bật của luận án là việc thiết kế, chế tạo và kiểm chuẩn thành công bộ thu quang học sử dụng gương cầu đường kính 60 cm – đánh dấu bước phát triển mới trong năng lực nghiên cứu và chế tạo thiết bị quang học trong nước. Quá trình chế tạo gương được thực hiện với độ chính xác cao qua nhiều công đoạn phức tạp, từ mài thô đến đánh bóng siêu mịn, sử dụng các vật liệu và thiết bị chuyên dụng. Kết quả đo kiểm bằng các phương pháp quang học cho thấy bề mặt gương đạt độ sai lệch dưới $0,5\ \mu\text{m}$ và tiêu cự đạt yêu cầu thiết kế, hoàn toàn đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật khắt khe trong ứng dụng lidar.

Luận án cũng đã phát triển mô hình mô phỏng truyền tín hiệu lidar trong khí quyển dựa trên kỹ thuật Ray-tracing, cho phép phân tích chi tiết quá trình suy hao tín hiệu và ảnh hưởng của các yếu tố khí quyển thực tế như mật độ son khí, tầng mây hoặc biến động lớp khí. Mô hình này không chỉ hỗ trợ đánh giá hiệu năng hệ thống mà còn là công cụ hữu hiệu để tối ưu hóa thời gian đo và độ cao cực đại có thể quan trắc được.

Các chiến dịch đo đạc thực nghiệm được tiến hành tại Hà Nội đã xác nhận tính hiệu quả và độ ổn định của hệ thống lidar phát triển. Hệ thống cho phép thu tín hiệu rõ ràng đến độ cao 55–60 km với thời gian đo ngắn, phản ánh năng lực vượt trội so với các hệ thống trước đó. Trên cơ sở dữ liệu đo được, luận án đã phân tích đặc trưng

vật lý của mây tầng cao như độ cao đáy, độ cao đỉnh, độ dày hình học, độ sâu quang học và tỉ số lidar. Các giá trị thu được phù hợp với đặc điểm của mây ti ở vùng nhiệt đới và cho thấy tính tương thích cao khi so sánh với các nghiên cứu trên thế giới.

Ngoài ra, tín hiệu Rayleigh được sử dụng để truy hồi phân bố nhiệt độ khí quyển tầng cao. Kết quả cho thấy sự tương hợp tốt giữa nhiệt độ đo từ lidar và mô hình khí quyển chuẩn trong khoảng độ cao từ 25 đến 45 km, với độ sai lệch không vượt quá ± 7 K. Đặc biệt, luận án đã xác định được vị trí lớp phân tầng bình lưu hạn tại khu vực Hà Nội, khẳng định độ tin cậy của hệ thống và quy trình xử lý dữ liệu.

Tổng thể, luận án đã hoàn thành toàn bộ các mục tiêu nghiên cứu đặt ra. Những đóng góp chính bao gồm: (1) phát triển hệ thống lidar sử dụng bộ thu quang học có khẩu độ lớn đầu tiên tại Việt Nam; (2) chế tạo thành công gương cầu đường kính 60 cm với chất lượng cao; (3) xây dựng quy trình hiệu chỉnh và xử lý tín hiệu lidar toàn diện, từ mô hình hóa đến hiệu chỉnh ảnh hưởng khí quyển; (4) đo đạc và phân tích các thông số đặc trưng của mây tầng cao và nhiệt độ khí quyển tầng giữa – tầng thượng; và (5) đánh giá độ tin cậy của hệ lidar thông qua so sánh với mô hình khí quyển chuẩn và các kết quả quốc tế.

Các kết quả của luận án không chỉ có giá trị khoa học mà còn mang tiềm năng ứng dụng thực tiễn rộng rãi, góp phần xây dựng hệ thống quan trắc khí quyển tự động, phục vụ dự báo thời tiết, nghiên cứu khí hậu và đánh giá tác động của biến đổi khí hậu tại Việt Nam.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

Tạp chí SCI-E

1. Hai V. Bui, Manh D. Le, Trung V. Dinh, Tuan X. Nguyen, Tien M. Pham, Hung N. Tran, **Bang D. Pham**, Bao T. T. Nguyen, Binh T. Nguyen, Hung D. Nguyen, *Optical and geometrical properties of cirrus clouds from lidar measurements above Hanoi, Vietnam*, **J. Appl. Remote Sens.** 13(3), 034523 (2019).

Tạp chí quốc gia

2. Dinh-V-Trung, Bui Van Hai, Nguyen Thi Thanh Bao, **Pham Dong Bang**, Vu Thi Kim Oanh, Nguyen Xuan Tu, Phung Viet Tiep, Pham Hong Minh and Nguyen Gia Cuong, *Development of Multi-axis Differential Optical Absorption Spectroscopy System and its application in measuring atmospheric NO₂ volume mixing ratio in Hanoi*, **Communications in Physics**, Vol. 32, No.4 (2022).

Kỷ yếu Hội nghị quốc gia, quốc tế

3. Bùi Văn Hải. Nguyễn Thanh Hải. Đặng Hải Ninh. Phạm Minh Tiến. **Phạm Đồng Bằng**, Đinh Văn Trung, *Sử dụng kỹ thuật lidar rayleigh với kính thiên văn newton khẩu độ lớn xác định phân bố nhiệt độ lớp khí quyển tới 60 km*, **Advances in Applied and Engineering Physics - CAEP V**, ISBN: 978-604-913-232-2(2018).
 4. B. V. Hải¹, D. V. Trung , **P. D. Bằng**, T. N. Hung, N. T. T. Bảo, P. M. Tiến, N. T. Điện, L. T. Sơn, N. V. Thiệu, T. V. Sửu, B. H. Thái, H. V. Thanh, *Xác định đặc trưng vật lý lớp son khí trường gần bằng kỹ thuật chụp ảnh lidar*, **Advances in Applied and Engineering Physics - CAEP VI**, ISBN: 978-604-9985-13-3 310(2020).
 5. Bùi Văn Hải, Nguyễn Tuấn Linh , Đinh Văn Trung, Dương Tiến Thọ, **Phạm Đồng Bằng**, Trần Ngọc Hưng , Nguyễn Thị Thanh Bảo , Phạm Minh Tiến, *Xác định hàm chồng chập của hệ lidar bằng phương pháp thực nghiệm*, **Advances in Optics, Photonics, Spectroscopy & Applications XI**, ISBN: 978-604-9988-20-2(2021).
 6. Bùi Văn Hải, Nguyễn Tuấn Linh, Đinh Văn Trung, Dương Tiến Thọ, **Phạm Đồng Bằng**, Trần Ngọc Hưng, Nguyễn Thị Thanh Bảo, Phạm Minh Tiến, *Phát triển phương pháp chụp ảnh phản xạ đo kiểm bề mặt gương phi cầu khẩu độ lớn*, **Advances in Optics, Photonics, Spectroscopy & Applications XI**, ISBN: 978-604-9988-20-2 (2021).
-

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Finlayson-Pitts, B.J., & Pitts Jr., J.N., 2019, *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*, Academic Press.
2. Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 2016, *Atmospheric Chemistry and Physics (3rd ed.)*, Wiley.
3. IPCC, 2014, *Climate Change 2014: Synthesis Report*, IPCC, Geneva, Switzerland.
4. WMO, 2020, *State of the Global Climate 2020*, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
5. Shepherd, T.G., 2020, *Middle Atmosphere Dynamics*, Cambridge University Press.
6. Kärcher, B., 2017, *Cirrus Clouds and Their Response to Anthropogenic Activities*, Current Climate Change Reports, 3(1), pp. 45-57.
7. Petty, G.W., 2021, *A First Course in Atmospheric Radiation*, Sundog Publishing.
8. Wallace, J.M., Hobbs, P.V., 2023, *Atmospheric Science: An Introductory Survey (3rd ed.)*, Academic Press.
9. Schumann, U., 2021, *Atmospheric Physics*, Springer.
10. Zhi liu et al., 2019, preliminary studies on atmospheric monitoring by employing a portable unmanned mie-scattering scheimpflug lidar system, remote sensing, № 7, p. 837 , doi: 10.3390/RS11070837.
11. Weitkamp, C. (Ed.), 2005, *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, Springer, New York.
12. Anna Moustaka et al., 2024, *Assessing Lidar Ratio Impact on CALIPSO Retrievals Utilized for the Estimation of Aerosol SW Radiative Effects across North Africa, the Middle East, and Europe*, Remote Sens, 16, 1689. <https://doi.org/10.3390/rs16101689>.
13. Wandinger, U., 2005, *Introduction to Lidar*, Springer Series in Optical Sciences, 102, pp. 1-18.
14. Bok H. Baek et al., 2023, *Dynamic Meteorology-induced Emissions Coupler (MetEmis) development in the Community Multiscale Air Quality (CMAQ): CMAQ-MetEmis* , Geosci. Model Dev, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-4659-2023> .
15. Rogers et al., 2020, *A universal 3D imaging sensor on a silicon photonics*

- platform*, arXiv preprint, arXiv:2008.02411.
16. Chen zeyu et al. , 2022, *advances in the researches of the middle and upper atmosphere in china in 2020–2022*, chinese journal of space science, 2022, 42(4): 684-711 doi: 10.11728/cjss2022.04.yg20 .
 17. Li, Z.P., Wang, L.J., Huang, L.F., Guo, X., 2021, *Single-photon imaging over 200 km*, arXiv preprint, arXiv:2103.05860.
 18. Fukui, T., Koyama, Y., Yamaguchi, K., 2021, *Non-redundant optical phased array*, arXiv preprint, arXiv:2108.09665.
 19. Gibert, F., Drobinski, P., Saïd, F., Mallet, M., Totems, J., 2022, *A wind, temperature, H₂O and CO₂ scanning lidar mobile observatory for a 3D thermodynamic view of the atmosphere*, arXiv preprint, arXiv:2211.08765.
 20. Nguyễn Xuân Anh, Lê Như Quân, 2008, *Nghiên cứu ứng dụng Lidar trong nghiên cứu mây Ci*, Tuyển tập các công trình nghiên cứu Viện Vật lý Địa cầu, 15(3), pp. 225-231.
 21. Bùi Văn Hải, 2014, *Sử dụng kỹ thuật Lidar nghiên cứu đặc trưng vật lý của sol khí trong tầng khí quyển*, Luận án tiến sĩ, Viện Vật lý, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Hà Nội.
 22. Nguyễn Xuân Tuấn, 2017, *Nghiên cứu và phát triển kỹ thuật lidar ứng dụng khảo sát phân bố nhiệt độ và mật độ khí quyển*, Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.
 23. Phạm Minh Tiên, 2017, *Nghiên cứu phân bố khí ozone trong khí quyển tầng thấp với độ phân giải cao trên cơ sở phát triển và ứng dụng phương pháp lidar hấp thụ vi sai*, Luận án tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.
 24. Phạm Thị Lan, Nguyễn Minh Hải, 2017, *Ứng dụng kỹ thuật Lidar trong nghiên cứu khí quyển tại vùng ven biển Việt Nam*, Tạp chí Khí tượng Thủy văn, 684(12), tr. 14-20.
 25. Stephanie Fiedler , 2023, *Interactions between atmospheric composition and climate change - Progress in understanding and future opportunities from AerChemMIP, PDRMIP, and RFMIP* , Geoscientific Model Development, <https://doi.org/10.5194/gmd-17-2387-2024>.
 26. Jacobson, M.Z., 2020, *Fundamentals of Atmospheric Modeling* (3rd ed.), Cambridge University Press, Cambridge.
 27. ZHANG H, ZHANG F, LIU L, et al, 2024, *Advances in Atmospheric Radiation: Theories, Models, and Their Applications. Part II: Radiative Transfer Models and Related Applications*. Journal of Meteorological Research, 38(2): 183-

208. <https://doi.org/10.1007/s13351-024-3089-y>.
28. J. T. Emmert et al., 2020, *NRLMSIS 2.0: A Whole-Atmosphere Empirical Model of Temperature and Neutral Species Densities*, Earth and Space Science, <https://doi.org/10.1029/2020EA001321>.
 29. Andrews, L.C., Phillips, R.L., 2005, *Laser Beam Propagation through Random Media (2nd ed.)*, SPIE Press, Bellingham.
 30. Kärcher, B., 2017, *Cirrus Clouds and Their Response to Anthropogenic Activities*, Current Climate Change Reports, 3(1), pp. 45–57.
 31. World Meteorological Organization (WMO), 2017, *International Cloud Atlas – Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors (WMO-No. 407)*, WMO, Geneva.
 32. Khain, A.P., Pinsky, M.B., 2018, *Physical Processes in Clouds and Cloud Modeling*, Cambridge University Press, Cambridge.
 33. Petty, G.W., 2006, *A First Course in Atmospheric Radiation (2nd ed.)*, Sundog Publishing, Madison.
 34. W.B. Rossow, 2024, *Evolution of the concept of cloud-climate feedbacks*, Journal of the European Meteorological Society, doi.org/10.1016/j.jemets.2024.
 35. Wylie, D.P., Jackson, D.L., Menzel, W.P., Bates, J.J., 2005, *Trends in global cloud cover in two decades of HIRS observations*, Journal of Climate, 18(15), pp. 3021–3031.
 36. Sassen, K., Wang, Z., 2008, *Classifying clouds around the globe with the CloudSat and CALIPSO datasets*, Geophysical Research Letters, 35(5), L05805.
 37. Wei-Ting Hsiao and Eric D. Maloney, 2024, *The Longwave Cloud-Radiative Feedback in Tropical Waves Derived by Different Precipitation Data Sets*, Geophysical Research Letters, <https://doi.org/10.1029/2024GL109143>.
 38. IPCC, 2021, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press.
 39. Winker, D.M. et al., 2010, *The CALIPSO mission: A global 3D view of aerosols and clouds*, Bulletin of the American Meteorological Society, 91(9), pp. 1211–1229.
 40. Boucher, O. et al., 2013, *Clouds and Aerosols*, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press.

41. Holton, J.R., 2004, *An Introduction to Dynamic Meteorology (4th ed.)*, Academic Press, San Diego
42. Vincenzo Levizzani and Elsa Cattani, 2019, *Satellite Remote Sensing of Precipitation and the Terrestrial Water Cycle in a Changing Climate*, Remote Sens, doi:10.3390/rs11192301.
43. WMO, 2018, *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8)*, World Meteorological Organization, Geneva.
44. Yuyang Song, Yang He and Hongze Leng, 2024, *Analysis of Atmospheric Elements in Near Space Based on Meteorological-Rocket Soundings over the East China Sea*, Remote Sens. 2024, 16, 402. <https://doi.org/10.3390/rs16020402>.
45. Urs Germann et al., 2022, *Weather Radar in Complex Orography*, Remote Sens, <https://doi.org/10.3390/rs14030503>.
46. Müller, D., Ansmann, A., Mattis, I., Wandinger, U., 2001, *Retrieval of physical particle properties from lidar observations of extinction and backscatter at multiple wavelengths*, *Applied Optics*, 40(27), pp. 4863–4869.
47. Lan-Hui Sun et al, 2021, *The Use of Superspheroids as Surrogates for Modeling Electromagnetic Wave Scattering by Ice Crystals*, Remote Sens, <https://doi.org/10.3390/rs13091733>.
48. Petty, G.W., 2021, *A First Course in Atmospheric Radiation (3rd ed.)*, Sundog Publishing, Madison.
49. Finlayson-Pitts, B.J., & Pitts Jr., J.N., 2019, *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*, Academic Press.
50. IPCC, 2018, *Global Warming of 1.5°C – An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels*, World Meteorological Organization, Geneva.
51. Mishchenko, M.I. et al., 2006, *Multiple Scattering of Light by Particles*, Cambridge University Press.
52. Wandinger, U., 2005, *Introduction to Lidar*, Springer.
53. Ferrare, R. A., Schmid, B., 1999, *Elastic Lidar and Sunphotometer Measurements of Aerosol Optical Properties and Profiles of Humidity and Temperature*, in: *Aerosol Remote Sensing*, Springer, Berlin.
54. Lange, et al., V. (2019), *Compact operational tropospheric water vapor and temperature Raman lidar with turbulence resolution*, *Geophysical Research Letters*, <https://doi.org/10.1029/2019GL085774>

55. Mishchenko, M.I., Travis, L.D., 2008, *Multiple Scattering of Light by Particles*, 2nd ed., Cambridge Univ. Press.
56. Brian J. Carroll et al., 2022, *Differential absorption lidar measurements of water vapor by the High Altitude Lidar Observatory (HALO): retrieval framework and first results*, Atmos. Meas. Tech., doi.org/10.5194/amt-15-605-2022 .
57. Wandinger, U., 2021, *Lidar: Fundamentals and Applications*,
58. IPCC, 2021, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, Cambridge Univ. Press.
59. Klett, J.D., 1981, *Stable analytical inversion solution for processing lidar returns*, *Applied Optics*, 20(2), pp. 211–220.
60. Liang peng et al., 2021, *Optical properties of aerosol and cloud particles measured by a single-line-extracted pure rotational Raman lidar*, *Optics Express* 21947, <https://doi.org/10.1364/OE.427864>
61. Leblanc, T. et al., 2016, *Temperature profiling from ground-based Rayleigh lidar measurements*, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(12), pp. 2485–2500.
62. Weibo Zhao et al., 2022, *Atmospheric Gravity Wave Potential Energy Observed by Rayleigh Lidar above Jiuquan (40 N, 95 E), China*, *Atmosphere* 2022, 13, 1098. <https://doi.org/10.3390/atmos13071098> .
63. J. T. Emmert et al., 2022, *NRLMSIS 2.1: An Empirical Model of Nitric Oxide Incorporated Into MSIS*, *Earth and Space Science*, <https://doi.org/10.1029/2022JA030896>
64. Kovalev, V.A., 2015, *Lidar: Principles, Types and Applications*, Nova Science Publishers, New York.
65. Kovalev, V.A. & Eichinger, W.E., 2004, *Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods*, Wiley.
66. Robin Wing. et al., 2018, *Lidar temperature series in the middle atmosphere as a reference data set. Part B: Assessment of temperature observations from MLS/Aura and SABER/TIMED satellites*, Atmos. Meas. Tech. Discuss., <https://doi.org/10.5194/amt-2018-139>.
67. Yuan, T. et al., 2011, *Large-Aperture Lidar Receiver for Middle and Upper Atmospheric Temperature Measurements*, *Applied Optics*, 50(22), pp. 4403–4412.

68. Yasui, R., Nakamura, T., Tsuda, T., 2016, *Vertical propagation of gravity waves in the upper stratosphere and lower mesosphere observed with Rayleigh–Raman lidar at Syowa Station*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(22), pp. 13457–13471.
69. Springer, 2005, *Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, Springer series in optical sciences, ISSN 0342-4111; 102, pp. 3–6.
70. Quantel (France), *Brilliant Nd:YAG Laser System – User Manual and Technical Specifications*.
71. Thorlabs Inc., *FL532-3: 532 nm Bandpass Filter, 3 nm FWHM – Technical Datasheet*.
72. Hamamatsu Photonics, 2007, *Photomultiplier Tubes: Basics and Applications* (3rd ed.), Hamamatsu Corporation, Japan.
73. Pico Technology, 2020, *PicoScope 5000 and 4000 Series Datasheets*, Pico Technology Ltd., UK.
74. Wilfried Damen et al, 2022, *Topologically optimized cast glass: a new design approach for loadbearing monolithic glass components of reduced annealing time*, *Glass Struct. Eng.*, 267–291 <https://doi.org/10.1007/s40940-022-00181-1>.
75. Pedrotti, F.L., Pedrotti, L.S., 2017, *Introduction to Optics*, 3rd ed., Cambridge University Press.
76. Josephine Munro, 2023, *Characterising Dynamic Aberrations for Ground-Based Optical Telescopes*, The Australian National University.
77. Rakic, A.D., et al., 1998, *Optical properties of metallic films*, *Applied Optics*.
78. Eloranta, E.W., 2005, *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, Lecture Notes, University of Wisconsin-Madison.
79. Wandinger, U., 2021, *Lidar Techniques and Data Analysis*, Springer.
80. Eloranta, E.W., 1998, *Practical Model for the Calculation of Lidar Overlap Function*, Lidar Technical Notes, University of Wisconsin-Madison.
81. Adolfo Comerón et al , 2023, *An explicit formulation for the retrieval of the overlap function in an elastic and Raman aerosol lidar* , *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 3015–3025, <https://doi.org/10.5194/amt-16-3015-2023>, 2023.
82. Freudenthaler, V., 2016, *About the Effect of the Overlap Function on Lidar Signal Calibration*, *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(9), pp. 4181–4198.
83. Eloranta, E.W., 2005, *Lecture Notes on Lidar*, University of Wisconsin.

84. Giannakaki, E., Balis, D. S., Amiridis, V., Zanis, P., Kazadzis, S., 2007, *Optical and geometrical characteristics of cirrus clouds over a lidar station in Greece*, Atmospheric Chemistry and Physics, 7(21), pp. 5519–5527.
85. Jin, Y., Liu, D., Wang, Z., et al., 2015, *A new method to detect cloud boundaries from lidar data*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 153, pp. 37–47.
86. Lakkis, S. G., Cavallaro, E., Blanco, V. C., et al., 2009, *Properties of midlatitude cirrus clouds from ground-based lidar and radiosonde observations*, Journal of Geophysical Research, 114(D4), D04204.
87. Mao, J., Zhang, Z., Wang, D., 2020, *Cloud base and top detection using a variance-based lidar method*, Remote Sensing, 12(1), 95.
88. Freudenthaler, V., 2016, *Effect of Overlap Function on Lidar Calibration*, AMT.
89. Chen, W.-N., Chiang, C.-W., Nee, J.-B., 2002, *Lidar ratio and extinction-to-backscatter ratio retrieval from ground-based lidar measurements*, Applied Optics, 41(30), pp. 6470–6476.
90. Nee, J.-B., Huang, H.-C., Chen, W.-N., 2007, *Lidar observations of the vertical structure and evolution of midlatitude cirrus clouds*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112(D13), D13207.
91. Das, S.S., Pandithurai, G., Dipu, S., Dani, K.K., 2010, *Estimation of cirrus cloud optical depth using ground-based lidar over a tropical station in India*, Annales Geophysicae, 28(3), pp. 859–867.
92. Sunilkumar, S.V., Pandithurai, G., Raj, P.E., 2008, *Characteristics of high-altitude cirrus clouds over a tropical site in India using lidar*, Journal of Geophysical Research, 113(D13), D13208.
93. Seifert, P., Ansmann, A., Müller, D., et al., 2007, *Cirrus optical depth and lidar ratio retrieved from EARLINET: Statistical results for the period 2000 to 2003*, Journal of Geophysical Research, 112(D13), D13202.
94. Masaru Kogure et al, 2016, *Rayleigh/Raman lidar observations of gravity wave activity from 15 to 70 km altitude over Syowa (69°S, 40°E), the Antarctic*, J. Geophys. Res. Atmos., 122, doi:10.1002/2016JD026360.
95. Huang et al, 2019, *Evaluating Himawari-8 Cloud Products Using Shipborne and CALIPSO Observations: Cloud-Top Height and Cloud-Top Temperature*, journal of atmospheric and oceanic technology, volume 36, 2235, doi: 10.1175/jtech-d-18-0231.1.

96. Michael Gerding et al, 2024, *The Doppler wind, temperature, and aerosol RMR lidar system at Kühlungsborn, Germany– Part 1: Technical specifications and capabilities*, Atmos. Meas. Tech., 17, 2789–2809, doi.org/10.5194/amt-17-2789-2024.
 97. Robin Wing et al, 2018, *Lidar temperature series in the middle atmosphere as a reference data set– Part 1: Improved retrievals and a 20-year cross-validation of two co-located French lidars*, Atmos. Meas. Tech., 11, 5531–5547, doi.org/10.5194/amt-11-5531-2018.
 98. XuZou et al, 2021, *Rayleigh Lidar Observations and Comparisons with TIMED/SABER of Typical Case Studies in Beijing (40.5 N, 116.2 E), China*, Atmosphere 2021, 12, 1237. <https://doi.org/10.3390/atmos12101237>.
 99. <https://www.astrosysteme.com/products/asa600/>.
 100. Kenneth Sassen et al. , 2008, *Global distribution of cirrus clouds from CloudSat/Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) measurements*, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 113, D00A12, doi:10.1029/2008JD009972, 2008.
-