

**BỘ GIÁO DỤC  
VÀ ĐÀO TẠO**

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

**HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ**

---



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

**PHẠM ĐỒNG BẰNG**

Chuyên ngành: Quang học

Mã số: 9440110

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT**

Hà Nội - 2025

**Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.**

**Người hướng dẫn khoa học:**

**PGS. TS. Đinh Văn Trung, Viện Vật lý**

**PGS. TS. Phạm Hồng Minh, Viện Vật lý**

**Phản biện 1:**

**Phản biện 2:**

**Phản biện 3:**

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án tiến sĩ họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Vào hồi ..... giờ, ngày.....tháng.....năm .....

**Có thể tìm hiểu luận án tại:**

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- Thư viện Viện Vật lý

## MỞ ĐẦU

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].

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 tiến sĩ của mình.

**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.

### ***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. Phần kết quả này chúng tôi thực hiện trên hệ lidar có bộ thu là kính quang học loại Schmidt-Cassegrain.

Phần 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**

### **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...

#### ***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.

### **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.

### **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.

## **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].

### **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).

### **1.2.3. Tán xạ Mie**

Khi kích thước của sol khí tiếp cận với bước sóng của bức xạ tới, hiện tượng tán xạ sẽ thay đổi rất nhiều. Lý thuyết tán xạ Mie được sử dụng để mô tả sự tán xạ của sol khí trong trường hợp này.

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

Nhiệt độ khí quyển có thể được tính từ đặc điểm phân tử khí quyển dựa trên giả thiết về trạng thái cân bằng thủy tĩnh và định luật khí lý tưởng bằng phương trình tích phân phương trình thủy tĩnh theo độ cao.

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

### **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.

## **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.

### 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.

### 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.

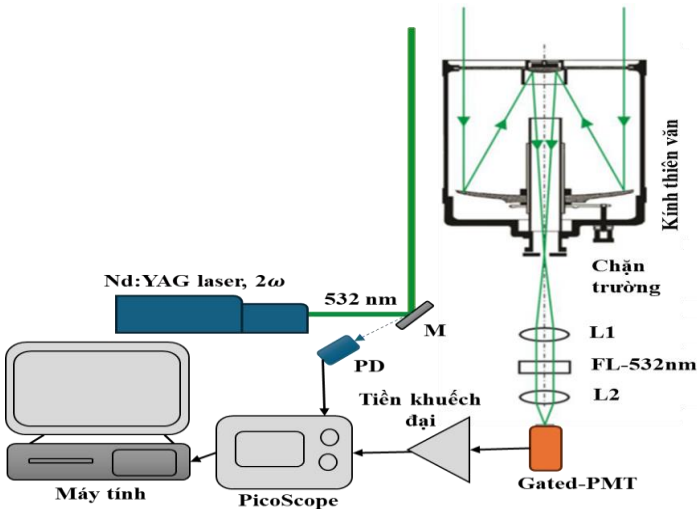
## CHƯƠNG 2 NGHIÊN CỨU VÀ PHÁT TRIỂN HỆ LIDAR KHẨU ĐỘ THU LỚN

### 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.

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

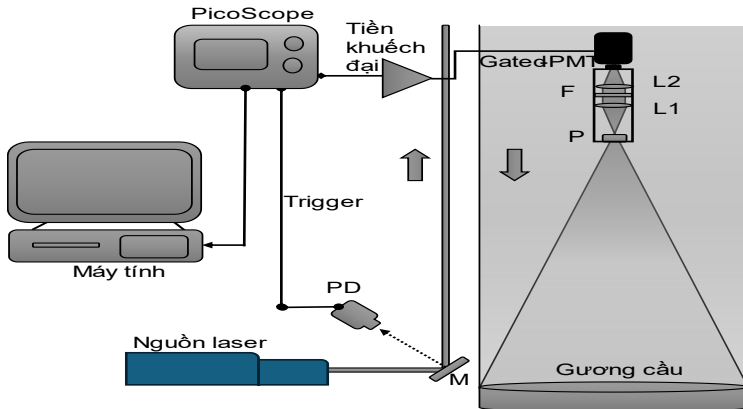


Hình 2.1. Cấu hình hệ đo lidar đàn hồi 1 kênh sử dụng kính thiên văn Schmidt-Cassegrain đã được phát triển tại Viện Vật Lý [22].

Hình vẽ 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 Tí tâng cao.



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



Hình 2.2. 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 2.2.

## 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.

### **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.

### **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.

### **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.

## **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**

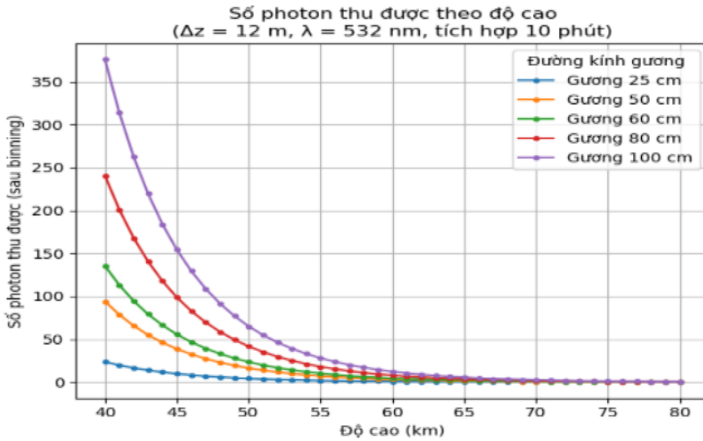
Để thiết kế và xây dựng một hệ lidar khảo sát khí quyển hiệu quả, việc xác định các thông số tối ưu, đặc biệt là đường kính gương thu, đóng vai trò quan trọng.

#### **2.3.1.1. Mô hình lý thuyết**

*Phương trình tín hiệu lidar Rayleigh:*

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

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

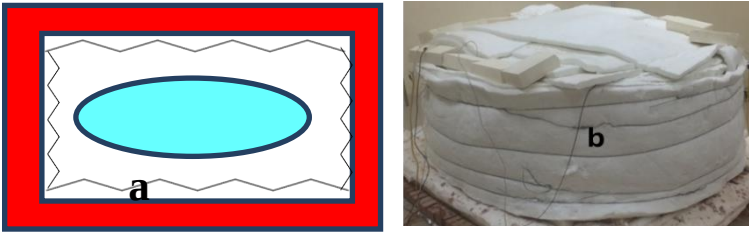


Hình 2.3. Biểu diễn số photon thu được của hệ lidar ở các độ cao khác nhau khi sử dụng bộ thu quang học gương cầu có đường kính từ 25 đến 100 cm.

Trên đồ thị 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.

### 2.3.2. Chế tạo gương cầu

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.

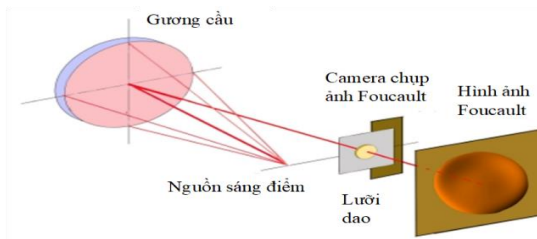


Hình 2.4. Lò nung sử dụng điện: a) Mô hình lò nung; b) Lò nung thực tế.

### 2.3.3. Đánh giá biên dạng bề mặt gương cầu

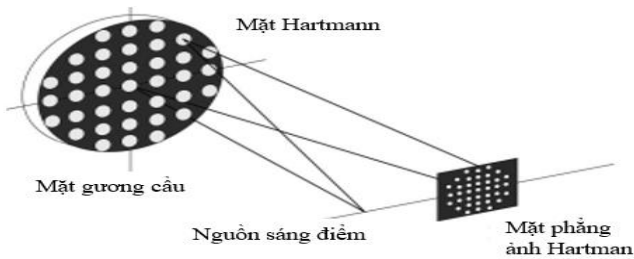
#### *Phương pháp Foucault*

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].



Hình 2.5. Sơ đồ nguyên lý phương pháp Foucault kiểm tra bề mặt gương cầu [76].

#### *Phương pháp Hartmann*



Hình 2.6. 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.

### ***Mạ nhôm bề mặt phản xạ gương cầu***

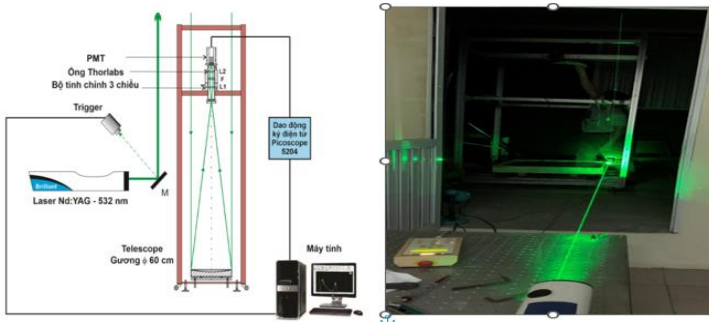
Hệ số phản xạ của gương cầu mạ nhôm phụ thuộc vào bước sóng của ánh sáng mà nó phản chiếu [77]. Gương cầu mạ nhôm có khả năng phản xạ tốt, đặc biệt trong vùng ánh sáng khả kiến, một phần của vùng tia cực tím (UV) và vùng hồng ngoại (IR). Hệ số phản xạ của nhôm trong vùng ánh sáng khả kiến có bước sóng từ 400 nm đến 700 nm thường dao động từ 85% đến 90%.



Hình 2.7. Gương cầu đường kính 60 cm sau khi mạ nhôm.

## 2.4. Đánh giá hệ lidar khẩu độ thu lớn

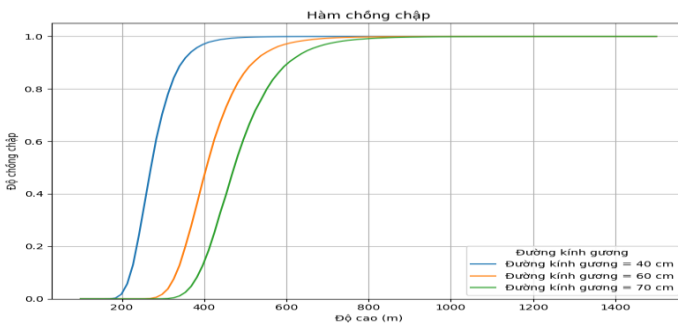
### 2.4.1. Lắp đặt hệ lidar khẩu độ thu lớn



Hình 2.8. Sơ đồ thiết kế và hệ lidar thực tế với gương cầu đường kính 60 cm.

### 2.4.2. Mô phỏng quá trình thu tín hiệu lidar

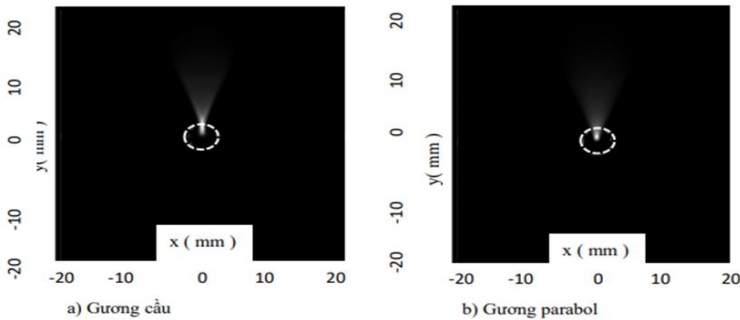
Các tính toán và mô phỏng được thực hiện với thông số của hệ đã thiết kế đường kính gương 60 cm, tiêu cự 1,8 m. Kết quả mô phỏng Hình 2.9 cho thấy trong cả hai trường hợp, hàm chồng chập overlap có đặc tính gần như tương tự nhau: bắt đầu ở 0 ở độ cao thấp, sau đó tăng dần đến 1 ở độ cao trên 800 m.



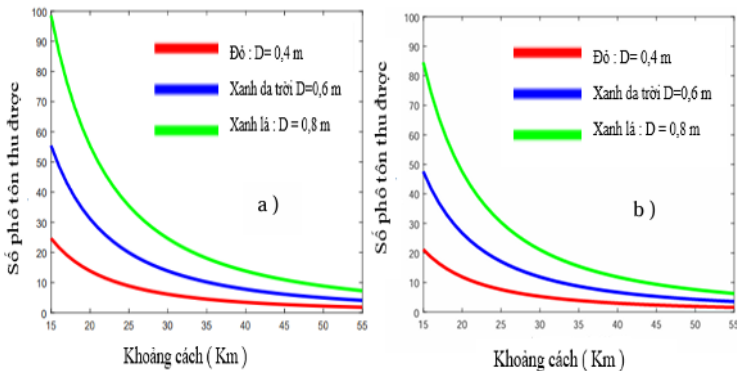
Hình 2.9. Hàm chồng chập.

Kết quả mô phỏng hình ảnh cường độ sáng thu được tại mặt phẳng tiêu được thể hiện ở hình 2.10a và hình 2.10b. 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 có thể nằm ở thuộc tính phản xạ của mặt gương.



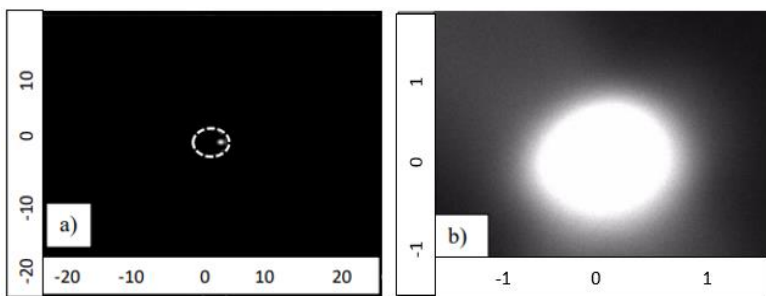
Hình 2.10. Kết quả mô phỏng hình ảnh thu được tại mặt phẳng tiêu trở lên của a) gương cầu và b) gương parabol, đường tròn biểu diễn cho pinhole chặn trường.



Hình 2.11. 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 vẽ mô phỏng số photon thu được theo khoảng cách từ tâm tán xạ đến hệ thu lidar. Số photon thu được tỉ lệ thuận với diện tích kính quang học là gương cầu. Chúng tôi mô phỏng tính toán số photon thu được với các kính quang học có đường kính lần lượt là 0,4 m; 0,6 m; 0,8 m.

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



Hình 2.12. Ảnh mặt cắt tia laser thu ở mặt phẳng cách mặt phẳng tiêu cự 1 mm.

## **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**

### **3.1. Khảo sát mây Ti tại Hà Nội**

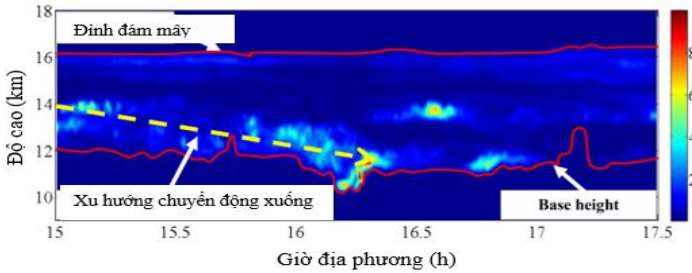
#### **3.1.1. Cơ sở vật lý xác định các thông số mây Ti**

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]:

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

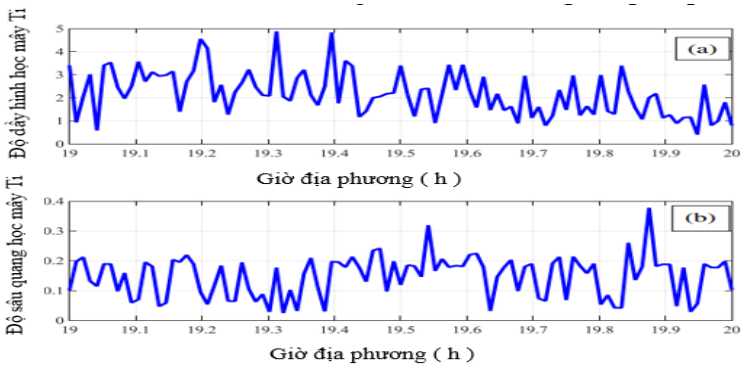
#### **3.1.2. Độ cao đám mây Ti**

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.



Hình 3.1. 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.

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

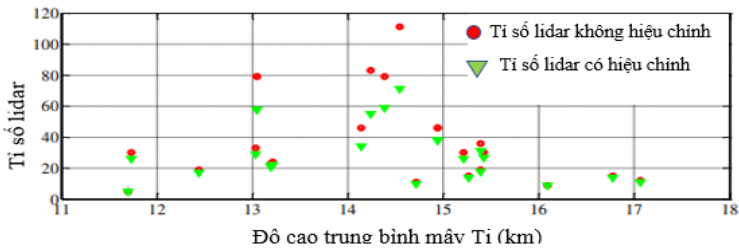


Hình 3.2. (a) Sự thay đổi theo thời gian thực của độ dày hình học của mây Ti (b) sự thay đổi theo thời gian của độ sâu quang học mây Ti thu được từ cùng một dữ liệu .

### 3.1.4. Tỷ số lidar của mây Ti

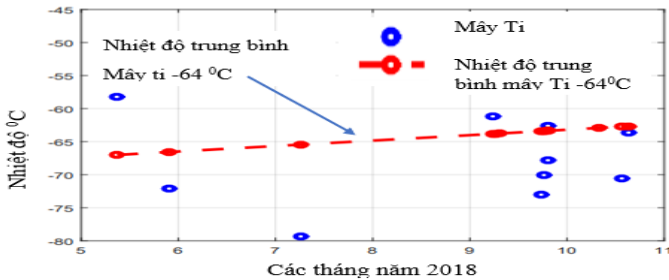
Dựa trên dữ liệu lidar thu được, chúng tôi đã xác định tỉ số lidar cho một số trường hợp đám mây Ti. Giá trị trung bình của tỉ số lidar đo được là  $30 \pm 18$ , nằm trong khoảng biến thiên

tương đối lớn, phản ánh sự khác biệt đáng kể giữa các đám mây quan sát được.



Hình 3.3. Tỉ số lidar không hiệu chỉnh và có hiệu chỉnh theo chiều cao trung bình đám mây của các đám mây Ti.

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

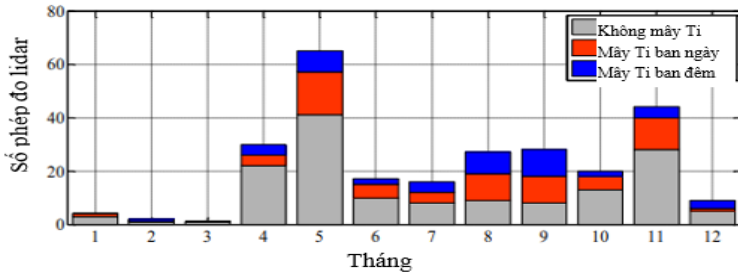


Hình 3.4. Kết quả khảo sát nhiệt độ của mây Ti năm 2018.

Hình vẽ 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.

### 3.1.6. Thống kê phép đo lidar khảo sát mây Ti

Những thống kê định lượng như vậy không chỉ cung cấp cái nhìn tổng thể về tần suất xuất hiện của mây Ti.

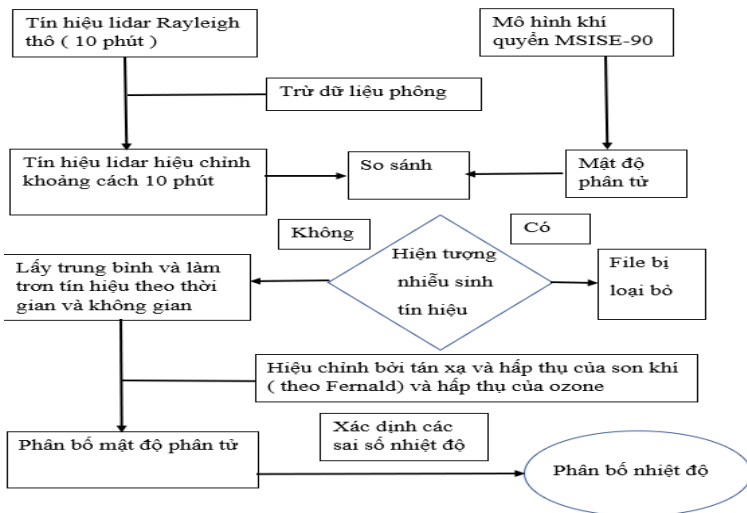


Hình 3.5. Biểu đồ thống kê về số lần xuất hiện của các lớp Ti và tổng số các phép đo lidar từ năm 2011 đến năm 2017.

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

#### 3.2.1. Thuật giải xác định phân bố nhiệt độ

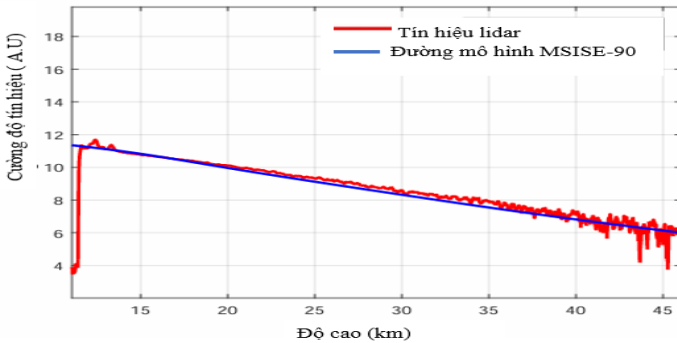
Với các tín hiệu đạt yêu cầu, chúng tôi tiến hành làm mượt tín hiệu theo thời gian và không gian bằng cách trung bình 20 điểm theo thang logarit.



Hình 3.6. Sơ đồ khối thuật giải nhiệt độ.

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

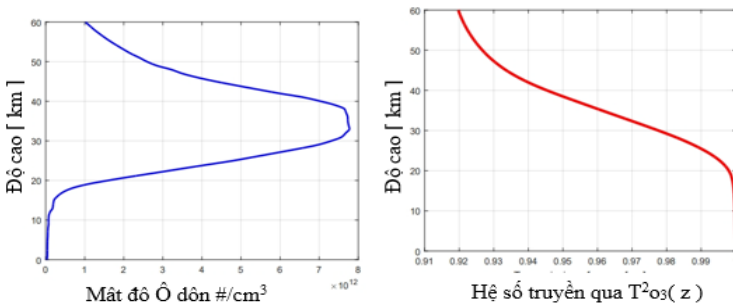
Tín hiệu thu được đã chứng minh rằng hệ thống lidar hiện tại có thể cung cấp tín hiệu ổn định và chính xác đến độ cao khoảng 40–45 km.



Hình 3.7. Tín hiệu lidar 22h ngày / 25 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 bằng cách lấy tín hiệu lidar đo được chia cho hệ số truyền qua khí ô dôn.



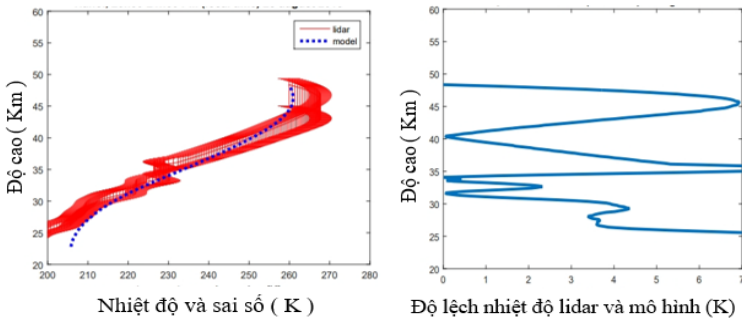
Hình 3.8. Mật độ khí ô dôn và quá trình truyền qua khí ô dôn với đường truyền một vòng đi và về hệ thu lidar.

### 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.

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

Sử dụng thuật toán như đã mô tả để tính toán nhiệt độ cho kết quả được biểu diễn trên hình 3.9.



Hình 3.9. Sai số và độ lệch nhiệt độ so với mô hình.

## 3.3. Kết luận chương 3

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  $30 \pm 18$  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 CỦA LUẬN ÁN

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  $\pm 7$  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.

## CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

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).
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 NO<sub>2</sub> volume mixing ratio in Hanoi*, **Communications in Physics**, Vol. 32, No.4 (2022).

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. Hải<sup>1</sup>, D. V. Trung , **P. D. Bằng**, T. N. Hưng, N. T. T. Bảo, P. M. Tiến, N. T. Điện, L. T. Sơn, N. V. Thiệu, T. V. Sứ, 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).