

Nghiên cứu thiết kế, chế tạo và thử nghiệm hệ LIDAR VF

Bùi Thị Thanh Lan*

Trường Đại học Mở - Địa chất

Ngày nhận bài 27.11.2014, ngày chuyển phản biện 3.12.2014, ngày nhận phản biện 6.1.2015, ngày chấp nhận đăng 12.1.2015

Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu chính của đề tài theo nghị định thư hợp tác khoa học giữa Việt Nam và Pháp “Nghiên cứu phát triển và ứng dụng phương pháp laser LIDAR trong môi trường sol khí mỏ than” (mã số 14/2011/HĐ-NDT). Sản phẩm chính của đề tài là hệ LIDAR VF tán xạ đàn hồi đo lưu động, sử dụng phương pháp đo Killet-Fernald kết hợp với hai chùm tia và quy trình đo LIDAR lưu động. Thiết bị này đã được thử nghiệm tại khu vực mỏ than Núi Béo (Quảng Ninh). Ứng dụng phương pháp xử lý số liệu, đề tài đã xác định được hệ số tán xạ ngược.

Từ khóa: hệ số tán xạ ngược, laser LIDAR, LIDAR, phương pháp hai chùm tia, phương pháp Killet-Fernald.

Chỉ số phân loại 1.3

STUDY ON DESIGNING, SETTING AND TESTING THE LIDAR VF

Summary

This paper presents the main results of the protocol project between Vietnam and France “Development and application of LIDAR method in the coal mining aerosol medium” (code 14/2011/HD-NDT). The main product of the project is the LIDAR VF system for outside measurement, using Killet-Fernald method combined with two-stream method and outside measurement process. This LIDAR system has been tested at Nui Beo coal mine in Ha Long city, Quang Ninh province. The backscattering coefficient has been found by applying the data analysis method.

Keywords: backscattering coefficient, Killet-Fernald method, laser LIDAR, LIDAR, two-stream method.

Classification number 1.3

Đặt vấn đề

Sol khí bao gồm bụi và các khí có tác động trực tiếp và gián tiếp lên trữ lượng bức xạ của trái đất và khí hậu. Tác động trực tiếp là các sol khí phân tán và hấp thụ các tia xạ bức xạ mặt trời trong không gian. Tác động gián tiếp là khi sol khí ở tầng thấp của khí quyển có thể làm thay đổi kích cỡ của các phần tử mây, làm thay đổi phản xạ và hấp thụ bức xạ mặt trời của mây, và như vậy tác động lên trữ lượng năng lượng của trái đất. Nhiễm bẩn khí quyển còn là tác nhân gây nên nhiễm bẩn nguồn nước thông qua quá trình giáng thủy.

Công nghệ LIDAR được dùng để khảo sát và đóng góp số liệu nhằm đánh giá tác động của sol khí đối với quá trình biến đổi khí hậu. LIDAR (Light Detection And Ranging) là một thuật ngữ để chỉ một công nghệ đo viễn thám chủ động, ứng dụng công nghệ laser và các tiến bộ khoa học và công nghệ (KH&CN). Sau khi xung laser LIDAR kích thích các sol khí và bụi, có một phần bức xạ laser tán xạ ngược trở lại hệ LIDAR. Các photon tán xạ ngược này được thu, xử lý và phân tích bởi các thiết bị và phần mềm chuyên dụng để xác định các thông số đặc trưng tương tác laser môi trường và các đặc trưng môi trường [1, 2].

Vì hệ LIDAR cần tránh các dao động nên các trạm LIDAR thường được lắp đặt và hiệu chỉnh rất cẩn thận tại một vị trí. Tuy nhiên, khi chưa có mạng lưới LIDAR cố định thì công tác đo LIDAR lưu động có một nhiệm vụ cấp thiết để khảo sát bụi tại khu vực mỏ than Quảng Ninh. Đó cũng là nội dung chính của đề tài theo Nghị định thư giữa Việt Nam và Pháp “Nghiên cứu phát triển và ứng dụng phương pháp laser LIDAR trong môi trường sol khí mỏ than”. Việc triển khai đề tài do Trường Đại học Mở - Địa chất kết hợp với Viện Vật lý (Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam) thực hiện đã thu được kết quả tốt.

*Tel: 0912300633; Email: thanhlan.hn@gmail.com

Nội dung nghiên cứu

Đề tài có 2 nội dung nghiên cứu chính là nghiên cứu chế tạo hệ LIDAR VF đo lưu động và phương pháp đo hệ LIDAR VF. Đề phù hợp với nhiệm vụ đo lưu động, hệ LIDAR VF được thiết kế thành các modul có thể lắp đặt nhanh mà vẫn đảm bảo độ chính xác. Modul quang được thiết kế theo nguyên lý nhận tín hiệu trực tiếp để giảm các suy hao do đường dẫn truyền. Kết nối các modul quang và điện cần đáp ứng nguyên lý tín hiệu quang được đưa trực tiếp vào các detector.

Nguyên lý và yêu cầu thiết kế hệ LIDAR VF

Các hệ LIDAR sẽ thu nhận tín hiệu tán xạ ngược (góc tán xạ bằng 180°). Giữa tín hiệu thu và tín hiệu phát được liên hệ thông qua phương trình LIDAR. Phương trình LIDAR biểu diễn sự phụ thuộc của công suất P theo khoảng cách R và bước sóng λ như sau [3, 4]:

$$P(R, \lambda) = P_0 \cdot \frac{c\tau}{2} \cdot A\eta \frac{1}{R^2} \beta(R, \lambda) \exp\left[-2 \int_0^R \mu(r, \lambda) dr\right] \quad (1)$$

Trong đó :

- $\mu(r, \lambda)$ và $\beta(r, \lambda)$ lần lượt là hệ số suy giảm và hệ số tán xạ ngược.

- Hệ số LIDAR được tính theo công thức:

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

Với P_0 là công suất trung bình của máy; c là tốc độ laser; τ là thời gian xung; A là tiết diện thấu kính (bộ thu); η là hiệu suất hệ thống.

- Thông số hình học: $G(R) = O(R)/R^2 = 1/R^2$

Với R là khoảng cách từ nguồn phát laser tới đối tượng nghiên cứu; $O(R)$ là hàm overlap: $0 \leq O(R) \leq 1$; nếu $O(R) = 0$ thì không có tín hiệu hay không thu được tín hiệu, $O(R) = 1$ thu được tín hiệu rõ nét nhất, khi giải phương trình thường giả thiết cho $O(R) = 1$ để phương trình đơn giản hơn.

Hai hệ số đầu hoàn toàn được xác định bởi việc thiết lập LIDAR và có thể điều khiển được bởi nhà chế tạo thiết bị; hai hệ số sau phản ánh các tính chất của

môi trường sol khí, thông tin về khí quyển. Qua nghiên cứu khảo sát thiết kế các LIDAR tán xạ đàn hồi của Pháp, Ba Lan và các hệ LIDAR đã được chế tạo trong nước, đề tài đã lên phương án thiết kế hệ LIDAR VF theo các modul, có thể tháo lắp đơn giản và nhanh gọn để thực hành đo ở Quảng Ninh.

Hệ LIDAR VF tán xạ đàn hồi của Trường Đại học Mỏ - Địa chất được thiết kế với các nội dung yêu cầu sau: đo tín hiệu LIDAR tán xạ Mie do sol khí với mật độ thấp tại 2 bước sóng 532 nm và 1064 nm; khoảng cách đo là 8 km trong điều kiện thời tiết thuận lợi nhằm xác định các thông số đặc trưng của môi trường như tỷ số LIDAR, hệ số tán xạ ngược, hệ số suy giảm, mật độ tập trung sol khí; laser có dạng xung, tần số lặp lại cao, công suất lớn, độ rộng xung ngắn; thu được tín hiệu tán xạ ngược đàn hồi với độ nhạy cao, loại trừ nhiễu tốt; thiết kế vững chắc, đồng thời có độ linh hoạt cao, dễ dàng tháo lắp, di chuyển và sử dụng.

Xác định hằng số LIDAR bằng phương pháp hai chùm tia

Trong phương trình LIDAR, hằng số LIDAR được định nghĩa bằng công thức (1), trong đó η là hiệu suất của toàn bộ hệ thống. Nó bao gồm hiệu suất quang học của tất cả phần tử truyền qua và thu nhận ánh sáng.

Như trên đã thấy, trong quá trình chế tạo hệ LIDAR cần có phương pháp tối ưu hằng số LIDAR. Để xác định hằng số LIDAR, đề tài sử dụng phương pháp hai chùm tia. Từ thập kỷ 80 của thế kỷ XX, Kunz (1987), Hughes và Paulson (1988) đã nghiên cứu phát triển kỹ thuật hai chùm tia dùng cho LIDAR [3]. Kỹ thuật này đã giải quyết được tồn tại của phương pháp Raman thường là không tìm được đồng thời hệ số suy giảm và tán xạ ngược trong một phương trình LIDAR. LIDAR sol khí UltraViolet Aeroporte (LAUVA) được phát triển tại CEA/CNRS của Pháp là loại LIDAR an toàn cho mắt người sử dụng, với bước sóng 355 nm, là một trong các thiết bị để triển khai phương pháp hai chùm tia. Nó có thể đặt trên máy bay hoặc khinh khí cầu để đo đặc (Chazette và cs, 2007, 2008) [5]. Phương pháp hai chùm tia LIDAR đã được nghiên cứu phát triển tại Pháp, một trong các kết quả nghiên cứu là thuật toán đảo ngược của Juan Cuesta, Pierre H Flamant [6, 2].

Hai máy LIDAR được đặt cách nhau một khoảng d

trên mặt phẳng ngang để cùng khảo sát vùng khí quyển giữa hai máy. Đề tài giả sử rằng, hai chùm laser phát ra từ hai máy cùng phương, ngược chiều. Đặt $S(r) = P(r)R^2$, phương trình LIDAR cho hai máy trở thành hệ phương trình sau [5, 6]:

$$S_1(r) = K_1\beta(r)\exp[-2 \int_0^r \mu(r')dr'] \quad (3)$$

$$S_2(r) = K_2\beta(r)\exp[-2 \int_r^d \mu(r')dr'] \quad (4)$$

Giải hệ hai phương trình trên, đề tài thu được hệ số tán xạ ngược và hệ số suy giảm:

$$\mu(r) = \frac{1}{4} \frac{d}{dr} [\ln \frac{S_2(r)}{S_1(r)}] \quad (5)$$

$$\beta(r) = \beta(r_{ref}) \sqrt{\frac{S(r)_1}{S(r_{ref})_1} \frac{S(r)_2}{S(r_{ref})_2}} \quad (6)$$

Thay các giá trị tính được trên vào hai phương trình LIDAR, đề tài xác định được các hệ số LIDAR của hai hệ LIDAR:

$$K_1 = \frac{S(r)_1}{\beta(r)\exp[-2 \int_0^r \mu(r')dr']} \quad (7)$$

$$K_2 = \frac{S(r)_2}{\beta(r)\exp[-2 \int_r^d \mu(r')dr']} \quad (8)$$

Thiết kế, chế tạo và thử nghiệm hệ LIDAR VF

Thiết kế hệ LIDAR VF

Hệ LIDAR VF gồm 3 khối chính: khối phát tín hiệu, khối thu tín hiệu, khối ghi nhận và xử lý tín hiệu. Các khối này được lắp đặt trên một bàn quang học chống rung xóc và có thể di chuyển được. Cơ cấu kết nối các khối cần đạt yêu cầu tháo lắp, hiệu chỉnh đơn giản và thuận lợi, phù hợp với điều kiện đo lưu động. Trên hình 1 cho thấy, hình ảnh hệ LIDAR VF đo đồng thời 2 kênh 532 nm và 1064 nm. Để giữ hệ ổn định cần có bộ phận cơ khí đỡ hệ quang thu. Hướng chùm tia được ổn định trong quá trình đo.



Hình 1: ảnh hệ LIDAR VF đo đồng thời hai kênh 532 nm và kênh 1064 nm
(1. Khối phát; 2. Khối thu; 3. Khối xử lý số liệu)

Khối phát tín hiệu có nhiệm vụ phát xung ánh sáng kích thích vào vùng không gian cần nghiên cứu. Hệ phát bao gồm các thiết bị như máy phát laser công suất cao, các linh kiện quang học nhằm định hướng chùm tia và photodiode nhanh để xác định thời gian phát xung laser.

Căn cứ theo yêu cầu của máy phát tín hiệu cho hệ LIDAR tán xạ đàn hồi đo xa đến 8 km, *Laser Litron Nano S 120 - 20(UK)* được chọn cho hệ LIDAR VF tán xạ đàn hồi. Laser có hoạt chất là tinh thể Yttrium Aluminium Garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) có pha tạp các ion Nd^{3+} làm tâm hoạt chất. Laser Nd:YAG có ngưỡng kích thích khá thấp, độ dẫn nhiệt cao cho phép phát ở chế độ xung tần số cao và cả chế độ liên tục. Hiệu suất của laser này khá cao, vào cỡ vài phần trăm. Laser được bơm quang học bởi đèn xung. Laser hoạt động ở chế độ Q-Switch nhờ một tế bào quang điện KD*P (KD_2PO_4) Pockels (hình 2) và một kính phân cực.



Hình 2: Laser Litron Nano S 120-20
1. Buồng bơm; 2. Tế bào pockels; 3. Buồng cộng hưởng;
4. Gương thoát laser; 5. Bản bước sóng và kính phân cực;
6. Van an toàn điện; 7. Cáp nguồn nuôi

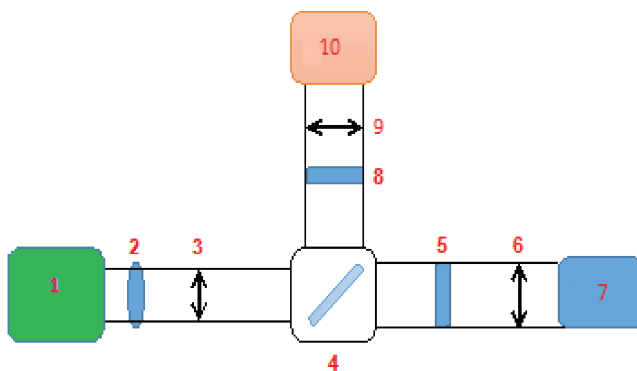
Nguồn laser phát ra xung laser hồng ngoại đặc trưng có bước sóng 1064 nm, tần số 10 Hz, năng lượng xung cỡ 120 mJ. Để chuyển đổi bước sóng sang vùng khả kiến hoặc tử ngoại, người ta dùng tinh thể phi tuyến KTP (KTiOPO₄) đặt trong buồng cộng hưởng. Gương của buồng cộng hưởng phản xạ 100% bức xạ tần số cơ bản và truyền qua bức xạ tần số hoà 3 bậc 2, nhờ vậy hiệu suất nhân đôi tần số lớn; tia laser lồi ra có bước sóng là 532 nm, năng lượng xung tối đa là 60 mJ; hộp chứa khối laser được làm bằng nhôm; bề mặt bên trong được sơn hấp thụ ánh sáng; các bộ phận quang học được đặt cố định trên một giá bằng các vít điều chỉnh.

Bảng 1: các thông số kỹ thuật của chùm tia laser

TT	Các đặc trưng	Bước sóng 532 nm	Bước sóng 1064 nm
1	Đường kính chùm tia	4 mm	4 mm
2	Độ rộng phổ	1,4 - 1 cm	0,7 - 1 cm
3	Độ trôi năng lượng	± 2%	± 2%
4	Độ ổn định điểm	<70 μ rad	<70 μ rad
5	Năng lượng xung cực đại	120 mJ	60 mJ
6	Độ rộng xung	~ 10 ns	~ 8 ns
7	Tần số xung	20 Hz	20 Hz
8	Phân cực	ngang	ngang
9	Tỷ lệ phân cực		> 90%

Máy laser Nano S120-20 thuộc loại laser LIDAR công suất cao có kích thước nhỏ nhất, đáp ứng yêu cầu của hệ LIDAR phải vận chuyển đi đo thực tế.

Khối thu tín hiệu là bộ phận quan trọng thứ 2 của hệ đo LIDAR, cho phép thu nhận các tín hiệu tán xạ để phân tích và xử lý, từ đó xác định được các đặc trưng vật lý của sol khí và phân bố của chúng trong không gian và theo thời gian. Sơ đồ nguyên lý của khối thu được mô tả trong hình 3.



Hình 3: sơ đồ nguyên lý thu tín hiệu LIDAR VF

1: Telescope LX 200 8 inch; 2: Pinhole không gian (pinhole);

3: Thấu kính chuẩn trục $f = 60$ mm; 4: Gương tách chùm tia;

5: Pinhole 532 nm; 6, 9: Thấu kính hội tụ $f = 25$ mm;

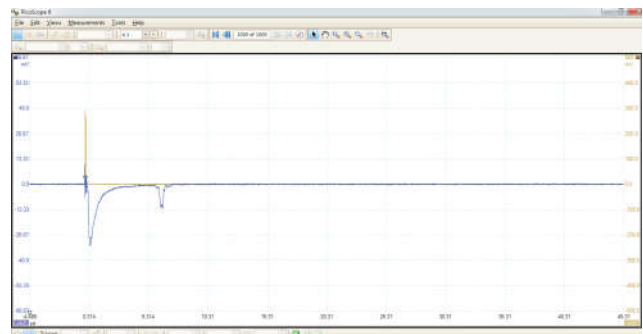
7: Photomultiplier tube; 8: Pinhole 1064 nm; 10: Avalanche Photodiode

Khối thu bao gồm các thiết bị như kính thiên văn, chặn chùm không gian, thấu kính chuẩn trục, gương tách chùm tia, pinhole giao thoa, tinh thể tách chùm phân cực, các thấu kính hội tụ và các đầu thu. Kính thiên văn có tác dụng thu nhận các photon tán xạ ngược gây ra bởi các đám mây và sol khí tương tác với chùm tia laser. Kính thiên văn được dùng ở đây là một hệ thống quang học, được cấu tạo dựa trên loại kính thiên văn Cassegrain của Hãng Quasi-Cassegrain có đường kính 20 cm, $f/10$. Tín hiệu thu được từ telescope sẽ được đi qua pinhole không gian (2) rồi hội tụ bởi thấu kính (3) đến gương tách chùm (4). Tại gương tách chùm tia, chùm tia 532 nm được truyền qua, còn chùm tia 1064 nm bị phản xạ. Chùm tia 1064 nm đi qua pinhole giao thoa 1064 nm (5) rồi được hội tụ vào modul APD (10) bởi thấu kính (9). Chùm tia 532 nm đi qua pinhole giao thoa 532 nm (8) được hội tụ vào modul PMT (7) bởi thấu kính (6).

Thử nghiệm hệ LIDAR VF

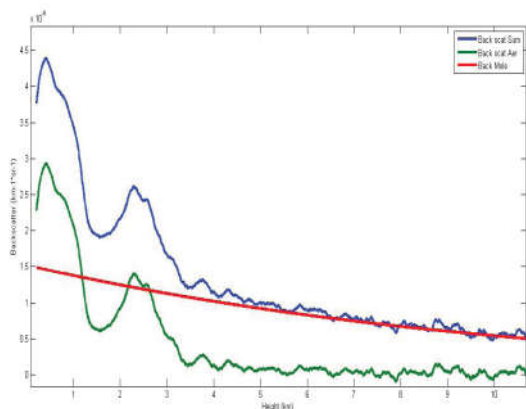
Thực nghiệm đo tín hiệu LIDAR với các thông số máy phát laser khi tiến hành đo đặc: máy phát bước sóng 532 nm, tần số lặp 10 Hz, năng lượng laser là 86 mJ. Trên hình 4 cho thấy, các hoạt động thử nghiệm ban ngày và ban đêm hệ LIDAR VF tại hiện trường Trạm phát sóng cột 5 và Ban quản lý Dự án phường Hồng Hải - Hạ Long, khu vực mỏ than Núi Béo.

Kết quả cho thấy, sol khí tập trung trong vùng từ 2 km trở xuống. Để tránh nhiễu do trời sương mù và nhiều mây, đề tài dùng số liệu thu được vào trưa chiều ngày 21.3.2013. Trong thời gian này, trời quang mây, nắng nhẹ, có gió. Với những số liệu thu được, đề tài đã tiến hành xử lý và tính toán hệ số tán xạ ngược bằng phương pháp Klett - Fernald. Hình 4 cho thấy, hình ảnh tín hiệu thu về được hiển thị sau khi đã số hóa bằng phần mềm Picoscope.



Hình 4: hình ảnh tín hiệu thu về qua phần mềm Picoscope

Một đặc trưng quang học quan trọng của sol khí là hệ số tán xạ ngược. Dựa vào đại lượng này có thể xác định được mật độ sol khí trong khí quyển. Đề tài đã thu được đường đặc trưng hệ số tán xạ ngược như hình 5.



Hình 5: hệ số tán xạ ngược của sol khí đo ngày 21.3.2013

Trên hình 5, đường màu xanh dương là hệ số tán xạ ngược tổng cộng (sol khí và phân tử khí), đường màu xanh lá cây là hệ số tán xạ ngược của sol khí, đường màu đỏ là hệ số tán xạ ngược của phân tử khí quyển. Chúng ta thấy, ở độ cao khoảng 500 m có một lớp sol khí có hệ số tán xạ ngược cỡ $3 \cdot 10^{-4} \text{sr}^{-1}$, ở độ cao khoảng 2200 m có một lớp sol khí có hệ số tán xạ ngược cỡ $1,5 \cdot 10^{-4} \text{sr}^{-1}$. Nhìn vào hình, ta có thể thấy sol khí phân bố thành hai lớp: lớp dưới thấp trong khoảng 1 km trở lại; lớp cao hơn nằm trong độ cao từ 2-3 km. Có thể theo dõi được sự vận động của khối sol khí trong không gian và theo thời gian khi thực hiện phép đo liên tục.

Các kết quả nghiên cứu trên cho thấy, hệ LIDAR VF có các thông số laser tương đương với thiết bị nước ngoài và hoạt động ổn định. Hệ LIDAR VF đã cho phép xác định đặc trưng quan trọng của môi trường sol khí là hệ số tán xạ ngược của sol khí. Số liệu đo phù hợp với kết quả nghiên cứu cơ bản về tính chất quang học khí quyển, đó là đường đo đặc trưng hệ số tán xạ ngược của các phân tử khí quyển. Như vậy, các kết quả đo là đáng tin cậy.

Kết luận

Bài báo đã trình bày các nội dung nghiên cứu thiết kế, chế tạo, thử nghiệm hệ LIDAR VF và khảo sát môi trường sol khí ở tỉnh Quảng Ninh. Thử nghiệm sử dụng quy trình lắp ráp, vận chuyển cho thấy, quy trình đo và thiết kế hệ LIDAR VF đáp ứng được yêu cầu đo lưu động. Cùng với các kết quả phân tích mẫu bụi và than tại các phòng thí nghiệm của Pháp cho thấy có sự tham gia của bụi than kích thước nhỏ hơn 2,5 μm vào môi trường không khí ở tỉnh Quảng Ninh. Tuy nhiên, để đánh giá đúng mức độ ô nhiễm do bụi than gây ra cần có các nghiên cứu đầy đủ về các nguồn ô nhiễm khác của thành phố Hạ Long, tỉnh Quảng Ninh và sự ảnh hưởng của các vùng khí hậu liên quan.

Lời cảm ơn

Các nhà khoa học thực hiện đề tài xin trân trọng cảm ơn Bộ Khoa học và Công nghệ, Bộ Giáo dục và Đào tạo, Trường Đại học Mỏ - Địa chất đã cho phép và giúp đỡ chúng tôi hoàn thành các nhiệm vụ nghiên cứu được giao.

Tài liệu tham khảo

- [1] Bui Thi Thanh Lan, Đông Thị Linh (2012), "Introduction the LIDAR two-stream technique", *Tuyển tập Hội thảo Những tiến bộ trong khai thác mỏ và công trình ngầm*, Trường Đại học Mỏ - Địa chất.
- [2] Dinh Van Trung, Nguyen Thanh Binh, Dao Duy Thang, Nguyen Dinh Hoang, Phung Viet Tiep and Nguyen Dai Hung (2011), "Multiwavelength lidar measurements of atmospheric aerosols in Hanoi, Vietnam", *Adv. Opt., Photonics, Spectroscopy and Applications*, **VI**, pp.144-147.
- [3] Bui Thi Thanh Lan (2011), "To determine the back-scattering coefficient of the LIDAR equation", *Tạp chí VNU*, **Volume 27, No.1S**.
- [4] Bùi Thị Thanh Lan, Đinh Văn Trung, Đặng Duy Trung (2014), "Nghiên cứu thử nghiệm hệ LIDAR VF", *Kỷ yếu Hội nghị Những tiến bộ trong vật lý kỹ thuật và ứng dụng*, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, pp.509-514.
- [5] I.S Stachlewska and C Ritter (2009), "On retrieval of LIDAR extinction profiles using Two-Stream and Raman techniques Atmos", *Chem. Phys. Discuss.*, **9**, pp.20229-20257.
- [6] Juan Cuesta and Pierre H Flamant (2010), "Lidar beams in opposite direction for quality assessment Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization spaceborne measurements", *Applied Optics*, pp.2232- 2242.