マルチ縦モードレーザーを用いた高スペクトル分解ライダーの開発

神　慶孝 [1], 杉本　伸夫 [1], 西澤　智明 [1], Pablo Ristori[2], Lidia Otero[2], Eduardo Quel[2]
[1] 国立環境研究所（〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2）
[2]Centro de Investigaciones en Lásers y Aplicaciones（Juan Bautista de La Salle 4397-B1603ALO Villa Martelli, Buenos Aires, Argentina）

Development of high spectral resolution lidar using a multi-longitudinal mode laser

Yoshitaka Jin[1], Nobuo Sugimoto[1], Tomoaki Nishizawa[1], Pablo Ristori[2], Lidia Otero[2], and Eduardo Quel[2]
[1]*National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506*
[2]*Centro de Investigaciones en Lásers y Aplicaciones, Juan Bautista de La Salle 4397-B1603ALO Villa Martelli, Buenos Aires, Argentina*

Abstract: This paper describes an analysis method for signals measured by high spectral resolution lidar (HSRL) using a multi-longitudinal mode laser and a Mach-Zehnder interferometer having the same free spectral range as the mode spacing of the laser. Scanning the interferometer in the span of one fringe, the lidar signals at the minimum and maximum Mie-scattering transmission are measured. Backscattering and Extinction coefficients for aerosols are derived from the minimum and maximum signals and the minimum transmittance of interferometer for Mie-scattering. The transmittance can be estimated using reference signals from a portion of the transmitted laser beam. We use an analysis method to determine the transmittance using all data taken in the periodical scan by fitting theoretical curves to the signals. A demonstration of analysis for reference and atmospheric scattering signals is shown.

Key Words: High spectral resolution lidar, Aerosol

1. はじめに

高スペクトル分解ライダーは、エアロゾルの消散係数を後方散乱係数と独立的に測定できる手法であり、次世代のエアロゾル観測ライダーの中心的手法となると考えられる。既存研究では、単一縦モードレーザーを用いることが高スペクトル分解ライダー計測の確実な手法とされてきた。しかし、この単一縦モードレーザーは、ミー散乱ライダーに広く用いられているマルチ縦モードレーザーと比べて高価である。また、レーザー波長または分光素子の制御も必要なため、煩雑なシステムになる。以上のようなコストや技術的な問題があるため、常時観測に用いるような安価で簡易な装置を実現することが困難であった。筆者らは、通常のマルチ縦モードの Nd:YAG レーザーを光源としたシンプルで低コストの高スペクトル分解ライダーを考案した [1-3]。このライダーは、マルチ縦モードレーザーのスペクトルモード間隔が一定であることを利用し、これと同じスペクトルモード間隔を持つ干渉計を分光素子として受光系に用いる。受信するミー散乱光のスペクトルは送信レーザーとほぼ同じであるが、大気構成分子のレイリー散乱光は、ドップラー拡がりによってレーザー光のモード間隔の間を埋めるようなスペクトルを持つ。この違いを受光系の干渉計をスキャンすることによって検知し、ミー散乱光とレイリー散乱光の強度を導出する。本論文では、マルチ縦モード高スペクトル分解ライダー(MM-HSRL)から得られる信号の解析手法について記述する。

2. 後方散乱係数と消散係数の導出

図 1 に MM-HSRL の構成図を示す。マルチ縦モード Nd:YAG レーザー(Surelite I, Continuum)の第二高調波(波長 532nm)を光源とし、受光部には、ピエゾ素子にマウントしたルーフミラーを可動部に用いるマッハツェンダー型の干渉計を設置する。図 1 の output A と B から得られる信号は、以下のように表される。

$$P_A(r) = \frac{KY(r)}{r^2}[X_1\beta_1(r) + X_2\beta_2(r)]\exp(-2\tau), \tag{2.1}$$

$$P_B(r) = \frac{KY(r)}{r^2}[(1-X_1)\beta_1(r) + (1-X_2)\beta_2(r)]\exp(-2\tau), \tag{2.2}$$

ここで、K は校正係数、Y は幾何光学的効率関数、X_1 と X_2 は干渉計のミー散乱とレイリー散乱に対する透過率、β_1 と β_2 はエアロゾルと大気分子の後方散

乱係数、τ は大気の光学的厚さである。エアロゾル後方散乱係数に対する干渉計の透過率が最も低い(高い)時の信号を P_{min} (P_{max})とすると、以下の式になる。

$$P_{min}(r) = \frac{CY(r)}{r^2}\left[X_1^{min}\beta_1(r) + 0.5\beta_2(r)\right]\exp(-2\tau), \quad (2.3)$$

$$P_{max}(r) = \frac{CY(r)}{r^2}\left[X_1^{max}\beta_1(r) + 0.5\beta_2(r)\right]\exp(-2\tau), \quad (2.4)$$

ここで、X_1^{min}とX_1^{max}はエアロゾルに対する干渉計の透過率の最小値と最大値である。$X_1^{min} = 1 - X_1^{max}$の関係を持つ。$X_1^{min}$(ないし$X_1^{max}$)は、リファレンス光を用いて推定される。詳細は 3 節で記述する。分子散乱のスペクトル幅は干渉計のそれよりもずっと大きいため、ここでは X_2 は 0.5 と近似した。

式(2.3)と式(2.4)を使って、エアロゾルの後方散乱係数を以下のように導出できる。

$$\beta_1(r) = \beta_2(r)\left[\frac{0.5 - P_{rat}^{min}(r)}{P_{rat}^{min}(r) - X_1^{min}}\right], \quad (2.5)$$

ここで、P_{rat}^{min}は全信号(P_{min}+P_{max})に対するP_{min}の割合を示す(すなわち、$P_{rat}^{min}(r) = P_{min}(r)/[P_{min}(r) + P_{max}(r)]$)。$P_{rat}^{min}$は、後方散乱比が大きくなるにつれて、$X_1^{min}$に近づく。逆に、後方散乱比が 1 (エアロゾルフリー) の時、P_{rat}^{min}は X_2(=0.5)になる。P_{rat}^{min}の推定手法は、X_1^{min}のそれと同じだが、大気信号を用いる。

エアロゾルの消散係数は、大気の透過率の項を含むレイリー散乱信号の傾きを使って算出される。式(2.1)と(2.2)の観測信号からレイリー散乱信号を導出するには、P_{min}からミー散乱成分を全て除去しなければならない。干渉計で除去できなかったミー散乱成分の信号を P_{bias} とすると、レイリー散乱信号(P_{Ray})は以下のように導出される。

$$P_{Ray}(r) = P_{min}(r) - P_{bias}(r), \quad (2.6)$$

ここで、

$$P_{bias}(r) = \frac{X_1^{min}[P_{max}(r) - P_{min}(r)]}{1 - 2X_1^{min}}. \quad (2.7)$$

エアロゾルの消散係数は、通常の高スペクトル分解ライダーと同様に、以下の式から算出される。

$$\alpha_1(r) = \frac{1}{2\Delta r}\ln\left[\frac{P_{Ray}(r-\Delta r/2)(r-\Delta r/2)^2/\beta_2(r-\Delta r/2)}{P_{Ray}(r+\Delta r/2)(r+\Delta r/2)^2/\beta_2(r+\Delta r/2)}\right] - \alpha_2(r). \quad (2.8)$$

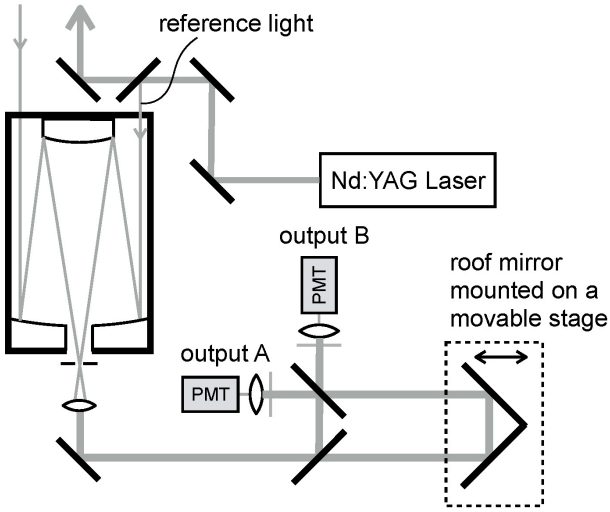

Fig.1: Block diagram of an HSRL with a multimode laser and a Mach-Zehnder interferometer

3. X_1^{min}とP_{rat}^{min}の推定

前節で示したように、後方散乱係数と消散係数を算出するためには、X_1^{min}を推定しなければならない。本研究では、リファレンス光の信号を用いて推定する。リファレンス光の分子散乱成分を無視できるとすると、X_1 は式(2.1)と(2.2)を使って以下の式で表すことができる。

$$X_1 = \frac{P_A^{Ref}}{P_A^{Ref} + P_B^{Ref}}. \quad (3.1)$$

ここで、上付き文字の Ref はリファレンス光の信号であることを示す。X_1^{min}は、干渉計を半波長(1 フリンジ分)だけ周期的にスキャンし、ルーフミラーの移動距離に対する X_1 を余弦曲線でフィッティングすることにより推定する。近似式を以下に示す。

$$X_1^{model} = 0.5 + C_1\cos(\theta + C_2), \quad (3.2)$$

ここで、C_1 と C_2 はそれぞれ振幅と位相に関するパラメータである。

図 2 (a)は実際に干渉計をスキャンさせて得られた X_1 をプロットしている。スキャンは 1 秒間に 1 回行っている。Surelite I のパルス繰り返し率が 10Hz であるため、10 ショットで 1 スキャンさせている。図 2 (a)からは、式(3.2)でフィッティングしても正しいX_1^{min}は得られない。これは、レーザースペクトル

の揺らぎのため、時間経過とともに X_1 の位相が変わるためである。しかし、図２(b)に示すように、１スキャンごとにフィッティングを行い、全スキャンの X_1 に対して位相を合わせることによって、レーザースペクトルの揺らぎの影響を無視できる。最終的に、図２(b)に示す近似曲線から X_1^{min} が得られる。

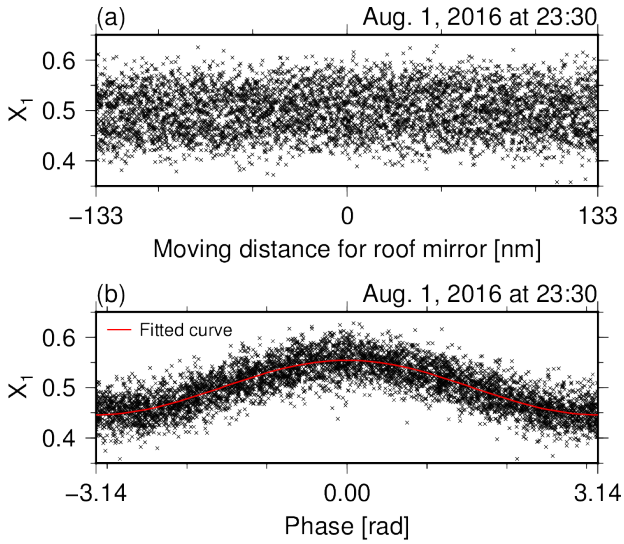

Fig.2: (a) Scatter plot of X1 as a function of moving distance for the roof mirror, (b) Scatter plot of X1 as a function of phase matched for all the scanned data.

大気信号を用いた P_{rat}^{min} の推定手法は、リファレンス信号を用いた X_1^{min} のそれと同じである。しかし、大気信号は非常にノイジーであるため、1 スキャンごとのフィッティングが上手くいかないケースが多い。X_1^{min} を推定するときにリファレンス信号を使って合わせた位相を、大気信号にも適用すれば、図2(b)と同じような結果が得られる(振幅はミー散乱強度に依存)。

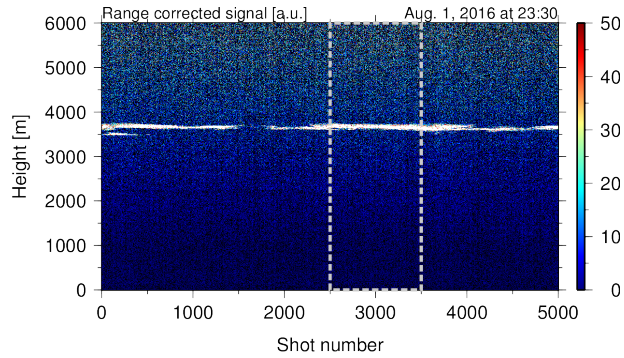

Fig.3: Time-height cross-section of range corrected signals measured at NIES, Tsukuba at 23:30 August 1, 2016. The area surrounded by the dotted line is analysis target for estimating P_{rat}^{min}.

大気信号の解析の例を以下に示す。２０１６年８月１日に観測された距離二乗補正信号の時間高度断面図を図３に示す。3.6km 付近に雲が観測されている。この雲の破線で囲まれた時間範囲について、P_{rat}^{min} を計算した結果を図４に示す。この雲のように後方散乱係数が非常に高い場合、P_{rat}^{min} は X_1^{min}(破線)に近づく。また、信号強度が強いほど、P_{rat}^{min} の推定精度が高くなる。

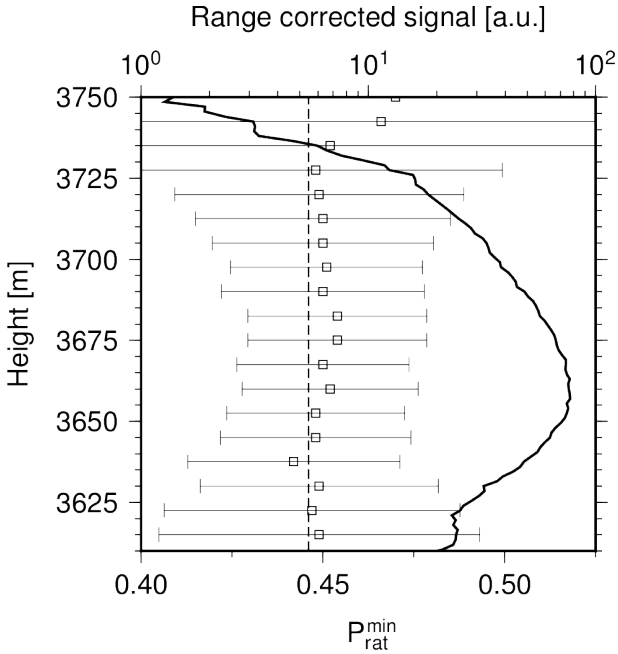

Fig.4: The solid line is the profile of range corrected signal. The dotted line denotes X_1^{min}. The plotted symbol is P_{rat}^{min}.

4. まとめと今後の課題

MM-HSRL の信号からの後方散乱係数と消散係数の導出について記述した。また、その導出に必要な X_1^{min} と P_{rat}^{min} の推定手法について、実際の観測データを使って示した。P_{rat}^{min} の推定精度はあまり高くないが、大気からの後方散乱光が干渉していることは確認できた。今後は、エアロゾルの信号に対して同様の解析を行い、後方散乱係数と消散係数を導出する。また、ラマン散乱信号との比較観測を行い、感度評価を行う。後方散乱係数と消散係数の検証は、シングルモードレーザーとヨウ素フィルターを用いた高スペクトル分解ライダーを用いて行う。

謝　辞

本研究は JST・JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラムの助成を受けたものである。

参考文献

1) Risoti P., L. Otero, Y. Jin, N. Sugimoto, T. Nishizawa, and E. Quel: Development of a high spectral resolution lidar using a multi-mode laser and a tunable interferometer, 27th Int. Laser Radar Conf., New York, (2015).
2) Jin Y., N. Sugimoto, T. Nishizawa, P. Ristori, and L. Otero: A concept of multi-mode high spectral resolution lidar using Mach-Zehnder interferometer, 27th Int. Laser Radar Conf., New York, (2015).
3) 神　慶孝、杉本　伸夫、西澤　智明、Pablo Ristori, Lidia Otero, Eduardo Quel：第３３回レーザセンシングシンポジウム予稿集、p.18-19 (2015).