

走査型干渉計を用いた二波長高スペクトル分解ライダーの開発（その1）

神 慶孝¹、西澤 智明¹、杉本 伸夫¹、岡本 創²

¹国立環境研究所（〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2）

²九州大学応用力学研究所（〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1）

Development of dual-wavelength high-spectral-resolution lidar with a scanning interferometer (Part 1)

Yoshitaka JIN¹, Tomoaki NISHIZAWA¹, Nobuo SUGIMOTO¹, and Hajime OKAMOTO²

¹ National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

² Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga Park, Kasuga, Fukuoka 816-8580

Abstract: Simulation study on a scanning interferometer for uncontrolled dual-wavelength high-spectral-resolution lidar is described. By scanning the interferometer for a fringe periodically, multispectral high-spectral-resolution measurement is possible with the single interferometer. Part of transmitted laser is used as reference to monitor laser wavelength changes and to measure interferometer transmittance for Mie scattering. Deviation angle dependence of the interferometer transmittance is simulated for six interferometers. Glass-embedded interferometers with a small incident angle are less sensitive to the deviation angle. The field-widened interferometer with measurable two output beams is selected. Candidates for suitable optical path difference of the interferometer are 40 mm and 125 mm. The shorter one is the most efficient interferometer to block Mie scattering and to transmit Rayleigh scattering, but there is temperature dependence that causes systematic errors in extinction coefficient. The longer one is slightly worse efficient, but it does not have the temperature dependence.

Key Words: LIDAR, High-spectral-resolution lidar, Interferometry, Aerosol

1. はじめに

大気エアロゾルは地球の放射収支の推定における大きな不確定要素であり、気候変動の将来予測の観点からエアロゾルの分布や性状の観測は重要である。特に、光の散乱と吸収の情報を持つ消散係数は、大気の放射伝達方程式を解く上で必須のパラメータであるため、その鉛直分布の観測が不可欠である。また、後方散乱係数及び消散係数を多波長で観測することは、エアロゾルの分類¹⁾や微物理特性の推定²⁾に役立つ。

現在世界中で普及しているエアロゾルライダーは、ミー散乱ライダー及びラマン散乱ライダーである。ミー散乱ライダーの観測データから消散係数を取り出すときは、ライダー比(消散係数と後方散乱係数の比)の仮定が必要となる。一方、ラマン散乱ライダーは消散係数を後方散乱係数とは独立して測定できる。しかし、ラマン散乱光は非常に弱く、日中は背景光の影響を強く受けるため、有効なデータが得られるのは夜間のみである。

高スペクトル分解ライダー(HSRL)はレイリー散乱を測定するため、日中でも高感度で消散係数を測定することができる。HSRLは30年以上も前に開発されているが³⁾、技術的に難しいため普及に至っていない。しかし、人工衛星への搭載も計画⁴⁾されているなど、次世代のライダーとして期待されている。

HSRLの観測原理について簡単に説明する。大気の後方散乱光には、エアロゾルからのミー散乱成分と大気分子からのレイリー散乱成分が含まれる。ミー散乱のスペクトルは送信レーザーのそれとほぼ同じく、狭いスペクトル幅を持つ。一方、レイリー散乱は、大気分子の熱運動に伴うドップ

ラー効果によって広いスペクトル幅を持つ。HSRLは、高分解能分光素子を用いることによって、この二つの散乱成分を分離して測定する。測定されたレイリー散乱信号には、エアロゾルによる減衰が含まれている。大気分子密度の鉛直プロファイルはラジオゾンデや再解析データによって与えられるため、レイリー散乱信号からエアロゾルの消散係数を取り出せる。

ミー散乱とレイリー散乱を分離させる分光素子には、干渉計や吸収フィルターが用いられる。通常、レーザー(ないし分光素子)を制御することにより、レーザーの波長と分光素子のスペクトルを合わせる。レーザーや干渉計の制御は容易ではなく、長期間の連続観測を難しくする。さらに、多波長でHSRLシステムを構築する場合、波長毎に分光素子を設けるため、制御機構がより複雑化する。例えば、NASAの航空機搭載二波長HSRL²⁾は、波長532nmはヨウ素吸収フィルターを、波長355nmは干渉計を分光素子としている。そのため、レーザー波長をヨウ素の吸収線に合わせ、干渉計を制御してミー散乱をブロックさせる必要がある。

本研究では、走査型干渉計を使った簡易的な二波長HSRLシステムを開発することを目的とする。ここでは、従来研究のように各波長に分光素子を設けるのではなく、一つの走査型干渉計によって多波長化する。また、波長ロックのような制御を一切不要とする。このようなシステムを実現するための最適な干渉計について検討した。

2. ライダーシステム

ライダーシステムのブロック図をFig. 1に示す。光源はシングル縦モードのNd:YAGレーザーを使

用する。355nm と 532nm は偏光と HSR の測定を行う。よって、消散係数は 355nm と 532nm で、後方散乱係数は 355nm、532nm と 1064nm で、偏光解消度は 355nm と 532nm で観測する $2\alpha+3\beta+2\delta$ のシステムとなる。HSR チャンネルの前には走査型干渉計を設置し、ミー散乱とレイリー散乱を分光する。また、送信光の一部を望遠鏡に送り込み、リファレンス信号とする。後述するように、レーザー波長の変化と干渉計の応答特性をモニターするのが目的である。

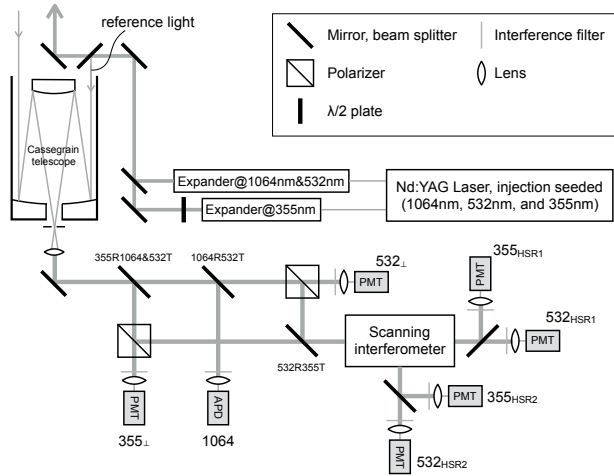


Fig. 1 Block diagram of dual-wavelength high-spectral-resolution lidar.

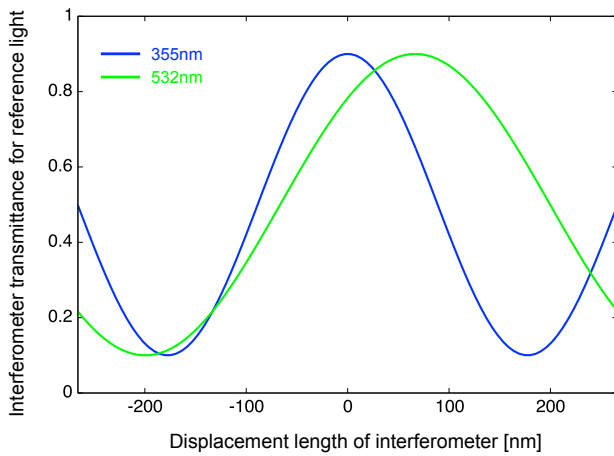


Fig. 2 Concept of scanned interferometer transmittance for reference light at 355 nm and 532 nm.

干渉計は周期的に 1 フリンジ分だけ掃引される。掃引速度は、レーザー波長の変化よりも速くなるように決定される。掃引測定により、リファレンス光に対する干渉信号の変化が観測される。これを、余弦関数を含む関数でフィッティングする。レーザー波長はフィッティング関数の位相としてモニターし、スキャン毎に位相のズレを補正する。そのため、レーザー波長の変化を考慮しなくても良いシステムになる。これは、マルチ縦モードレーザーを用いた HSR のシステムの開発過程で導入された手法である⁵⁾。この手法では、各波長で関数フィッティングされるため、波長間の位

相のズレは無視できる。これが一つの干渉計で多波長化が可能になる理由である。

1 フリンジ分をスキャンするためには、干渉計の光路差を一波長分変える必要がある。532nm と 355nm について測定する場合、光路差は長い波長の方に合わせられる。すなわち、Fig. 2 で示すように光路差を 532nm だけ掃引測定する。355nm については、1.5 フリンジ分だけ観測される。

リファレンス信号は、大気散乱信号の位相補正にも用いる。また、リファレンス光に対する干渉計の最小透過率から、大気信号に含まれるミー散乱のクロストークを推定する。クロストーク成分を除去したレイリー散乱信号から、消散係数が得られる。

3. 干渉計の設計

3.1 Field-widened 干渉計の選択

干渉計を選ぶにあたって、次の 2 点を考慮した。一つ目は角度依存性が小さいこと、二つ目は位相差 π の 2 つの干渉信号が容易に得られることである。Fig. 3 に検討した 6 つの干渉計を示す。広く使われているファブリペロー干渉計については、反射光の信号を得難いことから、ここでは除外している。干渉計(a)以外は、屈折率 n を持つ媒質が埋め込まれている。ここでは、355nm と 532nm の透過率が良い合成石英ガラス ($n=1.476@355\text{nm}$) を考えている。光路中に屈折率の大きい媒質を入れることによって、干渉計の角度依存性を補償できる。

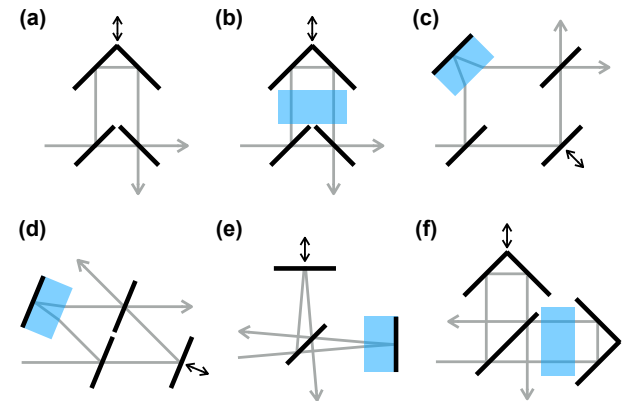


Fig. 3 Block diagram of six interferometers simulated in this study.

各干渉計について、入射角 θ からの変位角 $\Delta\theta$ とミー散乱に対する干渉計の透過率の関係を図 4 に示す。変位角に伴って光路差が大きく変わると、干渉計の透過率も変化する。干渉計(a)にはガラスを挿入しておらず、もっとも角度依存性が大きい。干渉計(c)-(e)は、ガラスへの入射角がそれぞれ異なる。(c)は 45 度、(d)は 7 度、(e)は 2 度である。角度による光路差の変化量は、以下の式で表される⁶⁾。

$$\Delta OPD = t \frac{(n^2 - 1) \sin^2 \theta}{(n^2 - \sin^2 \theta)^{3/2}} \Delta \theta^2 \quad \dots (1)$$

ここで、 ΔOPD は光路差の変化量、 t はガラスの厚さを示す。式(1)と Fig. 4 から、入射角が小さいほど、角度依存性が小さいことがわかる。

干渉計(b)と(e)のガラスへの入射角は 0 度であるが、(b)の方が角度依存はずっと大きい。これは以下によって説明される。入射角 0 度の時の変位角に伴う光路差の変化量は、以下の式で表される⁷⁾。

$$\Delta OPD = \left(\frac{d_2}{n} - d_1\right) \sin^2 \Delta\theta + \left(\frac{d_2}{n^3} - d_1\right) \frac{\sin^4 \Delta\theta}{4} \dots (2)$$

ここで d_1 はガラスを通らない方のアームの長さ、 d_2 はガラスを通る方のアームの長さを表す。ここでは簡単化のため、 d_2 はすべてガラスで満たされているものとする。式(2)の $\sin^2 \Delta\theta$ の項がゼロになる条件は、 $d_1 = d_2/n$ となるときである。干渉計(f)はこの条件を満たすことが可能であるが、(b)はそれができない。よって、(b)の角度依存性は(f)と比べてずっと大きくなる。

望遠鏡の視野角を 0.5mrad にすると、望遠鏡の後ろでコリメートされたビームの広がり角は 3.3mrad になる。Fig. 4 から、干渉計(d)-(f)の角度依存性は許容される。特に、(e)と(f)は、角度依存性を完全に無視できる。

位相差 π の 2 つの干渉信号が得られるかどうかに関して、干渉計(e)のように入射角が非常に小さいものについては、2 つの干渉信号を取得するのは容易ではない。干渉計(d)と(f)については、2 つの干渉信号を測定するのは比較的簡単である。

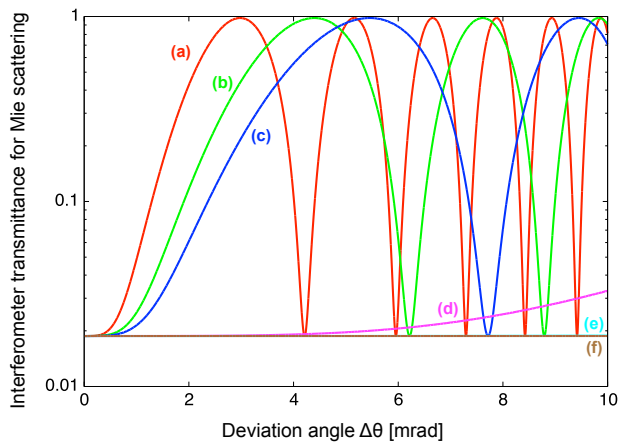


Fig. 4 Deviation angle dependence of interferometer transmittance for Mie scattering for the six interferometers shown in Fig. 3. Optical path difference of the interferometer is 40 mm.

3.2 光路差の選択

干渉計の光路差を決めるにあたって、ミー散乱をできるだけブロックし、レイリー散乱をできるだけ透過するようにした。干渉計の光路差が大きいくほど、自由スペクトル領域が小さくなるため、ミー散乱に対する除去率が小さくなる。一方で、広いスペクトル幅を持つレイリー散乱に対しては、透過率が 0.5 に近づく。干渉計の透過スペク

トルの谷がレーザーの中心波長に一致したときの、レイリー散乱とミー散乱に対する干渉計の透過率(T_R^0 , T_M^0)を計算し、両者の比をとったものを Fig. 5 に示す。レイリー散乱の透過率が大きく、ミー散乱の透過率が小さいときにこの比が大きくなるため、干渉計の効率の指標となる。効率をもっとも良いのは、光路差が約 40mm のときである。

レイリー散乱は、気温によってスペクトル幅が変わるため、高度依存性をもつ。干渉計の自由スペクトル領域がレイリー散乱のスペクトル幅と同等かそれ以上の場合、レイリー散乱のスペクトル幅の変化に対して感度が高くなる。実際の解析では、高度依存性を補正してエアロゾルの消散係数が計算される。気温プロファイルが不明な時は、系統誤差の要因となる。例えば、光路差が 40mm で気温が 5 度異なると、消散係数は $3 \times 10^{-2} / \text{km}$ の系統誤差を持つ。一方、光路差が 125mm の場合、気温が 5 度異なっても、消散係数の系統誤差は $8 \times 10^{-5} / \text{km}$ 程度である。

干渉計の効率が良いほど、消散係数に含まれるランダム誤差が小さくなる。例えば光路差が 40mm のとき、消散係数のランダム誤差を 0.01 /km 以下にするために必要な信号対雑音比(SN 比)は 247 である(消散係数 0.1 /km、距離分解能 300m を想定)。光路差が 125mm のときに必要な SN 比は 256 である。よって、光路差 40mm の方が 125mm のときと比べてランダム誤差が小さくなる。しかし、その差異は小さい。

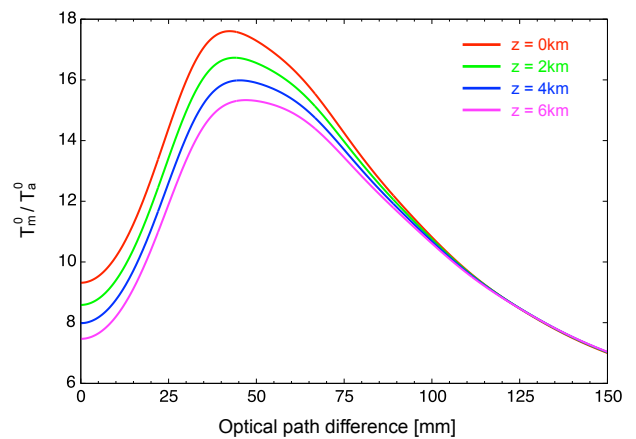


Fig. 5 Ratio of Rayleigh to Mie scattering transmittance where the trough of interferometer spectrum is matched to the center of the laser wavelength. The ratio is calculated for optical path differences and for heights. The spectral width of the laser in the calculation is 100 MHz. Rayleigh scattering spectrum is calculated using the Witschas's model⁸⁾.

4. 結論

1 フリンジ分だけ周期的に掃引する干渉計を用いることにより、一つの干渉計で HSRL の多波長化が可能になる。リファレンス光を干渉計に入れることによって、レーザー波長の変化をスキャン毎に補正する。また、リファレンス信号を用いて大気散乱信号に含まれるミー散乱のクロスト

ーク成分を推定し、レイリー散乱信号を得る。

角度依存性をもっとも小さく、2つの干渉信号が容易に得られるのは干渉計(f)である。光路差は、気温依存性が非常に小さく、効率も良い 125mm が有力候補である。40mm は効率が一番良いが、気温依存性が大きい。今後、ビームスプリッターの反射率と透過率が 50%でない場合など、干渉計の imperfection に伴う効率の悪化について検討する。また、面精度やビームの波面歪みによる影響についても検討する。

謝 辞

本研究は、JSPS 科研費基盤研究(S) JP17H06139 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Y. Hara, I. Uno, K. Yasunaga, R. Kudo, and S.-W. Kim: *Ground-based network observation using Mie-Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components*. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **188** (2017) 79.
- 2) D. Müller et al.: *Airborne Multiwavelength High Spectral Resolution Lidar (HSRL-2) observations during TCAP 2012: vertical profiles of optical and microphysical properties of a smoke/urban haze plume over the northeastern coast of the US*. Atmos.

Meas. Tech. **7** (2014) 3487.

- 3) S. T. Shipley, D. H. Tracy, E. W. Eloranta, J. T. Sroga, F. L. Roesler, and J. A. Weinman: *High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols. 1: Theory and instrumentation*. Appl. Opt. **22** (1983) 3716.

- 4) J. Illingworth et al.: *THE EARTH CARE SATELLITE: The Next Step Forward in Global Measurement of Clouds, Aerosols, Precipitation, and Radiation*. Bull. Amer. Meteor. Soc. **96** (2015) 1311.

- 5) Y. Jin, N. Sugimoto, P. Ristori, T. Nishizawa, L. Otero, and E. Quel: *Measurement method of high spectral resolution lidar with a multimode laser and a scanning Mach-Zehnder interferometer*. Appl. Opt. **59** (2017) 5990.

- 6) J. A. Smith and X. Chu: *Investigation of a field-widened Mach-Zehnder receiver to extend Fe Doppler lidar wind measurements from the thermosphere to the ground*. Appl. Opt. **55** (2016) 1366.

- 7) D. Liu, C. Hostetler, I. Miller, A. Cook, and J. Hair: *System analysis of a tilted field-widened Michelson interferometer for high spectral resolution lidar*. Opt. Express **20** (2012) 1406.

- 8) B. Witschas: *Analytical model for Rayleigh-Brillouin line shapes in air*. Appl. Opt. **50** (2011) 267.