

高スペクトル分解ライダー用マルチパスマイケルソン干渉計の研究

神 慶孝¹, 西澤 智明¹, 石井 昌憲²

¹国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

²東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Study on multi-passed Michelson interferometer for high-spectral-resolution lidar

Yoshitaka JIN¹, Tomoaki NISHIZAWA¹, Shoken ISHII²

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

²Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: Aiming for improvement of cloud measurement accuracy by 355-nm high-spectral-resolution lidar, a multi-passed Michelson interferometer is proposed as a narrow-band spectral filter. In conventional HSRLs using interferometers, the effective transmission for Mie scattering is approximately 5-10 %, so that the crosstalk of Mie scattering component in the atmospheric molecular scattering signal is large for cloud cases. Multi-passed interferometer can efficiently block Mie scattering compared to single-passed interferometers and provide effective transmittance equivalent to that obtained with iodine filters at 532 nm according to simulation results assuming gaussian spectral shape for the transmitted laser.

Key Words: High-spectral-resolution lidar, Interferometer, Cloud

1. はじめに

波長 355 nm の高スペクトル分解ライダー (HSRL) は、近年の衛星ミッション (ADM-Aeolus や EarthCARE) に搭載されていることから、全球ライダー観測において重要な役割を担っている。衛星ライダーの地上検証のため、波長 355 nm の地上設置 HSRL による雲・エアロゾルの精密測定は今後の重要なタスクである。波長 355 nm の HSRL では、高分解能分光素子として、エタロンやマイケルソン干渉計などの干渉計が使われる。波長 532 nm で中心的に使われているヨウ素フィルターと比べると、干渉計は大気粒子散乱 (ミー散乱) のカット率が 3 桁以上悪い。干渉計による大気粒子散乱の有効透過率は 5~10 %程度であるため[1,2]、水雲などのミー散乱が大きい時は、大気分子散乱 (レイリー散乱) 信号に含まれるミー散乱のクロストークが大きくなる。クロストークは消散係数や後方散乱係数のリトリーブにおいてバイアスの原因となる。本研究では、干渉計を用いた HSRL による雲の測定精度を向上させることを目的として、大気粒子散乱のカット率が高い干渉計システムの実現を目指す。大気散乱光を干渉計に複数回通すことで、より多くの大気粒子散乱をブロックできることに着目し、マルチパス干渉計システムを提案する。

2. マルチパス干渉計の透過スペクトルと有効透過率

HSRL で測定される大気分子散乱の信号 (以下 HSRL 信号) は以下の式で表される。

$$\beta_{\text{HSRL}}^{\text{obs}}(z) = [\beta_p(z)X_p + \beta_m(z)X_m(z)] \exp \left\{ -2 \int_0^z [\alpha_p(z') + \alpha_m(z')] dz \right\} \quad (1)$$

ここで、 β は後方散乱係数、 X は干渉計の有効透過率、 α は消散係数を表す。下付き文字の p と m はそれぞれ大気粒子と大気分子を示す。簡単化のため、ライダー信号は距離二乗補正をしてシステム定数で割ったものとする。HSRL 信号から大気粒子の消散係数を取り出すためには、後方散乱係数の大気粒子成分を取り除く必要がある。大気粒子散乱は干渉計によってブロックされるが、大気分子散乱と比べて無視できるほど小さくするためには有効透過率(X_p)を出来るだけ小さくする必要がある。本研究ではマルチパス・マイケルソン干渉計 (以下マルチパス干渉計) を導入する。マルチパス干渉計による有効透過率は以下のように表される。

$$X = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\nu) \cdot \left[\frac{1 + \cos(2\pi\nu d/c + \pi)}{2} \right]^n d\nu \quad (2)$$

ここで、 F は大気粒子散乱または大気分子散乱の周波数スペクトル、 ν は周波数、 d は干渉計の光路差、 c は光速、 n は干渉計に通す回数を示す。ここでは初期位相を π とし、干渉計の透過率の谷をレーザー波長に合わせている。Figure 1 に大気散乱スペクトルとマルチパス干渉計の透過スペクトルを示す。ここでは、レーザー波長を 355 nm としている。干渉計を 1 回通す場合、透過スペクトルは正弦波の形状となるが、複数回通す場合は大気粒子散乱をブロックする周波数範囲が広がる。そのため、複数回通すことにより大気粒子に対する有効透過率を小さくすることができる。

Figure 2 に干渉計の光路差に対する有効透過率を示す。HSRL では、大気分子散乱を出来るだけ透過させ、大気粒子散乱を可能な限りブロックする必要がある。大気分子散乱を最大にするためには、光路差 100 mm 以上が望ましい(Fig. 2(a))。一方で、光路差が長くなるほど大気粒子散乱のブロック率が下がる（有効透過率が上がる）ため、光路差は出来るだけ短くする。そのため、光路差は約 100 mm が最適と考えられる。干渉計を複数回通すことで、大気分子と大気粒子の両方の有効透過率が下がる。大気分子に対しては、3 回通すことで有効透過率が最大 0.3 程度となるが、これは波長 532 nm のヨウ素フィルターのと比べて同等かわずかに高い。大気粒子に対しては、レーザーの周波数スペクトルの形状によって有効透過率が大きく異なる。ローレンツ分布を想定した場合は複数回通した場合でも有効透過率はほとんど変わらないが、ガウス分布の場合は 2 桁ずつ小さくなる（光路差 100 mm の場合）。これは、ローレンツ分布はガウス分布と比べて周波数スペクトルの裾野が広いためである。ガウス分布を想定した場合は干渉計に複数回通すことによって、ヨウ素フィルターと同等の有効透過率となることがわかった。

3. 結論と今後の課題

干渉計を用いた HSRL による雲の測定精度を向上させるため、マルチパス干渉計システムを考案した。マルチパス干渉計によって大気粒子散乱を効率的にブロックすることが可能であり、ヨウ素フィルターを用いた場合と同等の有効透過率が得られることが示唆された。本手法の有効性を確かめるためには、実際のレーザーのスペクトル形状を詳細に調べる必要がある。また、同じ干渉計に複数回通すシステムを実現させるためには、干渉計の構成を工夫する必要がある。ダブルパス干渉計であれば、ルーフミラーを組み合わせることで、容易に実現可能であると考えられる[3]。また、マルチパス干渉計を用いることで雲の光学特性のトリバー精度がどれだけ向上するのかを調べることも今後の課題である。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 22K03723 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Y. Jin et al.: Opt. Express (2020), 28(16), p. 23209-23222.
- 2) J. P. do Carmo et al.: Atmosphere (2021), 12, 76.
- 3) P. Hariharan and D. Sen: J. Opt. Soc. America (1960), 50(4), p.357-361.

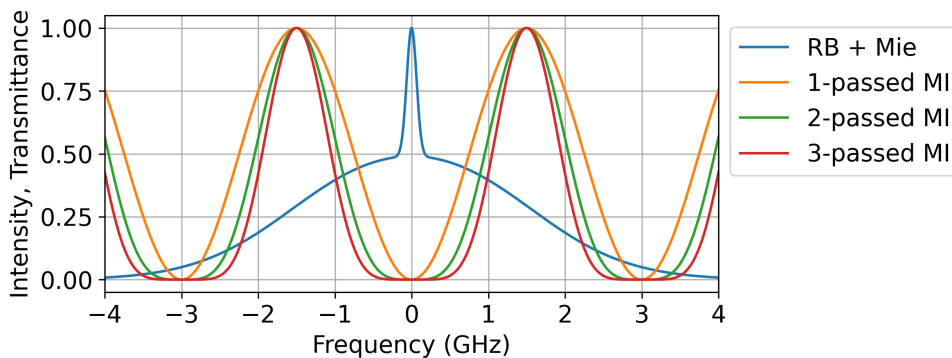


Fig. 1. Spectra of atmospheric backscattering light (Rayleigh-Brillouin + Mie) and Michelson interferometer transmittance for single-, double-, and triple-path system. The optical path difference of interferometer is 100 mm. Laser wavelength is 355 nm.

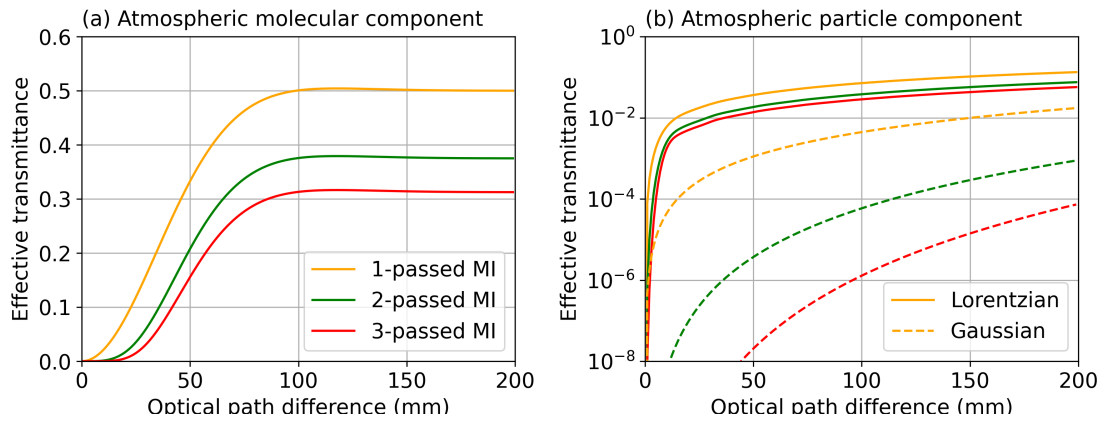


Fig. 2. Effective transmittance of multi-path Michelson interferometer versus optical path difference for (a) atmospheric molecular component and (b) atmospheric particle component. Laser wavelength is 355 nm and laser spectral width is 150 MHz (full width at half maximum).