

小型マルチモードレーザーを用いた 低コスト高スペクトル分解ライダーの開発

神 慶孝¹, 青木 誠²

¹国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

²情報通信研究機構 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1)

Development of low-cost high-spectral-resolution lidar using compact multimode laser

Yoshitaka JIN¹ and Makoto AOKI²

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

²National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

Abstract: A low-cost high-spectral-resolution lidar (HSRL) using a multi-longitudinal mode laser and a scanning Michelson interferometer is developing for long-term quantitative measurement of aerosol profiles. A multimode laser is newly designed to increase the measurement sensitivity and efficiency compared to a previous study using a commercial multimode laser. Conditions suitable for the HSRL laser are that laser mode spacing is large (to be matched to the free spectral range of HSRL interferometer), spectral width of laser mode is narrow, and laser frequency variation is small. A prototype laser is evaluated using a scanning interferometer, and laser mode spacing, spectral width, and frequency variation are satisfied with the required specification. The result indicates that the developed laser has a spectrum useful for the HSRL.

Key Words: High-spectral-resolution lidar, Aerosols, Laser

1. はじめに

大気エアロゾルの気候や大気環境への影響を評価するためには、エアロゾルの空間分布を定量的且つ長期的に計測することが重要である。高スペクトル分解ライダー (High-spectral-resolution lidar: HSRL) は、大気分子からのレイリー散乱をエアロゾルからのミー散乱と分離して測定することで、エアロゾルの消散係数を後方散乱係数とは独立して測定できるライダー手法である。HSRL はレイリー散乱を測定することで日中でもエアロゾルの消散係数を高感度で測定できるため、今後のエアロゾルライダーの中心的手法とされている。レイリー散乱はミー散乱とほぼ同じ中心波長を持つが、レイリー散乱の方がドップラー拡がりが大きいため、スペクトル幅が異なる。HSRL では狭帯域レーザーと高分解能分光素子を用いることで両者を分離して測定する。従来の研究では、HSRL の光源として単一縦モードレーザーを使用することが有効とされてきた。しかし、単一モードレーザーは通常のエアロゾルライダーで使用されているマルチ縦モードレーザーと比べて高価であり、システム全体の開発コストが高くなる。さらに、従来の HSRL では波長制御を必要とするためシステムが複雑になり、長期の安定的な動作は容易ではない。

上記の問題を解決できる手法として、近年国立環境研究所では市販のマルチ縦モードレーザーと走査型干渉計を用いた HSRL の開発に成功した[1]。マルチ縦モードレーザーは複数の周波数ピークを持つが、レーザーのモード間隔と同じ周波数間隔を持つ干渉計を分光素子として用いることでレイリー散乱とミー散乱を分離できる。さらに、干渉計を1フリンジ分だけ周期的にスキャンすることでレーザーの周波数変動をスキャン毎に補正できるため、波長制御が不要なシステムを実現した。しかし、市販のジャイアントパルスレーザーでは共振器長が長いため、受信部でも長い干渉計を必要とする。長い干渉計を使用することで干渉計の光軸が不安定になることに加えて、干渉縞のコントラスト (鮮明度) が低いため、通常の HSRL と比べて測定精度が低い。さらに、長い干渉計を使うことで受信視野が狭くなることから、測定感度が低いという課題があった。

本研究では、将来的な大気モニタリング用 HSRL 観測網の展開を見据えて、マルチ縦モードレーザーを用いた高感度 HSRL システムを開発することを目的とする。この目的を達成するため、HSRL に適したマルチ縦モードレーザーを導入し、低コストで単一縦モードレーザーを用いた HSRL と同等の性能を持つ HSRL システムの実現を目指す。

2. ライダーシステム

Figure 1 に開発するライダーのブロック図を、Table 1 にライダーシステムの仕様を示す。送信レーザーには、エアロゾルライダーで広く使用されている Nd:YAG レーザーを使用する。使用する波長はレーザーの基本波(1064nm)、2倍波(532nm)、3倍波(355nm)の3波長とする。また、通常の HSRL で使用される単一縦モードレーザーではなく、マルチ縦モードレーザーを使用する。マルチ縦モードレーザーは周波数モードが複数存在するが、モード間隔は周期的であるため、同じ周期の透過率スペクトルを持つ干渉計を用いて分光する。本研究では、レーザーのモード間隔を干渉計の自由スペクトル領域に一致させる。また、HSRL で実用的なものとするためには、レーザーの各モードのスペクトル幅が狭く、周波数が安定していることが条件となる。そこで本研究では、LD 励起の主発振器出力増幅器 (Master Oscillator Power Amplifier: MOPA) を導入する (詳細は[2]を参照)。レーザーの一部はリファレンス光として使用し、レーザーの周波数変動や干渉鮮明度を連続的にモニターして解析に使用した。

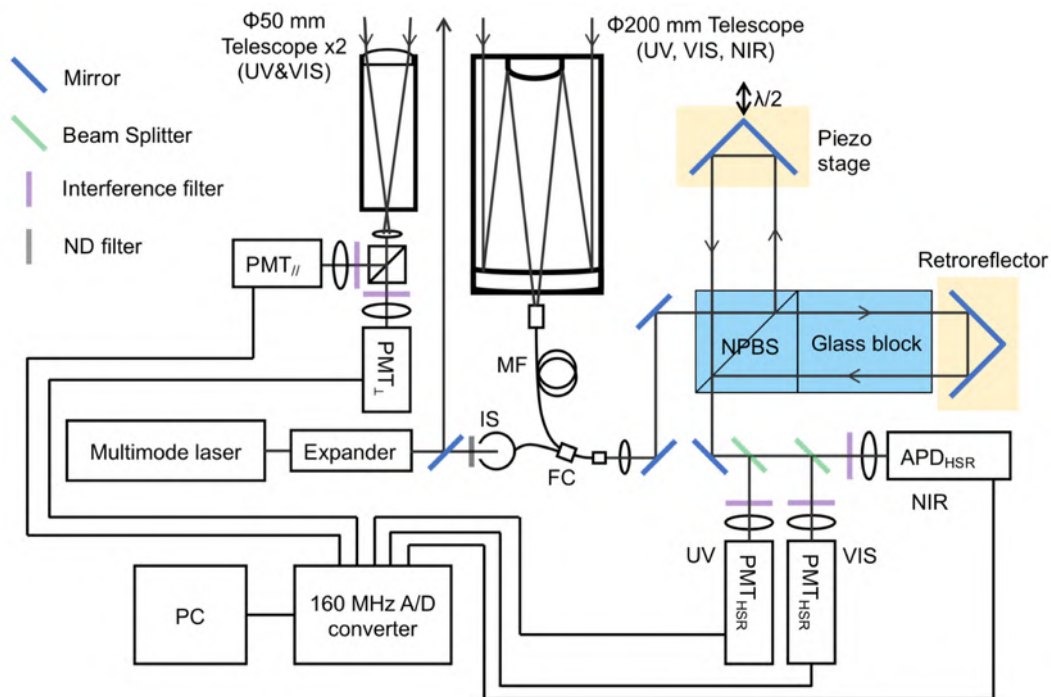


Fig. 1. Block diagram of HSRL system

Table 1. Specification of HSRL system

Specification of 5RF-2001 HSRL	
Laser system	Diode-pumped, MOPA, multimode, Nd:YAG laser
Laser energy	5mJ@1064&532nm, 0.5mJ@355nm
Repetition rate	100 Hz
Laser mode spacing	1.5 GHz
Spectral width	< 100 MHz (for each longitudinal mode)
Stability	< ± 3 % (Power), < 20 MHz@1064 nm (Frequency drift)
Beam divergence	< 0.5 mrad (full angle for 86% energy)
Telescope	Schmidt-Cassegrain, Dia.=200mm
Field-of-view	0.5 mrad
Band-path filter	0.5 nm (full width at half maximum)
Interferometer	Scanning Michelson interferometer (FSR=1.5GHz)
Detectors	Photomultiplier (UV, VIS) and Avalanche photodiode (NIR)
Data acquisition	A/D converter (160 MHz, 16 bit)

受信部では、遠距離用（口径 20cm）と近距離用（口径 5cm）の 2 種類の望遠鏡を使用する。分光部では、走査型マイケルソン干渉計を使って大気散乱光を分光する。干渉計を使ってレイリー散乱とミー散乱を効率的に分光するため、自由スペクトル領域がミー散乱のスペクトル幅よりも大きく、レイリー散乱のスペクトル幅よりも小さくなるように干渉計の光路差を決定した。また、干渉計光路差の入射角依存性を低減するため、光路にガラスブロックを挿入している。干渉計は周期的に 1 フリンジ分だけスキャンする。干渉計を周期的にスキャンするため、干渉計の折り返しミラーをピエゾステージにマウントし、ファンクションジェネレータを用いてピエゾ素子の印加電圧を制御する。これまでの研究では、ファンクションジェネレータからランプ波を生成し、レーザーと同期せずに周期的に印加電圧を変えていた。本研究では、レーザーと同期したステップ関数を与えることで、同じステップ幅でスキャン信号を測定できるように新たに工夫した。

3. マルチ縦モードレーザーのスペクトル特性

予備実験として、レーザー（主発振器）のスペクトル特性を走査型干渉計を用いて評価した。ここでは、レーザーの周波数モードのモード間隔とショット毎の周波数変動を調べた。実験では干渉計の光路差を変えながら干渉鮮明度を測定し、干渉鮮明度が最大値になる時の干渉計の光路差からレーザーのモード間隔を推定した。また、レーザーの周波数変動を調べるため、干渉縞の位相の時間変化をモニターした。この時、干渉計を周期的にスキャンするのではなく、光路差を固定して干渉信号を連続的に測定した。干渉信号強度からフリンジの位相を取得し、さらに位相から周波数に変換した。

レーザー光を干渉計で分光し、干渉鮮明度を測定した結果を Fig. 2 に示す。干渉計の光路差が約 200 mm の時に干渉鮮明度の最大値が測定されたことから、レーザーのモード間隔が約 1.5 GHz であることを示しており、仕様で設定した干渉計の自由スペクトル領域に一致することを確認した。Fig. 2 中の点線は理論計算結果を示している。干渉鮮明度の大きさはレーザーの周波数モードのスペクトル幅によって、分布の幅はレーザーのゲイン幅によって決まる。今回の実験結果から、周波数モードのスペクトル幅は 60 MHz、ゲイン幅は約 20 GHz と推定された。ゲイン幅については、Nd:YAG レーザーに対して先行研究で得られた値と一致した。また、周波数モードのスペクトル幅は、先行研究で使用された単一縦モードレーザーのスペクトル幅よりも狭く、HSRL 用のレーザーとして良好なスペクトルを実現している。

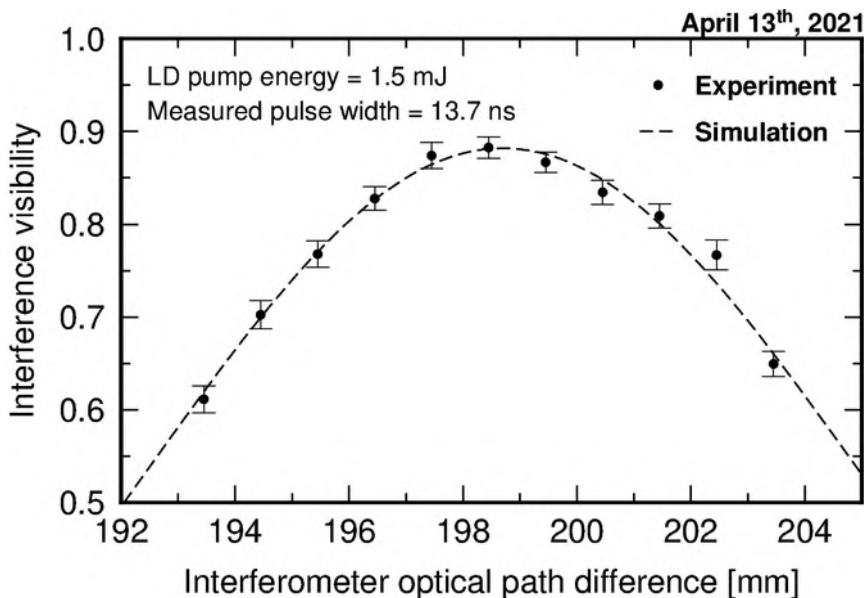


Fig. 2. Measured interference visibility for prototype master oscillator.

同干渉計を用いてレーザーショット毎の周波数変動を計測した結果を Fig. 3 に示す。周波数変動の標準偏差は約 18 MHz であり、干渉計の自由スペクトル領域 (1.5 GHz) と比べて約 1% の変動を持つ。これは、先行研究で使用されたレーザーと同レベルの変動であり、要求仕様を満たしている。上記スペクトル特性の評価実験から、本研究で開発するレーザーは、HSRL 用のレーザーとして実用的であることが示唆された。

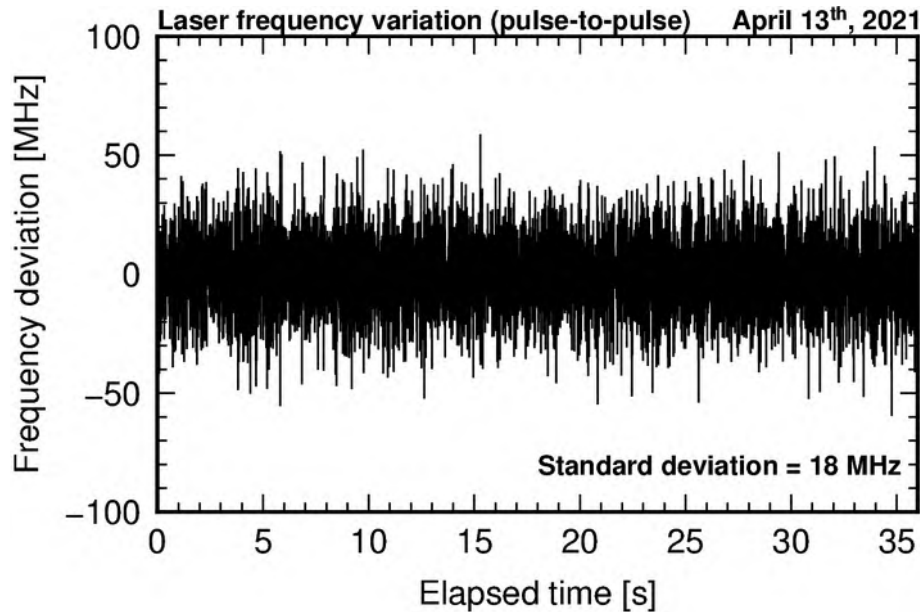


Fig. 3. Shot-by-shot laser frequency variation for prototype master oscillator.

4. まとめ

本稿では、マルチ縦モードレーザーと走査型干渉計を用いた低コスト HSRL の開発について紹介した。HSRL の高感度化を目指すため、HSRL 用に最適化したマルチ縦モードレーザーを導入した。HSRL 用のレーザーの条件として、レーザーの周波数モード間隔が広く（干渉計のスペクトル間隔に一致）、各モードのスペクトル幅が狭く、且つ周波数が安定している必要がある。新たに開発した走査型干渉計を用いてレーザーのスペクトル特性を測定したところ、上記の条件を満たす実用的なレーザーであることを確認した。今後はレーザーをライダーシステムに組み込み、連続的な大気観測試験を実施する予定である。

謝 辞

本研究は、環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20205R01)により実施した。本研究の実施にあたり、ご支援及びご助言をいただいた同研究課題のプログラムオフィサーである環境再生保全機構の西川雅高氏、アドバイザーである東京都立大学の阿保真氏、東北工業大学の佐藤篤氏、気象研究所の酒井哲氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Y. Jin et al.: Appl. Opt. **56** (2017) 5990.
- 2) 青木 誠、神 慶孝：第 39 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (2021).