

水蒸気 DIAL の波長制御・ノイズ除去のアルゴリズム開発

及川栄治¹, 酒井哲¹, 西橋政秀¹, 永井智広¹, 阿保真², 吉田智¹

¹ 気象庁気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

² 東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Development of algorithms for laser wavelength stability control and noise reduction of water vapor DIAL

Eiji OIKAWA¹, Tetsu SAKAI¹, Masahide NISHIHASHI¹, Tomohiro NAGAI¹, Makoto ABO², and Satoru YOSHIDA¹

¹ Japan Meteorological Agency / Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052

² Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: Our group has been developing the differential absorption lidar (DIAL) for the observation of water vapor vertical distribution. We develop the algorithm to stabilize two wavelengths of 829.054 nm (on water vapor absorption) and 829.124 nm (off water vapor absorption) of laser diodes. In addition, we test the algorithm of the empirical mode decomposition (EMD) for the noise reduction of signal ratio between off-beam and on-beam $P_{\text{off}}/P_{\text{on}}$.

Key Words: DIAL, Water vapor, Wavelength stability, Noise reduction, EMD

1. はじめに

大気下層の水蒸気が上空に持ち上げられることで積乱雲が発生する。そのため、線状降水帯の形成には大気下層から流入する水蒸気が重要だと考えられており¹⁾、ラマンライダーによる水蒸気の鉛直分布の観測を行ってきた²⁾。ラマンライダーの観測では太陽光の影響により日中の観測高度が夜間より低下してしまうという課題があった。そこで、気象研究所と東京都立大学は共同で日中の観測高度が低下しない差分吸収式ライダー (DIAL) の開発に取り組んでいる。開発中の水蒸気 DIAL の概要については本シンポジウムでの西橋らの発表を参照されたい。本研究では、DIAL で用いる 2 波長のレーザーの波長制御機構の開発と高高度観測のための観測ノイズ除去アルゴリズム開発に取り組んだ。

2. 手法

2.1 波長制御機構の開発

本研究で開発している水蒸気 DIAL では、送信光源として半導体レーザーを利用して、水蒸気の光吸収の大きい波長 (On-beam 波長、829.054nm) と光吸収の小さい波長 (Off-beam 波長、829.124nm) の観測を行っている。水蒸気の吸収断面積は、off-beam 波長では波長に対する変化が小さいが、on-beam 波長では大きく変化するため、波長依存性が大きい on-beam 波長の 1 波長の波長制御を行い、夜間の水蒸気観測を実施してきた。一方、日中の水蒸気観測では、太陽光による背景光ノイズ低減のため、波長幅の狭い透過ピークを周期的に持つ波長フィルタであるエタロンを受光系に取り付けて観測を行う必要がある。そのため、日中の観測では、on-beam と off-beam の 2 波長の波長制御が必要となる。そこで、計測波長を光スイッチで切り替えて 2 波長の波長制御を行うためのアルゴリズムの拡張を行った。

2.2 観測ノイズ除去アルゴリズムの開発

DIAL で観測される On-beam 波長の受信光強度を P_{on} 、Off-beam 波長の受信光強度を P_{off} とすると、水蒸気数密度 N は次式で表される。

$$N = \frac{1}{2(\sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}})} \frac{d}{dz} \left[\ln \left(\frac{P_{\text{off}}}{P_{\text{on}}} \right) \right]$$

ここで、 z は高度、 σ は水蒸気の吸収断面積を表している。水蒸気濃度が低く、信号強度の弱い高高度では観測ノイズによる $P_{\text{off}}/P_{\text{on}}$ の微小な変化が、推定される水蒸気濃度の大きな誤差要因となる。ライダー信号の観測ノイズ除去手法としてウェーブレット変換が広く用いられてきた^{3,4)}が、近年、経験的モード分解 (EMD)⁵⁾や変分的モード分解 (VMD)⁶⁾などの手法も利用され始めている⁷⁾。そこで、本研究では、EMD を利用した

ノイズ除去アルゴリズムの開発に取り組んだ。EMD は、信号 X を固有モード関数 IMF と残差 R に分解する手法であり、以下の式で表される。

$$X = \sum IMF_i + R$$

低次のモードの IMF に高周波成分が主に含まれることから、信号 X から低次のモードの IMF を取り除くことで、ノイズ除去を行った信号を得ることができる。

3. 結果

3.1 波長制御

Fig. 1 は、波長制御機構による 2 波長の波長制御時の on-beam 波長と off-beam 波長の時間変化を示している。図から 2 波長が ± 0.1 pm の範囲内で制御できている様子が見て取れる。ただし、off-beam 波長が on-beam 波長より大きく変動する特徴がみられた。半導体レーザーの出力波長は温度と注入電流が大きくなるほど長くなるが、モードホップと呼ばれる波長の跳びを生じることもある。モードホップは半導体レーザーの温度や注入電流に依存して周期的に発生するため、使用している半導体レーザーで off-beam 波長を出力する際の温度と注入電流がモードホップを生じる温度・注入電流と一致している可能性があり、off-beam 波長の変動が大きくなった要因のひとつとして考えられる。

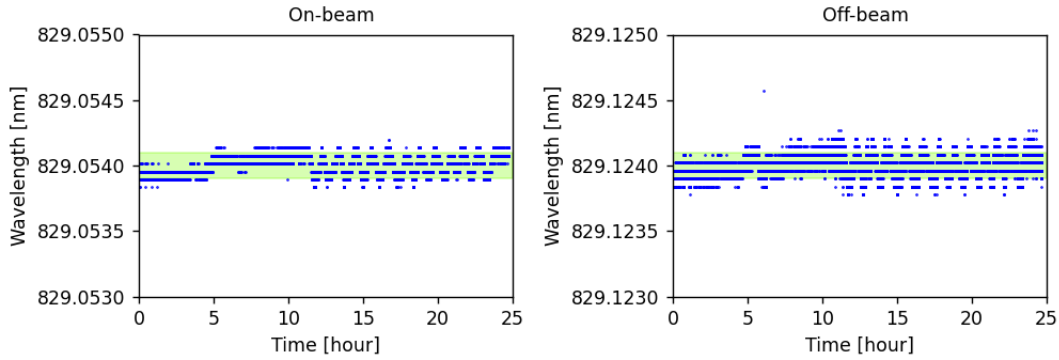


Fig. 1 The controlled wavelength [nm] of on-beam (left) and off-beam (right) laser diodes from 8th to 9th July 2024. The horizontal axis is the lapse time from the start of measurement [hour]. The target wavelengths λ are 829.054 nm (on-beam) and 829.124 nm (off-beam) and the green bars show the ranges of $\lambda \pm 0.1$ pm.

3.2 信号ノイズ除去

Fig. 2 は、つくば市の気象研究所内に設置している水蒸気 DIAL で 2023 年 12 月 20 日に観測された $P_{\text{off}}/P_{\text{on}}$ 、EMD の適用結果である IMF と残差 R 、ノイズ除去後の $P_{\text{off}}/P_{\text{on}}$ を示している。観測ノイズのない理想的な状態を仮定した場合には $P_{\text{off}}/P_{\text{on}}$ は高度が高くなるにつれて単調増加となるが、Fig. 2a を見ると高度 2km 以上では $P_{\text{off}}/P_{\text{on}}$ が一つ下の層より小さい値を取るなどの観測ノイズによる変動が見られた。EMD では、信号の極値を検出し (Fig. 2a の赤丸)、極値がなくなるまで IMF の分解を繰り返す。EMD によって、3 個の IMF (Fig. 2 b, c, d) と残差 R (Fig 2e) に分解された。通常の信号解析では信号全域にノイズが分布するが、 $P_{\text{off}}/P_{\text{on}}$ では水蒸気濃度の高い大気下層ではノイズが見られず、ノイズの影響による極値が検出されたのは高度 2.05km から 4.75km の区間であった。そのため、高度 2.05km から 4.75km の区間においては、3 個の IMF を取り除いた残差 R をノイズ除去後の信号とみなすことができる。一方、高度 2.05km 以下の単調増加している信号成分については、1 番目の IMF に含まれてしまっているので、高度 2.05km 以下では残差 R をノイズ除去後の信号とすることができない。そこで、本研究では、観測ノイズによる影響が少ない高度 2.05km 以下では $P_{\text{off}}/P_{\text{on}}$ の元の値、高度 2.05km から 4.75km の区間においては EMD の残差 R をノイズ除去した信号として取り扱うこととした (Fig. 2f)。今後、Fig 2f の信号から推定した水蒸気濃度の妥当性の評価を行う。

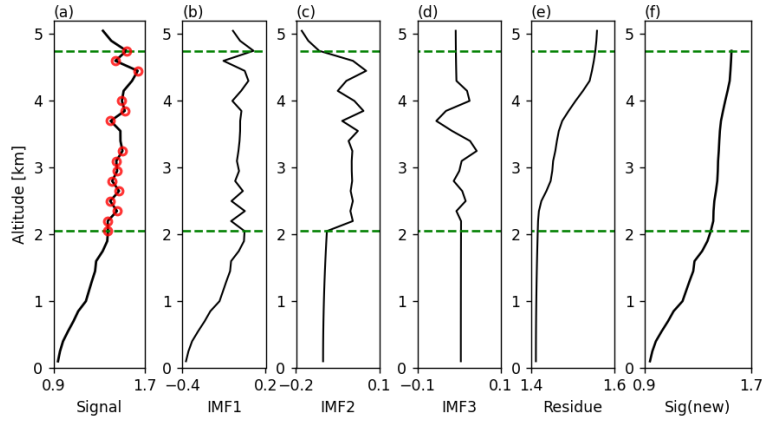


Fig. 2 The results of denoised signal ratio between off-beam and on-beam $P_{\text{off}}/P_{\text{on}}$ using empirical mode decomposition (EMD). The observed $P_{\text{off}}/P_{\text{on}}$ (a), three IMFs (b, c, and d), residue of EMD (e), and denoised $P_{\text{off}}/P_{\text{on}}$ (f). The red circles of (a) show the extreme values. Green dashed lines at 2.05 and 4.75 km show the altitudes of the lower and upper limits where extreme values exist.

参考文献

- 1) T. Kato: J. Meteor. Soc. Japan, 96, 69-83, (2018).
- 2) S. Yoshida et al.: Mon. Wea. Rev., 150, 1781–1798, (2022).
- 3) H. T. Fang and D. S. Huang: Opt. Commun., 233, 67-76, (2004).
- 4) T. Nishizawa et al.: Atmos. Meas. Tech. Discuss., in review, (2024).
- 5) N. E. Huang et al.: Proc. R. Soc. Lond. A., 454, 903-995, (1998).
- 6) K. Dragomiretskiy and D. Zosso: IEEE Trans. Signal Process, 62, 531-544, (2014).
- 7) Z. Wang et al.: Sensors, 22, 5978, (2022).