

気温計測精度向上のための回転ラマンライダー受光光学系の最適化

矢吹 正教¹、松木 一人²、内保 裕一²、竹内 栄治²、長谷川 壽一²

¹ 京都大学生存圏研究所 (611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

² 英弘精機株式会社 (161-0072 新宿区東京都渋谷区幡ヶ谷 1-21-8)

Optimization of an Optical Design for a Rotational Raman Lidar for Profiling the Accurate Atmospheric Temperature

Masanori YABUKI¹, Kazuto MATSUKI², Yuichi UCHIHO², Eiji TAKEUCHI², and Toshikazu HASEGAWA²

¹ Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, Uji, Kyoto 611-0011

² EKO Instruments Co., Ltd, Shibuya-ku, Tokyo 151-0072

E-mail: yabuki@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract:

Observing the thermodynamic profiles is expected to predict the development of clouds that bring torrential rainfall earlier. We have constructed a rotational and vibrational Raman lidar system for profiling temperature and water vapor in the lower troposphere using a laser at a wavelength of 266 nm. The newly developed optical system of our rotational Raman lidar comprises a double-grating spectrometer and photomultiplier tube array that determines the shape of the rotational Raman spectrum with easy optical alignment, reducing the influence of laser wavelength instability. The temperature estimation accuracy will be improved by adding a relay lens that makes the wavelength resolution unevenly spaced to a set of optical detection and receiving systems. Here, we introduce an optimization of an optical design for a rotational Raman lidar for profiling the accurate atmospheric temperature.

Key Words: Temperature, rotational Raman lidar, array PMT, and relay lens

1. はじめに

本グループでは、太陽放射の影響の少ない波長 266 nm のレーザーを光源とするラマンライダーを 2014 年より開発してきた¹⁻³⁾。うち、気温計測部では、弾性散乱光による迷光の影響を低減したダブルポリクロメータにより分光し、純回転ラマンスペクトルのストークスとアンチストークスの両方をアレイ検出器で取得する多波長検出方式を採用している⁴⁾。これにより、レーザー波長精度や検出波長調整に起因する計測波長誤差に対するロバスト性が向上するため、シーダーが搭載されていないレーザーでも気温計測が可能となる。本研究では、気温計測機能の強化の一環として進めている、気温の高精度推定や可測高度範囲の拡大に寄与することが期待される受光光学系の最適化手法について紹介する。

2. ラマンライダー受光光学系の最適化

ラマンライダーは、光源に波長 266 nm の Nd:YAG レーザーを使用して、口径 350 mm の望遠鏡で散乱光を受光する。気温計測部では、独自に開発したダブルポリクロメータを用いて、弾性散乱光の選択的な減光と回転ラマン散乱光の分光を行う。また、分光器の受光面に 32ch のアレイ PMT (Hamamatsu, H7260-04) を配した検出器 (Licel, SP32-HR) を置いて、回転ラマンスペクトルを検出する。アレイ PMT により高感度の多チャンネル光子計測を実現しているが、複数の PMT を組み合わせて多チャンネル化した場合と異なる考慮すべき課題がいくつかある。一つは、

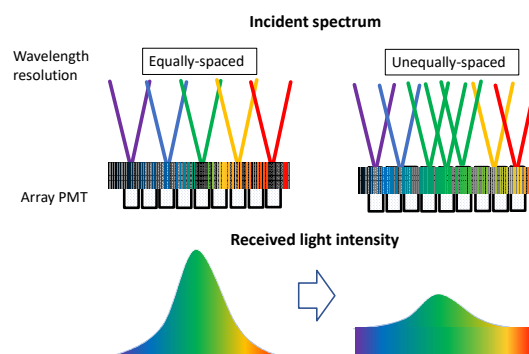


Fig.1 Received light intensities of a rotational Raman scattering observed from the spectrometers with (left) an equally-spaced and (right) unequally-spaced resolutions.

全チャンネルで同一のダイナミックレンジとなることであり、波長（チャンネル）間で強度差の大きい信号を同時に計測しながら、距離方向に減衰する信号を広範囲に取得することが難しい。また、隣接チャンネル間で約 3% のクロストークが発生することも無視できず、スペクトル形状が同じであってもその強度が異なると不感時間の補正率が異なるため、クロストーク補正後の挙動に違いが生じる。また、1ch の幅 1 mm に対して有効面幅が 0.8 mm、残りの 0.2 mm は遮光される。回転ラマン散乱のように波長に対して散乱光が離散的に現れる場合、波長分解能が高くなるほど検出波長域の設定が重要になる。ここでは、ダイナミックレンジとクロストークによる影響を軽減するための図 1 に示す最適化手法について提案する。回転ラマン散乱を用いた気温計測では、信号の強い波長帯と弱い波長帯の強度が十倍以上異なるスペクトルを用いる（図 1 左）。そこで、非球面レンズを用いて敢えて歪曲収差を生じさせて、信号の強い波長領域を分散、信号の弱い波長領域を集合するような波長分解能を不等間隔にする光学系を考えた（図 1 右）。チャンネル間の信号強度差を小さくすれば、クロストークによる影響は相互にある程度相殺され、また PMT のダイナミックレンジを距離減衰方向に有効に活用できる。

波長分解能を不等間隔にするデザインはいくつか考えられるが、ここでは図 2 に示すリレー光学系を紹介する。一樣な光をリレー光学系に入射させると中心部分は暗く、両端が明るくなる。その効果を確認するため、図 3(a) に示す波長分解能が異なる 6 パターンの分光器を仮定し、各装置で検出したスペクトルに対する気温推定精度について評価した。case-1, 2 の波長分解能は等間隔であり、case3~6 は中心（CH=17）に近いチャンネルほど細かく、端になるに従い粗くなるような分解能設定にした。また、検出器に起因したスペクトル形状変化に対する評価とするため、形状に影響する不感時間とクロストーク補正のみを考慮している。実際の観測では、光子計測の統計的なゆらぎに起因した誤差（受光光子数が少ないほど大きな誤差）を考慮する必要があることに注意が必要である。図 3(b) に、気温 273 K の回転ラマンスペクトルの補正後信号強度に $1\sigma = 5\%$ の正規分布誤差を与えた場合の、気温推定誤差のシミュレーション結果を示す。ここで、横軸はスペクトルの中で強度が最大となるチャンネルの値である。適切に波長分解能を不等間隔にすることで、気温推定精度が向上することが分かった。波長分解能の最適な条件は、計測対象の気温（スペクトル形状）で決まるため、現在、中緯度域での計測を想定した最適ナリレー光学系の実装に取り組んでいる。

参考文献

- 1) 矢吹ら, 第 32 回レーザーセンシングシンポジウム (飛騨高山) (2014.9.4-5) P-16.
- 2) Yabuki, M. et. al., EPJ Web of Conferences 237 (2020) 03001.
- 3) 松木他 (2022), 日本気象学会 2022 年度秋季大会 講演予稿集, 271, C403.
- 4) 矢吹ら, 第 40 回レーザーセンシングシンポジウム (福山市) (2022.9.1-2) B-5.

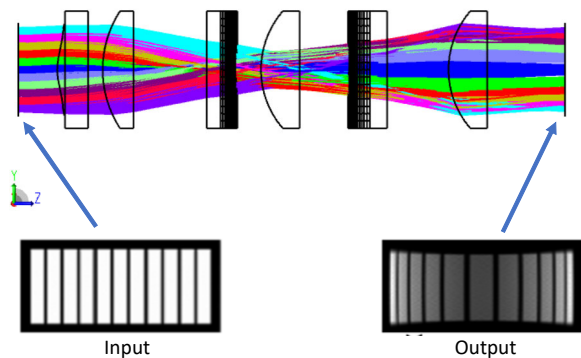


Fig.2 Optical design of the relay lens for changing the wavelength resolution of spectrometer to unequal intervals.

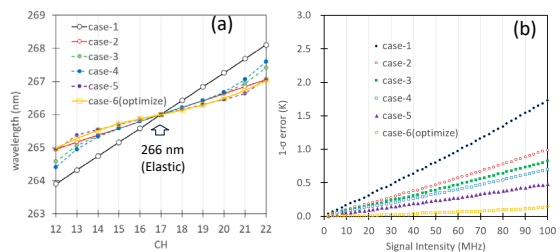


Fig.3 (a) Center wavelengths of each channel of the array-PMT for six different spectrometers with equally-spaced or unequally-spaced resolutions. (b) Theoretical simulation of $1\text{-}\sigma$ errors of the derived temperature for six different spectrometers caused by the detector-specific parameters of dead time and crosstalk (input temperature: 273 K).