

ヘテロダイン検波による Rayleigh-Brillouin スペクトル計測の ための最適波長の検討

増山 光治, 柴田 泰邦, 長澤 親生, 阿保 真
所属: 首都大学東京 (〒191-0065 日野市旭が丘 6-6)

Simulation of optimum wavelength for Rayleigh-Brillouin scattering measurement by heterodyne technique

Koji MASUYAMA, Yasukuni SHIBATA, Chikao NAGASAWA, and Makoto ABO
Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahi gaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: A coherent lidar has been used mainly as a Doppler lidar for wind measurements. On the other hand, measurement of the Rayleigh-Brillouin (RB) scattering spectrum, which is scattering from atmospheric molecules, is proposed by the heterodyne detection technique. We propose a new method to measure atmospheric temperature from RB scattering spectrum obtained by heterodyne detection. Temperature can be obtained by spectral fitting technique from temperature dependence of RB spectral shape. Conventionally, lidar temperature measurements are performed by the direct detection method such as a rotational Raman lidar, a differential absorption lidar, and a Rayleigh lidar. However, these direct detection methods are not established during the daytime measurements. Considering the wavelength dependence of the RB spectral shape, we discuss the laser wavelength suitable for temperature measurement in this paper.

Key Words: heterodyne detection, Rayleigh-Brillouin spectrum, signal processing

1. はじめに

これまでコヒーレントライダーは主に風を計測するためのドップラーライダーとして使われてきたが、大気分子からの散乱であるレイリーブリルアン散乱スペクトル（以下 RB 散乱スペクトル）の形状をヘテロダイン検波方式で計測した例は数少ない¹⁾。

従来、ライダーでの温度測定は直接検波法によって行われており、主な方式として回転ラマンライダーや DIAL、レイリーライダーが開発されてきた。しかし、回転ラマンライダーは散乱強度が弱いことから背景光などの雑音の影響が大きく昼間観測は困難である。レイリーライダーはミー散乱の影響を強く受けることから主にエアロゾルの少ない成層圏を観測対象としている。DIAL は温度感度が低いことから日中の対流圏の温度分布をライダーで高精度に測定する手法は確立されていない。

本研究では Fig.1 のように RB 散乱スペクトル形状が温度に依存することを利用し、ヘテロダイン検波によって得られる RB 散乱スペクトルから温度を計測する手法を新たに提案する。また、RB 散乱スペクトル形状は波長にも依存することから、主要なレーザー光源の各波長において、スペクトルフィッティング法を用いて温度測定誤差を数値計算し、本提案方式での最適波長を明らかにする。

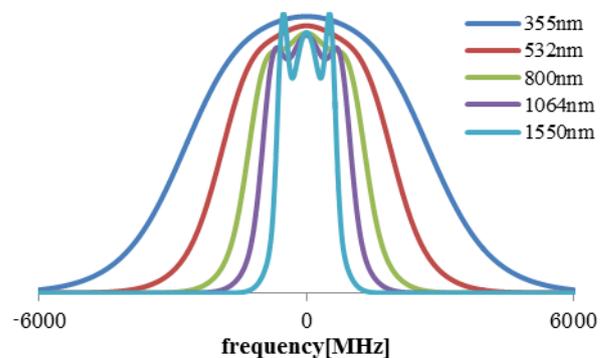


Fig.1 RB scattering spectra at various wavelengths.

2. 最適波長の検討

ヘテロダイン検波方式において 1 秒あたりの SN 比は以下の式で求められる²⁾。

$$SNR = \frac{\eta \lambda E \beta K^{2L/1000} \pi D^2 \sqrt{N}}{8hBL^2} \quad (1)$$

ここで、 E : 送信パルスエネルギー[J], D : 望遠鏡の実効的な直径[m], β : 大気分子の後方散バンド幅[Hz], L : 測定距離[m], η : システム効率, N : パルス繰り返し周波数[Hz]を表す。

大気分子による散乱光のスペクトルは RB 散乱と呼ばれる分子の熱運動のドップラー広がりを持ち、この広がりには温度と気圧によって依存する。気圧分布は測高公式で仮定できるので、気温に関するスペクトルフィッティング法を適用することで気温の測定が可能である。

式(1)を用いて求めた、ライダーの光源として用いられている主要な 5 波長(355, 532, 800, 1064, 1550nm)と RB 散乱スペクトルの SN 比の関係性を Table.1 に示す。ここで、各波長とも D = 5 cm, L = 500 m で統一した。

Table.1 Parameter and SNR at each wavelength

λ [nm]	E [mJ]	f [Hz]	E [W]	B [GHz]	SNR
355	125	30	3.75	8	5.1
532	250	30	7.5	5.6	9.8
800	250	30	7.5	4	9.1
1064	500	30	15	2.6	21.1
1550	0.1	20000	2	2	0.1

Table.1 より、波長が 1064nm では 355nm や 532nm, 800nm の光源よりも SNR の値がよくなることがわかった。またコヒーレントドップラーライダーで用いられることが多い 1550nm の光源は、大気分子の後方散乱計数 β の波長依存性が大きく影響し、レーザー出力の違い以上に他の波長よりも SNR の値が著しく悪い。よって、高出力光源の 1064nm がヘテロダイン検波法による温度測定に適していることがわかった。

3. 気温測定誤差のシミュレーション

気温はスペクトルフィッティング法を用いて導出するが実際の散乱スペクトルはノイズを含んでいる。

そこでランダムノイズを含んだ散乱スペクトルを仮定し、信号雑音比に対する温度誤差をシミュレーションした。気温 $T_0=298.0\text{K}$, 気圧 1.0atm の条件で Tenti S6 model に基づき RB 散乱スペクトルを計算した³⁾。ここで散乱スペクトルの信号雑音比 SN は以下の式で定義した。

$$SN = \frac{\int F_{RB}(v, T) dv}{\int \{F_{RB}(v, T) + N'\} dv - \int F_{RB}(v, T) dv} \quad (3)$$

$F_{RB}(v)$ は RB 散乱スペクトル、 N' はランダムノイズである。

Table.1 において SN が著しく悪かった 1550nm を除く 4 波長に対し、異なるノイズパターンを含んだ

200 個の RB スペクトルを生成し、それぞれについてスペクトルフィッティングを施し、その標準偏差を温度誤差として評価した。結果を Fig.2 に示す。

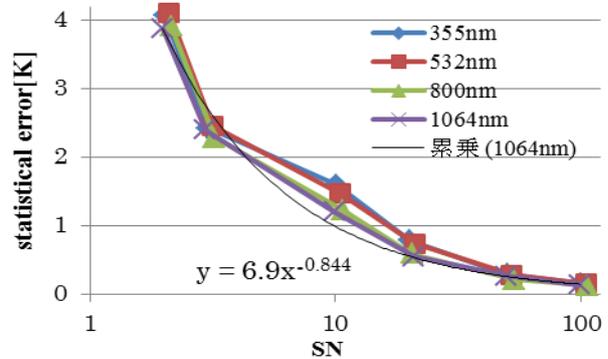


Fig.2 Statistical error as a function of SN at various wavelengths.

Fig2 より統計誤差は波長による影響はほとんどおらず、SN と統計誤差の関係が累乗近似曲線に近似可能であることがわかった。例えば、1064nm の場合は温度誤差 $\Delta T = 6.9 * SN^{-0.844}$ で近似できる。Table.1 で示した SNR における各波長での統計誤差は、1064nm は 0.55K, 800nm は 1.34K, 532nm は 1.78K, 355nm は 2.91K となり、1064nm において標準偏差 1.0K に収まる範囲で測定できることが明らかになった。

4. まとめ

本研究ではヘテロダイン検波で得られる RB 散乱スペクトルを用いた温度計測ライダーにおける最適波長を計算機シミュレーションによって検討した。SN に対する温度の統計誤差は波長によってほとんど依存しないことから、高い SN 値が得られる 1064nm が最も効率のよい光源である事がわかった。

参考文献

- 1) F. Chouza, B Witsches, and O. Reitebuch, "Heterodyne high-spectral-resolution lidar", *Appl. Opt.*, 56, 29, 8121-8134, 2017.
- 2) S. Kageyama et.al, "Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing", *Appl. Opt.*, Vol.46, No.11, 1953-1962, 2007.
- 3) B. Witschas et.al, "Analytical model for Rayleigh-Brillouin line shapes in air", *Appl. Opt.*, Vol.50, No.3, 267-270, 2011.