

気温計測のための超伝導ナノワイヤ単一光子検出器を用いた

2 μm 差分吸収ライダーの検討

岩井 宏徳¹, 青木 誠¹, 知名 史博², 三木 茂人³, 寺井 弘高³

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

² 産業技術総合研究所 量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル研究センター (〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1)

³ 情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 (〒651-2492 兵庫県神戸市西区岩岡町岩岡 588-2)

Performance evaluation of a 2-μm differential absorption lidar using a superconducting nanostrip single-photon detector for temperature profiling

Hironori IWAI¹, Maoko AOKI¹, Fumihiro CHINA², Shigehito MIKI³, and Hirotaka TERA³

¹ Radio Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 Nukukita, Koganei, Tokyo 184-8795

² Global Research and Development Center for Business by Quantum-AI technology, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8560

³ Advanced ICR Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology, 588-2 Iwaoka, Nishi, Kobe 651-2492

Abstract: Taking advantage of a high system detection efficiency of the superconducting nanowire single-photon detector at 2 μm, an enhancement to the direct detection 2-μm water vapor differential absorption lidar (DIAL) system is proposed to enable atmospheric temperature profiling. The performance of the temperature estimates from the DIAL is described and analyzed using a Monte Carlo simulation for lower-troposphere measurements with accumulation time of 10 min and range resolution of 100 m.

Key Words: Temperature, superconducting nanostrip single-photon detector, 2-μm differential absorption lidar

1. はじめに

線状降水帯など大雨をもたらす現象の事前予測のためには、水蒸気の時間・空間的に高精度な情報が重要である。NICT では CO₂ 計測のための波長 2 μm 帯のレーザの波長制御技術を発展させ¹⁾、コヒーレント方式の水蒸気差分吸収ライダー（水蒸気 DIAL）の開発を行い、風と水蒸気の計測性能の検証と実証を行った²⁾。しかし、コヒーレント方式はローカル光のショットノイズが支配的であるため、送信出力などを更に向上させても劇的に SN 比、つまり水蒸気の測定精度や観測距離、時間分解能を向上させることが難しい。このため、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器（Superconducting nanowire Single-Photon Detector: SSPD）を用いた直接検波方式の水蒸気 DIAL の検討を開始した。SSPD は量子情報通信分野では通信波長帯（1.55 μm）において検出感度が高く、低ノイズの光子検出器として研究開発と利用が進められている。NICT では波長 2 μm 帯においても検出効率が 80%を超える SSPD が開発されている³⁾。この SSPD を用いた直接検波方式の水蒸気 DIAL の検討を行い、コヒーレント方式の水蒸気 DIAL に比べて、時間分解能および観測距離を改善できる可能性を示した⁴⁾。本稿では、水蒸気と同様に重要な気象要素である気温の計測方法と想定される測定誤差について検討を行ったので、その結果について報告する。

2. 気温測定精度の性能評価方法

波長 2 μm 帯の水蒸気 DIAL では水蒸気による吸収が強い波長（λ_{on}=2050.550nm）と吸収が弱い波長（λ_{off}=2051.103nm）のレーザ光を波長制御するための基準波長として、CO₂ の吸収線（λ_{co2}=2050.967nm）にロックされたレーザ光を用いている。波長 λ_{co2} のレーザ光を大気中に照射した場合、波長 λ_{off} のレーザ光との差分吸収（CO₂ DIAL）により、以下の式から局所的な光学の厚さ Δτ_{CO₂} が計算される。

$$\Delta\tau_{CO_2}(R_1, R_2) = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{N_{off}(R_2)N_{CO_2}(R_1)}{N_{CO_2}(R_2)N_{off}(R_1)} \right] = n_{CO_2} \Delta\sigma_{CO_2}(T, P) \Delta R + n_{H_2O} \Delta\sigma_{H_2O}(T, P) \Delta R$$

水蒸気の数密度 $n_{\text{H}_2\text{O}}$ は水蒸気 DIAL (波長 λ_{on} と λ_{off}) から導出される値を用いる。水蒸気 DIAL では、波長 λ_{on} と λ_{off} での差分吸収断面積 $\Delta\sigma_{\text{CO}_2} = |\sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}}|$ がほぼゼロとなるため、 CO_2 による吸収の影響を無視できる。 CO_2 の数密度 n_{CO_2} は 410 ppm で一様に分布していると仮定し、 CO_2 DIAL から導出される $\Delta\tau_{\text{CO}_2 \text{ DIAL}}$ との差が最小となる気温 T と気圧 P で決定される差分吸収断面積 $\Delta\sigma_{\text{CO}_2}(T, P) = |\sigma_{\text{CO}_2} - \sigma_{\text{off}}|$ を最急降下法により探索する。吸収断面積は HITRAN Application Programming Interface (HAPI) ⁵⁾ を用いて計算する。各高度での T と P の初期値は地上気象観測からの推定される値を用いる。

本稿では送信源として開発中のトリウムファイバーレーザ励起の Ho:YLF レーザ ⁶⁾ を用いる場合を想定した (パルスエネルギー 39 mJ, 繰返周波数 600 Hz, パルス長 160 ns)。受光系として, SSPD の検出効率 0.84, 光学フィルターの帯域幅は 1 nm, 受光径は 30 cm を想定した。一方, 大気の情報として 2020 年夏季に NICT 本部から放球したラジオゾンデの気温, 気圧, 水蒸気の情報に置き換えた Tropical atmospheric model ⁷⁾ を用いて 3 波長 (λ_{on} , λ_{off} , λ_{CO_2}) のライダー信号を生成した。また, 次式で計算される局所的 optical 厚さのランダム誤差を用いて, CO_2 DIAL から導出される $\Delta\tau_{\text{CO}_2 \text{ DIAL}}$ を乱数で計算し, この $\Delta\tau_{\text{CO}_2 \text{ DIAL}}$ との差が最小となる $\Delta\sigma_{\text{CO}_2}(T, P)$, つまり気温 T と気圧 P を探索するモンテカルロシミュレーションを行った。

$$\sigma(\Delta\tau_{\text{CO}_2}(R_1, R_2)) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\text{SNR}_{\text{CO}_2}^2(R_1)} + \frac{1}{\text{SNR}_{\text{off}}^2(R_1)} + \frac{1}{\text{SNR}_{\text{CO}_2}^2(R_2)} + \frac{1}{\text{SNR}_{\text{off}}^2(R_2)}}$$

3. 性能評価結果

図 1b,c に 2020 年 7 月 13 日 8 時 51 分に NICT 本部から放球したラジオゾンデの気温, 気圧, 水蒸気データ (黒線) を基に距離分解能 100m, 積分時間 10 分で気温と気圧を推定した結果を示す。気温と気圧の推定値 (赤線) は探索を 100 回試行した平均値 (赤丸) と標準偏差 (エラーバー) で示している。推定された気温と気圧は高度 3 km まで実測値と概ね一致し, 高度 1.2 km と 3 km 付近の逆転層も識別できることがわかる。気温および気圧の標準偏差は高度 2 km で 0.8 K, 0.3 hPa, 3 km で 4.1 K, 1.4 hPa である。局所的 optical 厚さ $\Delta\tau_{\text{CO}_2 \text{ DIAL}}$ の相対誤差 (図 1a) は高度 2 km で 0.1%, 高度 3 km で 0.5% であり, 気温測定誤差 1 K を達成するためには高精度な CO_2 DIAL 観測値が必要であることを示している。

4. まとめ

波長 2 μm 帯の SSPD を用いた直接検波方式の水蒸気/ CO_2 DIAL での想定される気温測定精度を示した。今後は最適な観測波長や水平観測時の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Aoki, M., and H. Iwai, 2021, Appl. Opt., 60, 4259-4265.
- 2) Iwai, H., and M. Aoki, 2023, Opt. Express, 31, 13817-13836.
- 3) China, F., et al., 2023, Opt. Express, 31, 20471-20479.
- 4) 岩井宏徳ほか, 日本気象学会 2024 年度春季大会, P253.
- 5) Kochanov, R. V., et al., 2016, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 177, 15-30.
- 6) Mizutani, K., et al., 2018, Opt. Lett., 43, 202-205.
- 7) Anderson, G., et al., 1986, AFGL-TR-86-0110, 954.

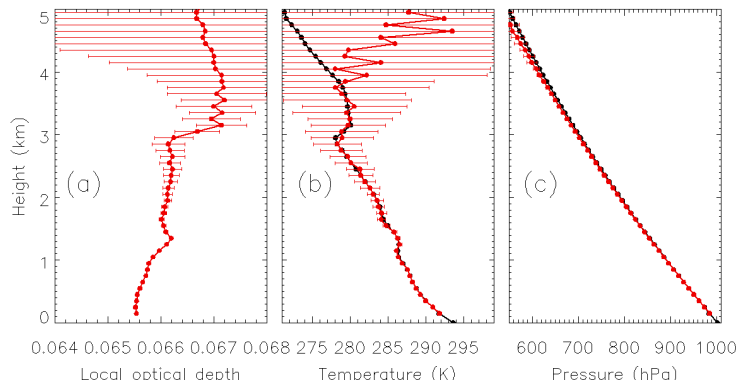


Fig. 1. (a) Local optical depth, (b) temperature, and (c) pressure as a function of height using a range resolution of 100 m and an accumulation time of 10 min.