

水蒸気計測向け 1.53 μm 帯コヒーレント差分吸収ライダの回線検討

今城 勝治¹, 児島 涼太¹, 亀山 俊平¹

¹三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 (〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1)

Preliminary study on coherent differential absorption laser radar for water vapor measurement using 1.53 μm laser

Masaharu IMAKI¹, Ryota KOJIMA¹, and Shumpei KAMEYAMA¹

¹Mitsubishi Electric Corporation Information Technology R&D Center, 5-1-1 Ofuna, Kamakura, Kanagawa 247-8501

We performed preliminary study on a ground based coherent differential absorption lidar (DIAL) for vertical profiling of water vapor density using 1.53 μm laser wavelength. We assumed the atmospheric condition using the fast atmospheric signature code (FASCODE), and estimated the measurement accuracy using coherent lidar equation. Simulation results show a 10 % accuracy of water vapor density from an altitude of 0.1 km to 4.5 km with 10 minutes average.

Key Words: Water vapor, Differential absorption, Coherent, LIDAR

1. はじめに

大気中の水蒸気は、集中豪雨の要因となりうる積乱雲の発達に強く影響している。より早期での集中豪雨予測を行うため、大気中の水蒸気密度分布を高精度に測定することが求められる。

水蒸気の高度分布を計測する手法として、ラマンライダ¹⁾や差分吸収ライダ^{2,3)}が報告されている。これらは直接検波方式であり、散乱光を二乗検波し電気信号に変換する。そのため、太陽光が入射した場合に雑音成分が増加し、夜間に比べて昼間での計測時は測定距離が低下、もしくは測定精度が劣化する課題がある。

一方、我々は 1990 年頃より、受信方式にヘテロダイン検波方式を用いた風計測ライダを開発してきた。この方式は、受信信号とローカル光のビート信号を測定するため、電気信号に変換したときに光の位相情報を保持しながら光強度を測定することができる。そのため、ランダムな位相情報をもつ太陽光等の影響を受けないことが特徴である。この受信方式を用いたライダは、コヒーレントな散乱光を検出することから、コヒーレント方式とも呼ばれる。水蒸気計測を行うコヒーレント方式差分吸収ライダは、波長 10 μm 帯の CO₂ レーザを光源に用いたものが報告されているが^{4,5)}、光源に CO₂ レーザを用いているため、装置サイズが大きく、長期安定性に課題がある。

我々は、上記課題を克服すべく、①昼夜の観測性能が変動しないコヒーレント方式、②長期安定性が可能な 1.5 μm 帯導波路アンプを用いた固体レーザ光源、を用いる水蒸気差分吸収ライダの検討として、吸収波長と非吸収波長の選定と回線計算を行った。

2. コヒーレント差分吸収ライダ装置

コヒーレント差分吸収ライダの装置構成を図 1 に示す。水蒸気に対して吸収の強い吸収波長と吸収のほとんどない非吸収波長に安定化したレーザ光を光スイッチに投入する。光スイッチでは、外部からの信号によって吸収波長もしくは非吸収波長のどちらか一方を選択して出力する。選択したレーザ光を光分配器で分け、一方を強度変調器でパルス化し、光アンプで増幅した後、光アンテナを通して大気中に照射する。大気中に照射したレーザ光は空気分子やエアロゾル等によって散乱される。散乱光を送信時と同じ光アンテナで集光し、光分配器のもう一方の光と合波する。合波した光を光受信機でそのビート成分を電気信号に変換し、CPU にて時間領域毎で周波数解析し、そのピーク強度を導出する。

吸収波長と非吸収波長は一定時間毎に切り替え、各波長それぞれ累計 5 分の平均化を実施して距離毎での周波数ピーク強度を算出する。最後に、吸収波長と非吸収波長での受信信号強度分布より光学的厚さを算出し、水蒸気量の高度分布を導出する。

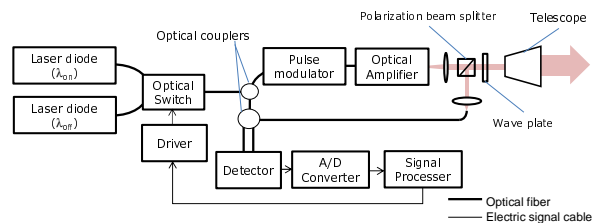


Figure 1. Schematic diagram of coherent differential absorption LIDAR.

3. 回線計算

3.1 回線計算式

水蒸気吸収による光学的厚さ $DAOD$ と濃度 n は、吸収・非吸収波長における受信電力を $P_{S,on}$ 、 $P_{S,off}$ とすると、次式で与えられる。

$$DAOD(z_i) = \ln \left(\frac{P_{S,off}(z_{i+1}) \cdot P_{S,on}(z_i)}{P_{S,on}(z_{i+1}) \cdot P_{S,off}(z_i)} \right), \quad \dots(1)$$

$$n(z_i) = \frac{DAPD(z_i)}{2 \cdot \Delta z \cdot (k_{on} - k_{off})}, \quad \dots(2)$$

ここで、 Δz は距離分解能(m)、 k_{on} 、 k_{off} は吸収波長と非吸収波長の吸収係数である。このとき、受信電力 SN 比による水蒸気濃度誤差は次式のように記載できる。

$$SNR(z_i) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{P_{shot}}{\sqrt{N} \cdot P_S(z_i)} \right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{N}} \right)^2}}, \quad \dots(3)$$

$$\frac{\Delta n}{n}(z_i) = \left[\left(\frac{1}{SNR_{on}(z_i)} \right)^2 + \left(\frac{1}{SNR_{off}(z_i)} \right)^2 + \left(\frac{1}{SNR_{on}(z_{i+1})} \right)^2 + \left(\frac{1}{SNR_{off}(z_{i+1})} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / DAPD(z_i), \dots(4)$$

ここで、 P_{shot} はショット雑音電力、 N は平均化回数である。

3.2 回線計算結果

本装置では、吸収波長を 1531.382nm、非吸収波長を 1531.555nm とした。また、レーザ出力エネルギーを 1.6mJ、パルス幅を 650ns、繰り返し周波数を 5kHz、受信口径を 150mm、装置の光損失を -4dB とした。平均化回数は各波長で 1,500,000 回とし、合計 10 分で観測する。

回線計算で使用する大気モデルについて、気温・気圧分布は U.S. Standard Atmosphere1976、水蒸気密度の高度分布は AFGL Atmospheric Constituent Profiles⁶⁾を用いた。また、エアロゾルの後方散乱係数の高度分布は、波長 1.5 μ m での航空機計測での実測値⁷⁾、大気構造定数は SLC daytime model 用いた。

図 2 に回線計算結果を示す。(a)はエアロゾル後方散乱係数の大気モデル、(b)は水蒸気密度の高度分布、(c)は受信電力と雑音電力の高度プロファイル、(d)は測定誤差の高度プロファイル、である。計算の結果、100m 分解能では 2.5km 以下、300m 分解能では 4.2km 以下、500m 分解能では 4.5km 以下において相対誤差 10%となる結果を得た。

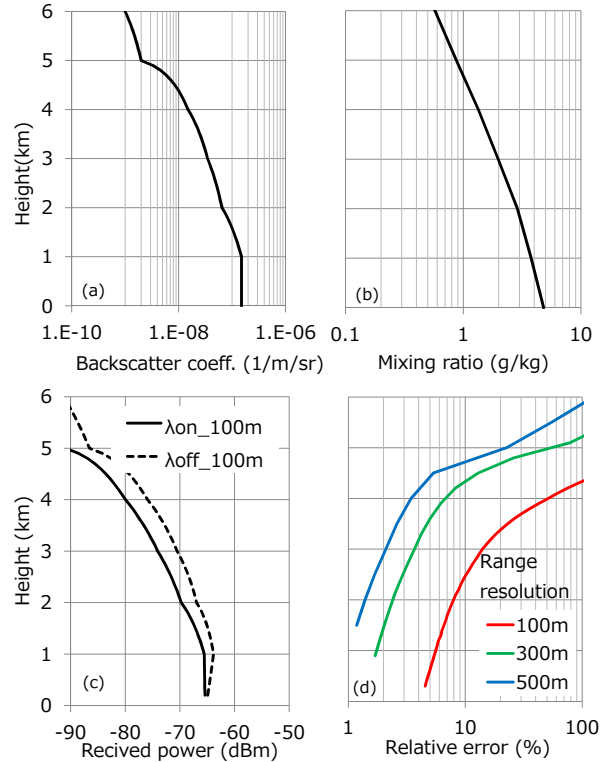


Figure 2. Height profile of (a) aerosol backscatter coefficient, (b) water vapor mixing ratio, (c) the received power for λ_{on} and λ_{off} at 100 m range resolution, and (d) the relative error of water vapor for 100 m, 300 m, and 500 m range resolution.

4. まとめ

1.53 μ m 帯コヒーレント差分吸収ライダーによる水蒸気計測の回線検討を実施した。計算の結果、高度 4.5km 以下において相対誤差 10%での測定を見積もることができた。今後、ベンチトップモデルによる検証を実施する。

参考文献

- 1) T. Sakai *et al.*, *Proc. of SPIE* **6367**, (2006) 63670D.
- 2) A. R. Nehrir, *et al.*, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **28** (2011) p.131.
- 3) S. M. Spuler, *et al.*, *Atmospheric Measurement Techniques* **8** (2015) p.1073.
- 4) M. J. Kavaya, *et al.*, *Appl. Opt.* **28** (1989) p.840.
- 5) R. M. Hardesty, *Appl. Opt.* **23** (1984) p.2545.
- 6) G. P. Anderson, *et al.*, AFGL-TR-86-0110, (1986).
- 7) J. D. Spinhirne, *et al.*, *Appl. Opt.* **36**, (1997) p.3475.