

鉛直風計測のためのインコヒーレントドップラーライダー用

エタロンの特性評価

富永 寛菜¹, 石井 昌憲², 青木 誠², 柴田 泰邦¹, 西澤 智明³, 神 慶孝³, 岡本 創⁴

¹ 首都大学東京 (〒191-0065 日野市旭が丘 6-6)

² 情報通信研究機構 (〒184-0015 東京都小金井市貫井北町 4-2-1)

³ 国立環境研究所 (〒305-0053 茨城県つくば市小野川 16-2)

⁴ 九州大学 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

Development Measurement and evaluation of etalon filter based on Incoherent Doppler lidar for vertical wind measurements

Kanna TOMINAGA¹, Shoken ISHII², Makoto AOKI², Yasukuni SHIBATA¹, Tomoaki NISHIZAWA³, Yoshitaka JIN³ and Hajime OKAMOTO⁴

¹ Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

² National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 NukuiKita, Koganei, Tokyo 184-0015

³ National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-0053

⁴ Kyushu University, 744 Motooka, Nishi, Fukuoka, Fukuoka 819-0395

Abstract: Cloud Profiling Radar onboard the EarthCARE satellite is the radar that can measure the vertical wind velocity from the space. In order to validate the wind accuracy of the satellite measurements, we are developing a ground-based double edge Doppler lidar system that measures the vertical wind in the clouds. The laser wavelength of this Doppler lidar is 355 nm which is high sensitive to Rayleigh-Brillouin scattering. The etalon filter is a commonly employed instrument for resolving the spectrum of Rayleigh-Brillouin scattered light for the purpose of evaluating wind velocity. In this paper, the transmission spectrum of the etalon filter designed for this Doppler lidar and its characterization are reported.

Key Words: Laser, LIDAR, Doppler lidar, Etalon, Double-edge

1. はじめに

気候変動予測の不確定性の 70%程度は雲が原因であるとされている。その中、現在の気象大循環モデルを用いた再現性はモデル間で 10 倍以上の開きがある。現在打ち上げが予定されている、雲レーダーとライダー搭載の衛星 (EarthCARE) に期待される一つに、雲内鉛直分布の抽出がある。

そこで、地上と衛星ライダーに存在するスケールギャップを埋め、衛星解析技術の向上を狙うため、雲内部の鉛直風を測定する地上設置型ドップラーライダーシステムの構築を目指している。エアロゾルが卓越する高度領域では、エアロゾルに対して感度の高い 1.5 μm ~2.0 μm の近赤外波長を利用したコヒーレント方式のドップラーライダーが有利だが¹、本研究では光学的に厚い雲のドップラー速度観測を行うため、近赤外波長では雲内部での減衰が著しい。そこで、短波長において感度の高い大気分子からのレイリー散乱を利用するインコヒーレント方式を適用する²⁻⁴⁾。波長は Nd:YAG レーザ第 3 高調波の 355nm、ドップラー周波数検知には 2 つのエタロンを用いるダブルエッジ法を採用する^{2,3)}。本研究ではエタロンの設計、及び性能評価と、シミュレーションによるシステム誤差の検討結果について報告する。

2. フィルター設計シミュレーション

本研究で用いるインコヒーレント・ドップラーライダーでは、Fig.1 に示すように Edge1 と Edge2 の 2 つのエタロンをバンドパスフィルターとして用いて散乱光を分光する。レイリー散乱は大気分子の熱運動による広いスペクトルを持ち、ミー散乱はほぼレーザスペクトル幅と同じ狭い幅を持つ。2 つのエタロンをレイリー散乱の両裾に

配置すると、それぞれのエタロンを透過する信号強度 I_1, I_2 は、風によるドップラーシフトに応じて増減する。

エタロンは二つの対向する反射ミラーの多重干渉を利用したバンドパスフィルターである。波長 (周波数) 領域において、周期的な透過ピークを持ち、半値幅の狭い鋭い透過特性を得ることができる。エタロンの透過特性は主に透過波形の周期を表す FSR (Free Spectral Range) と Finesse (FSR/ピーク半値幅) により特徴づけられる。エタロンの透過特性は式(1)で与えられる。

$$T(\lambda) = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \quad (1)$$

ここで、 R はミラーの反射率である。 δ は位相差を表し、式(2)で与えられる。

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nd \cos \theta \quad (2)$$

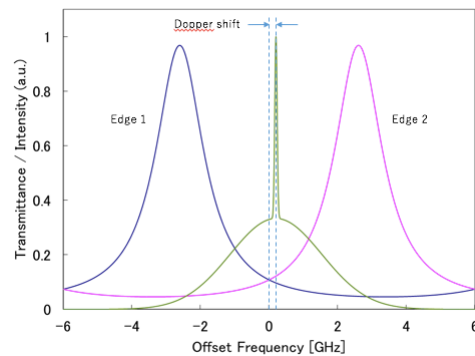


Fig.1 Relation between etalon filters (Edge 1 and Edge 2) and the lidar backscattered spectrum.

Table 1 Etalon characteristics.

Wavelength (nm)	355
Effective finesse	7
Free spectral range (GHz)	12
Tmax (%)	96.8
Spectral width (FWHM, GHz)	1.7
Etalon separation (GHz)	5.21
Reflectance ($\pm 1.5\%$)	65
Air gap (mm)	12.5

Table 2 Atmospheric characteristics.

Scattering ratio	3
Altitude (km)	1
Temperature (K)	281.65

n は屈折率、 d はミラー間隔、 θ は入射角を表す。

ドップラーシフト成分 Δv_d は Edge 1, Edge2 を透過する受信信号強度の比

$$R(\Delta v_d) = I_1(\Delta v_d)/I_2(\Delta v_d) \quad (3)$$

から求めることができる。

測定感度 θ を

$$\theta = \frac{1}{R(\Delta v_d)} \frac{d}{dv} R(\Delta v_d) \quad (4)$$

と定義すると、ドップラーシフトに対する測定感度 θ は Fig.2 で表せ、約 $0.7\%/(\text{m/s})$ となる。また、視線方向の風速誤差 ε は信号雑音比 S/N を用いて次式で表せる^{2,3)}。

$$\varepsilon = \frac{1}{\theta \cdot (S/N)} \quad (5)$$

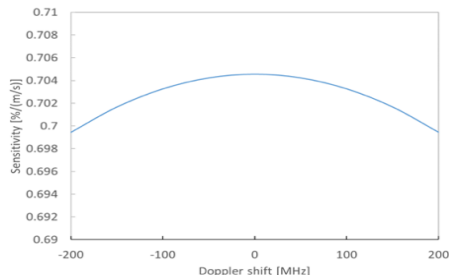


Fig.2 Simulation result of θ as function of Doppler shift Δv_d .

3. フィルター性能評価

エタロンフィルターの性能を評価するため、 35°C に設定した Table1 のエタロンに、波長 355nm の Nd:YAG レーザーの第 3 高調波を照射し、レーザー波長を 5pm 間隔でスキャンしてスペクトルを測定した。Fig.3 にエタロン透過スペクトル測定のための機器構成図を示す。光検出器 1 でエタロン透過後の信号強度を、光検出器 2 ではエタロンの前に偏角 0.1° のウェッジプリズムを設置し、ウェッジプリズムで入射角を偏向したエタロン透過信号強度をそれぞれ測定した。光検出器 1 と光検出器 2 で測定した波長毎の透過信号強度、及び測定データを非線形最小二乗近似した近似曲線を Fig.4 に示す。

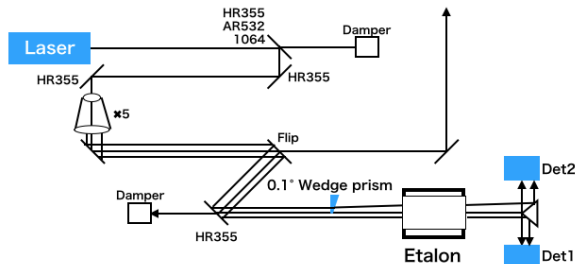


Fig.3 System configuration diagram of etalon transmission spectrum measurement.

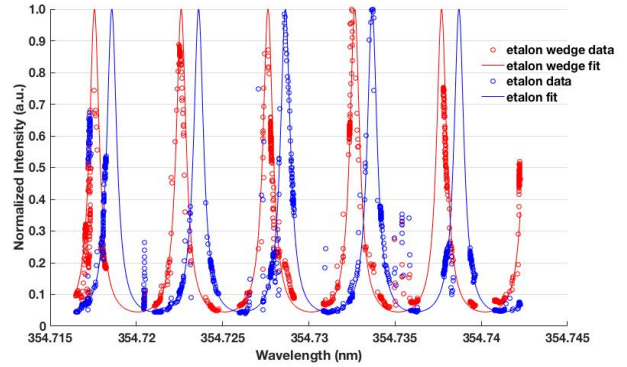


Fig.4 Experimental result of transmission intensity and curve fitting of experimental data.

近似曲線のパラメーターは、干渉間距離 $d = 12.5\text{mm}$ 、偏角 $\varphi = 0.12^\circ$ となり、FSR = 12.0GHz 、Finesse = 7.24 (355nm) のエタロン透過特性が得られた。ウェッジプリズムの偏角に許容誤差 1 分を超える 1.2 分の誤差が出てしまった。これは、データ点数の不足による Table 1 と比較すると、FSR, Finesse 共に許容誤差範囲内の値であり、仕様通りのエタロンが得られた。しかし、この結果はレーザー光の拡がり角が小さい理想的な状態である。実際の光学系で用いる場合、光ファイバーから出射し、更にビームエキスパンダーを通過するため、光の拡がり角は大きくなる。光の拡がり角が大きくなった場合、透過スペクトルのピーク値は下がり、スペクトル幅は広がる。したがって、光の拡がり角を考慮した光学系の検討が必要である。

4. まとめ

鉛直流を計測するためのインコヒーレント方式ダブルエッジ・ドップラライダーに用いるエタロンの設計と性能について数値シミュレーション、実測により評価した。測定感度は約 $0.7\%/(\text{m/s})$ となることが分かった。次に、フィルター性能評価のため、波長 355nm のレーザー光を用い信号強度測定を行った結果、FSR = 12.0GHz 、Finesse = 7.24 (355nm) のエタロン透過特性を得た。しかしこの結果は光の拡がり角が小さい場合であり、実際には光の拡がり角は大きく透過スペクトルの形状に影響する。そのため、光の拡がり角の大きさを考慮した光学系の検討が必要である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 17H06139 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) S. Ishii, et al., *J. Meteor. Soc. Japan*, Ser. II, 85, 797 (2007).
- 2) C. Flesia, et. al., *Appl. Opt.*, 38, 432 (1999).
- 3) C. L. Korb, et al., *Appl. Opt.*, 31, 4202 (1992).
- 4) Y. Shibata, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 48, 032401 (2009)