

衛星搭載に向けた直接検波式ドップラー風ライダーの シミュレーター開発

田之上 菜美¹, 竹中 秀樹¹, 西澤 智明², 神 慶孝², 岡本 創³, 石井 昌憲¹

¹ 東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

² 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

³ 九州大学 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

Development of simulator for future space-based direct-detection Doppler wind lidar

Nami TANOUE¹, Hideki TAKENAKA¹, Tomoaki NISHIZAWA², Yoshitaka JIN², Hajime OKAMOTO³,
and Shoken ISHII¹

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

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

³ Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi, Fukuoka, Fukuoka 819-0395

Abstract: Meteorological data with high temporal and spatial resolutions and wide three-dimensional distributions are required for numerical weather prediction with high accuracy. However, current global wind profiling with a space-based passive sensor observation does not meet the World Meteorological Organization user requirements. A space-based Doppler wind lidar has potential for providing us three-dimensional global wind profiles. The purpose of the research is to develop a new simulator for evaluating measurement performance of a future space-based direct-detection Doppler wind lidar. The paper describes the overviews of the development of the simulator and optimization of the optical receiver performance.

Key Words: Lidar simulator, Direct-detection, Doppler wind lidar, Global profiling

1. はじめに

数値気象予測モデルの理論的境界は約 2 週間とされている¹⁾。理論境界まで到達するためには数値予報の精度向上が課題となっており、高精度・高頻度・広範囲な 3 次元分布の気象データが必要である²⁾。数値予報において、初期条件として与える気象データのうち、必要な初期条件の精度を満足していないのが風、特に全球での高度分布である。様々な方法で風観測が行われている中、風の高度分布を 3 次元的に全球で得られる計測技術が衛星搭載ドップラー風ライダーである²⁾。ESA が 2018 年に Aeolus を打ち上げたが、運用期間終了が迫っているため、次号機の検討が始まっている。本研究は全球での風の高度分布を測定する衛星搭載ドップラー風ライダーの風観測性能を評価するために、直接検波式ドップラー風ライダーのシミュレーターを開発し、ライダーシステムの観測性能を評価することを目指している。光学性能最適化のシミュレーション結果について示す。

2. シミュレーターの概要

Aeolus 直接検波式ドップラー風ライダーのダブルエッジ法を適用する。Figure 1 にダブルエッジ法の原理を載せる。ダブルエッジ法とは、分光するためのフィルターとして 2 つのファブリーペローエタロン（以下エタロンと略す）を対向して置き、受信光の周波数の変化量を光の強度変化に変え、ドップラー周波数シフトを決定し、風速を導出する手法である¹⁾。

本シミュレーターではレーザー波長に Nd:YAG レーザーの第 3 高調波である 355 nm、受信望遠鏡の口径は 1.5 m、光検出器には光電子倍增管を使用する。気温や気圧は US Standard Atmosphere, 1976³⁾を参照する。視線方向風速 v_{LOS} (m/s)は

$$v_{LOS} = \frac{\lambda_L}{2} \Delta\nu = \frac{c}{2\nu_L} \Delta\nu \quad (1)$$

ここで、 λ_L (m)はレーザー波長、 $\Delta\nu$ (Hz)はドップラー周波数シフト、 ν_L (Hz)はレーザー周波数、 c (m/s)は光

速.

後方散乱された大気分子の受信信号 $S_i(W)$ は(2)式で与えられる.

$$S_i = \int_{-\infty}^{\infty} T_i(v - v_i) P_R[v - (v_L + \Delta v)] dv \quad (2)$$

ここで, $P_R(W)$ は大気分子からの後方散乱信号, v_i (Hz)は各フィルターのピーク周波数を示す. 測定感度 ϕ (/m/s) は(3)式で与えられる.

$$\phi = \frac{1}{S_i(v_i, v_i)} \frac{d}{dv} S_i(v_i, v_L) \times \frac{2}{\lambda \Delta v} \quad (3)$$

ここで, λ (m)はレーザー波長である.

風速誤差 ε (m/s)は(4)式で与えられる.

$$\varepsilon = \frac{1}{\phi \times (SNR)} \quad (4)$$

SNRは信号対雑音比(Signal to Noise Ratio) である.

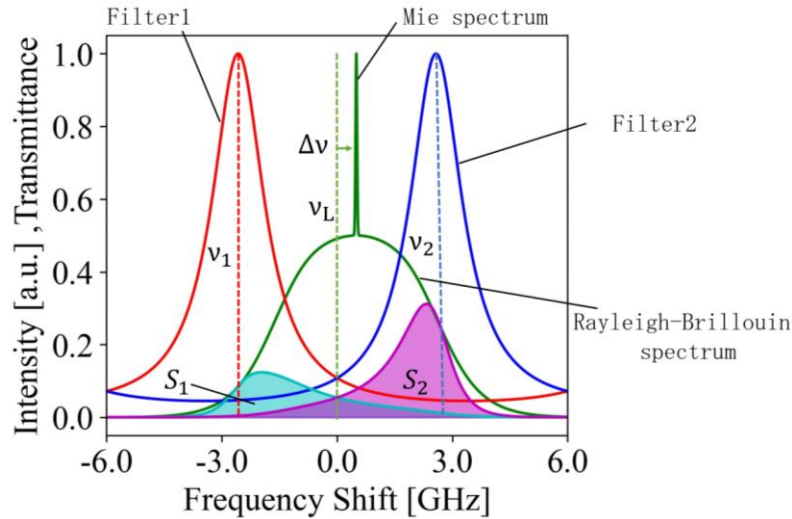


Figure1. Theoretical diagram of the double-edge measurement of frequency shifts of the Rayleigh-Brillouin scattering spectrum with two filters at frequencies v_1 and v_2 .

3. 光学性能最適化実験

ライダーシステムの観測性能を評価するために光受信機の光学効率を最適化するシミュレーション実験を行った. シミュレーション条件として, 雲やエアロゾルによるミー散乱を考慮せず, 大気分子によるレイリーブリルアン散乱のみと仮定した. Figure 2(a)に高度 0, 10, 30 km におけるエタロンピーク間隔と測定感度の関係を示す. ピーク間隔が大きくなるにつれて(3)式で与えられる測定感度も大きくなるが, 約 6 GHz の時に最大値約 0.007 1/(m/s)をとり, それ以降は間隔が広くなるにつれて小さくなる. また, ピーク間隔が約 7 GHz 以下の時は高度による測定感度の差が大きい, 約 7 GHz 以上の時は測定感度の差は非常に小さい. 測定感度の最大値はピーク間隔約 6 GHz だが, 高度依存性は小さい方が好ましいため, エタロンピーク間隔は約 7 GHz に設定した方が良かった. Figure 2(b)に高度 0, 10, 30 km のエタロンの半値全幅と測定感度の関係を示す. 半値全幅が小さくなるほど測定感度は高くなる. これは透過する光のスペクトル幅が狭くなるためだと考えられる. また, エタロンの半値全幅が小さくなるほど高度による測定感度の差が大きくなる. 半値全幅を小さくすると高度依存性が高くなるため, 高度依存性と半値全幅を併せて最適化する必要がある.

Figure 3 に Table 1 に先行研究⁴⁾で用いられたシステムパラメーター (赤線) と本研究で用いられたパラメーター (青線) を使ってシミュレートされた風速誤差の高度分布を示す. 高度が高くなるにつれて風速誤差は大きくなる. 先行研究の風速誤差は 4.5 m/s 以下, 本研究の風速誤差は 3.5 m/s 以下となり, 性能が向上出来ることが分かった.

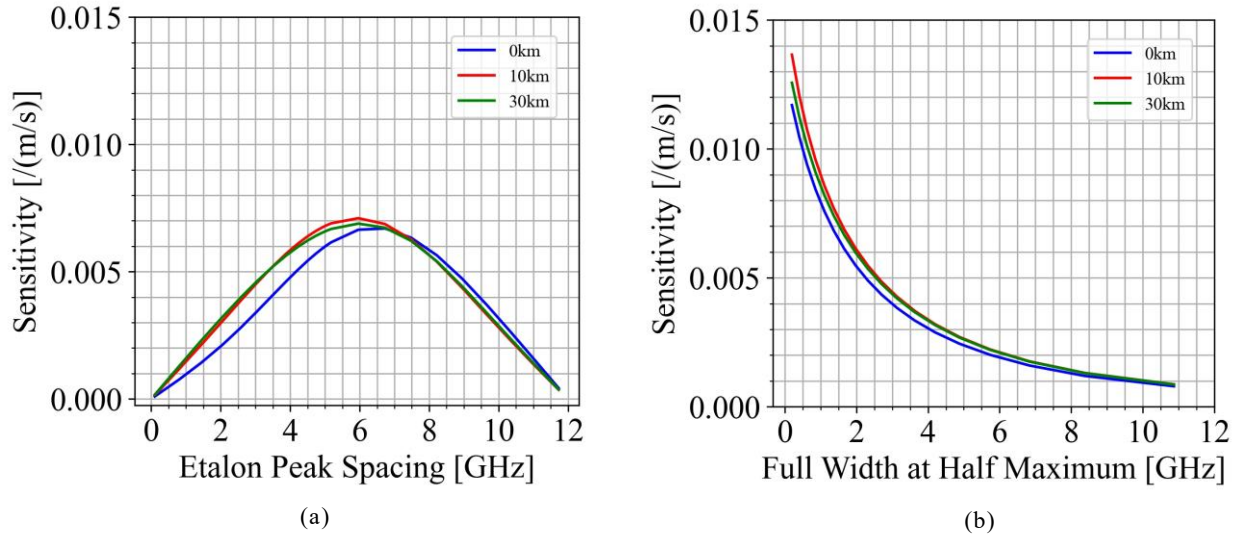


Figure 2. (a) Etalon peak spacing and sensitivity at three altitudes of (blue) 0, (red) 10, and (green) 30km. (b) Full width at half maximum and sensitivity at the three altitudes.

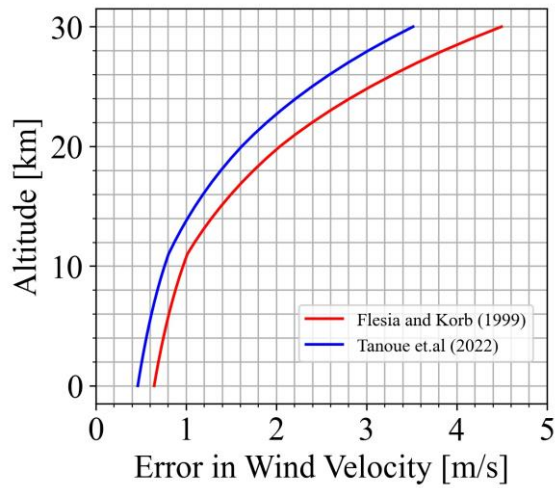


Figure 3. Error in wind velocity and altitude

Table1. Satellite lidar system simulation

Attribution	Flesia and Korb (1999)	Tanoue et.al (2022)
Satellite Altitude (km)	400	
Wavelength (nm)	355	
Pulse energy (J)	1	
Telescope diameter (m)	1.5	
Spatial resolution (km × km)	200×200	
Vertical resolution (km)	1	
Shots averaged	72	
Repetition rate (Hz)	20	
Nadir angle (°)	35	
Quantum efficiency	0.25	
Optical efficiency	0.46	
Air gap of etalon (mm)	12.5	
Free spectral range (GHz)	12	
Etalon Peak Spacing (GHz)	5.21	7.48
Full width at half maximum of Etalon (GHz)	1.70	1.37

3. まとめ

将来の直接検波式ドップラー風ライダーの観測性能を評価することを目的として、直接検波式ドップラー風ライダーのシミュレーターの開発を開始し、受信光学性能の最適化に関するシミュレーション実験を行った。エタロンピーク間隔は約 7 GHz の時、半値全幅は小さくなるほど測定感度は高くなることが分かった。風速誤差も 4.5 m/s 以下から 3.5 m/s 以下に小さくすることが出来た。

今後はエアロゾルや大気分子分布作成、擬似受信信号生成のアルゴリズム開発、気象場を用いたシミュレーション実験、システム性能評価を行う。また、ダブルエッジ法以外の手法として、マイケルソン干渉計やマッハツェンダー干渉計を使用したシステムも検討しながら直接検波式ドップラー風ライダーのシミュレーターの開発を進めていく予定である。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 17H06139 の助成を受けた。

参考文献

- 1) 田中 豊顕, 小林 隆久, 水野 量 : 気象研究ノート第 194 号 (日本気象学会, 1999) p.155-168
- 2) 情報通信研究機構 : 宇宙からの風, 閲覧日 2022 年 8 月 1 日, <https://www2.nict.go.jp/res/lidar/p7.html>
- 3) U.S. Standard Atmosphere, 1976 (University of Michigan Library, 1976) p.50-159
- 4) C. Flesia and C. Korb: *Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement* (Appl. Opt, 38(3), 1999) p.432-440