

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: Three-dimensional meteorological elements with high temporal and spatial resolutions 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 with a new approach that uses combination of Michelson interferometry and Fabry-Perot etalon. The paper describes the overviews of the development of the simulator, and results of wind measurement performance.

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

1. はじめに

数日先の天気や局地的な気象現象を時間と場所を特定して予測することは困難である¹⁾。気象予報に用いられる数値気象予測モデルの精度向上のためには、高精度・高頻度・高解像度な4次元分布(緯度, 経度, 高度+時間)の気象データが必要である。現在, 対流圏・下部成層圏の3次元風観測の精度は世界気象機関のユーザー要求を満たしていない²⁾。欧州宇宙機関は, 2018年8月に全球で風の高度分布を観測するために, ドップラー風ライダーを搭載した衛星 Aeolus を打ち上げ, 風の高度分布が数値気象予報に大きな効果があることを示したが, 2023年7月にその運用を完全に終えた。そのため風の高度分布を観測する, 次世代の衛星搭載ドップラー風ライダーが期待されている。

本研究はマイケルソン干渉計とファブリーペローエタロン(以下エタロンと略す)を組み合わせた新たな分光法を用いる衛星搭載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的とする。

2. シミュレーターの概要

2.1 エタロンを用いた分光法³⁾

エタロンを用いる分光法はダブルエッジ法を適用する。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つのエタロンを対向して置き, 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, 視線方向の風速を導出する手法である。

視線方向風速 v_{LOS} (m/s)は(1)式で与えられる。

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

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。

また, 風速誤差 ε (m/s)は(2)式で与えられる。

$$\varepsilon = \frac{1}{\phi \times (SNR)} \quad (2)$$

ここで ϕ (/m/s)は測定感度, SNR は信号対雑音比(Signal to Noise Ratio)である。

2.2 マイケルソン干渉計を用いた分光法⁴⁾

ダブルエッジ法では、雲・エアロゾルなどのミー散乱粒子からの信号は、システムバイアスの要因となるため、その影響を抑制する必要がある。レイリーブリルアン散乱とミー散乱にマイケルソン干渉計を用いると、ミー散乱信号を多く通すエアロゾルチャンネルと、抑制する大気分子チャンネルに分割できる⁴⁾。マイケルソン干渉計は入射光をビームスプリッターで2光路に分けて光路差を作る。その後、光を再度合成することで干渉を起こす光学装置である。ミー散乱信号が抑えられる大気分子チャンネルを使用すると、測定感度が向上し、風速誤差を小さく出来る可能性があるため、本研究ではマイケルソン干渉計とエタロンを組み合わせる新たな受光手法を提案している。

Figure1(a)-(d)はそれぞれ、レイリーブリルアン散乱とミー散乱の周波数スペクトル、(b)はマイケルソン干渉計を用いた分光法の周波数スペクトル、(c)はレイリーブリルアン散乱とミー散乱に対し、マイケルソン干渉計を通した後の大気分子チャンネルの周波数スペクトル、(d)はマイケルソン干渉計とエタロンを組み合わせる新たな受光手法による周波数スペクトルの概要を示す。Figure1(d)に示される網掛け部分は後方散乱された粒子の受信信号である。

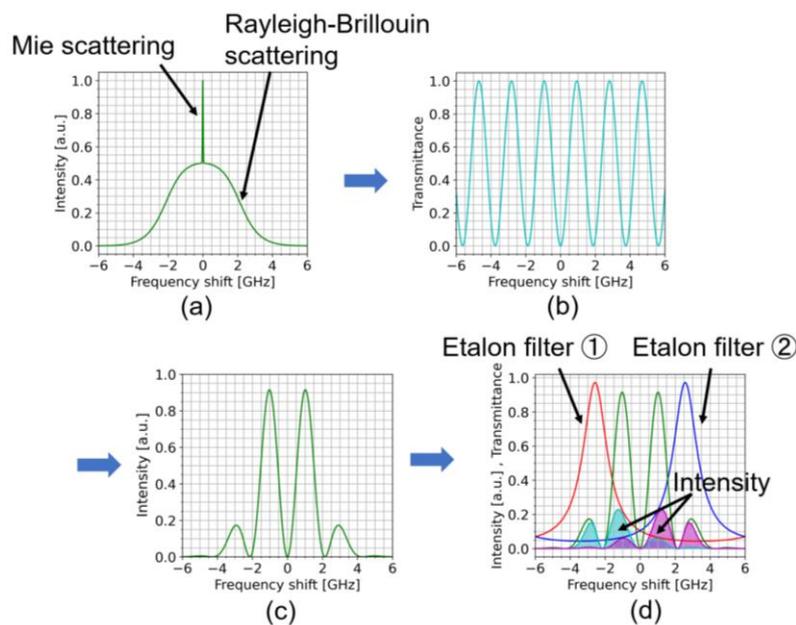


Figure1. (a)The frequency spectrum of Rayleigh-Brillouin scattering and Mie scattering. (b)The transmittance of Michelson interferometer. (c) The frequency spectrum of the atmospheric molecular channel. (d) Theoretical diagram of Michelson interferometer and the double-edge measurement.

3. シミュレーション実験

3.1 エタロンのみの手法とマイケルソン干渉計とエタロンを組み合わせる手法の風観測性能の比較

本シミュレーションは衛星高度 320 km、レーザーパルスエネルギー 80 mJ、垂直分解能 1 km、水平分解能 90 km を衛星風観測条件として、エタロンのみの場合とマイケルソン干渉計とエタロンを組み合わせた場合の測定感度や風速誤差についてシミュレーション実験を行う。レーザーは波長が Nd:YAG レーザーの第 3 高調波である 355 nm、出力が 80 mJ、繰り返し周波数 50.5 Hz のパルスレーザーを使用する。受光部は直径 1.5 m のカセグレン式望遠鏡、光検出器には光電子増倍管を使用する。気温や気圧は US Standard Atmosphere, 1976⁵⁾を、大気分子とエアロゾル・雲の混在度合いを示す後方散乱比(Scattering Ratio: SR)は RMA モデル⁶⁾を参照する。具体的なシミュレーションパラメーターは Table 1 に示す。

Figure 2 の結果より、測定感度はエタロンのみの手法で 0.0063-0.0070/(m/s)、マイケルソン干渉計とエタロンを組み合わせた場合は 0.0075-0.0092/(m/s)となり、後者の方が高くなる。風速誤差は 0-5 km の低高度ではエタロンのみの手法の方が約 0.1 m/s 小さくなるが、高度 6-30 km では約 0.05 m/s マイケルソン干渉計とエタロンを組み合わせた手法の方が小さい。このことから、マイケルソン干渉計を使用することで雲やエアロゾルなどのミー散乱成分を抑えることが出来るため、測定感度が向上し、風速誤差を小さく出来ることが分かった。

3.2 衛星風観測システム条件による比較

マイケルソン干渉計とエタロンを組み合わせる手法に対し，衛星高度を 300-500 km，レーザーパルスエネルギーを 50-200 mJ，垂直分解能を 500 m-2 km，水平分解能を 20-90 km と変化させた場合の風速誤差のシミュレーション実験を行う。

Figure 3 の結果より，衛星高度は低く，レーザーパルスエネルギーは大きく，垂直分解能と水平分解能は大きくした方が風速誤差は小さくなることが分かった。

Table1. Satellite lidar system simulation

	Attribution	Value
Satellite	Mean altitude (km)	320
	Nadir angle (°)	35
Doppler Wind Lidar	Horizontal resolution (km)	90
	Vertical resolution (km)	1
	Wavelength (nm)	355
Laser Transmitter	Energy per pulse (mJ)	80
	Repetition rate (Hz)	50.5
	Primary mirror diameter (m)	1.5
Telescope	Etalon peak spacing (GHz)	5.21
Fabry-Perot Etalon	Full width at half maximum of etalon (GHz)	1.56
	Quantum efficiency	0.2
Detection Unit	Optical efficiency	0.3
	Unknown factor	0.2
	Refractive index of glass	1.4765
Michelson Interferometry	Refractive index of air	1.0003
	Optical path difference (m)	0.0320

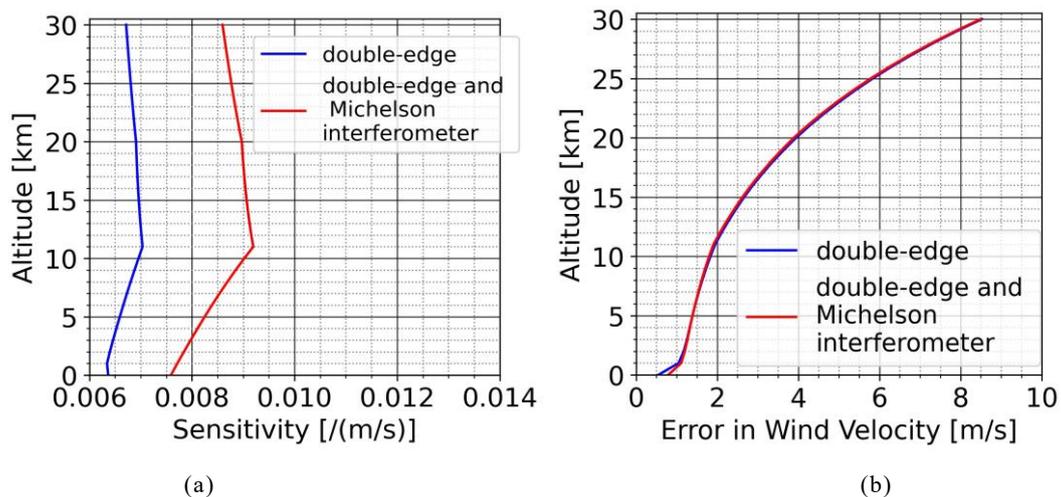


Figure2. (a) Comparison of the sensitivity and altitude at two techniques of (blue) simple double-edge, and (red) combination of double-edge and Michelson interferometer. (b) Comparison of error in wind velocity and altitude at two techniques.

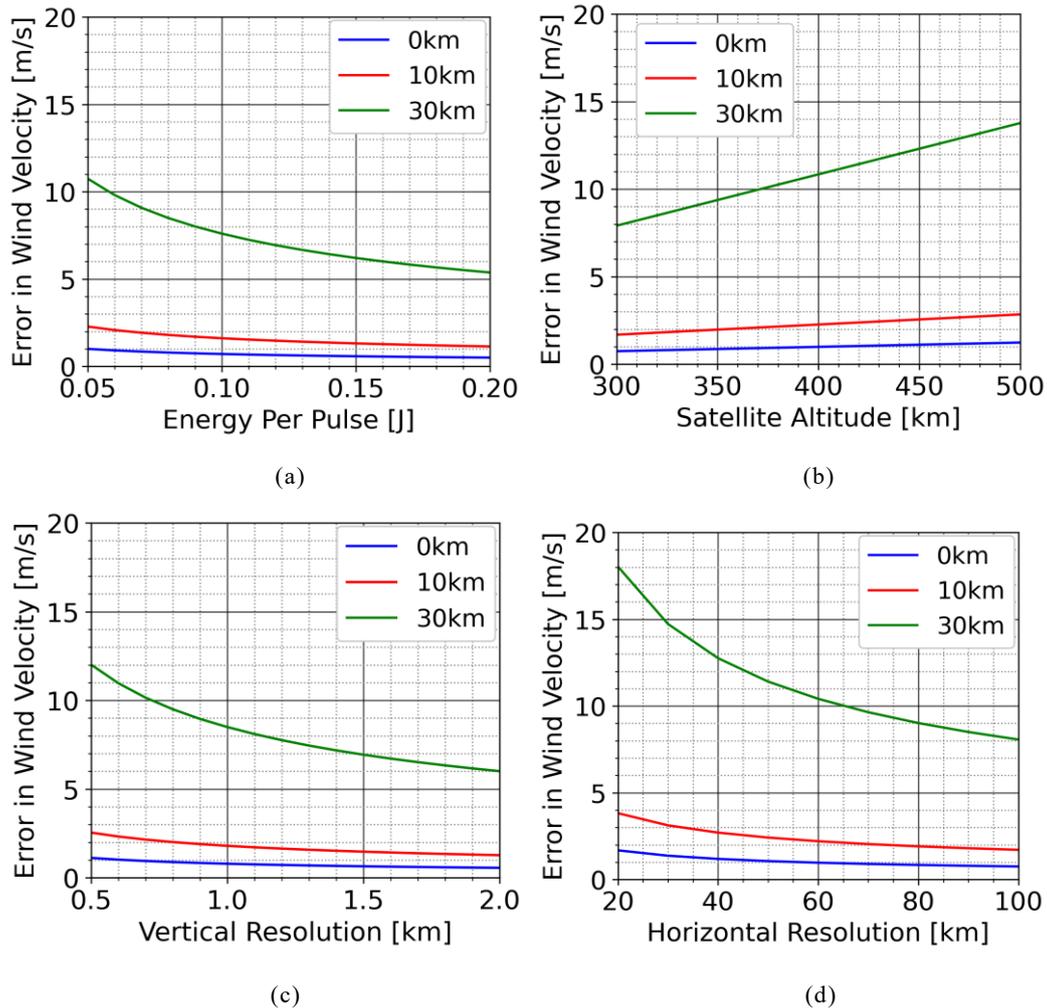


Figure3. Comparison based on satellite wind observation system conditions in combination of double-edge and Michelson interferometer techniques at three altitudes of (blue) 0, (red) 10, and (green) 30km: (a)Satellite Altitude and error in wind velocity. (b)Energy per pulse and error in wind velocity. (c)Vertical resolution and error in wind velocity. (d)Horizontal resolution and error in wind velocity.

4. 結論

将来の衛星搭載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、マイケルソン干渉計とエタロンを組み合わせた新たな手法による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を進めている。シミュレーション実験により、エタロンのみを使用した手法と、マイケルソン干渉計とエタロンを組み合わせた手法を比較すると後者が高い測定感度を持つと分かった。また、搭載する衛星やドップラー風ライダーのシステム条件を変化させた結果、風速誤差を小さくするためには、衛星高度は低く、レーザーパルスエネルギーは大きく、垂直分解能は大きく、水平分解能は大きくした方が良いことが分かった。

参考文献

- 1) 気象庁：令和元年度数値予報研修テキスト「最近の数値予報システムとガイダンスの改良について」, 2019
- 2) OSCAR: <https://space.oscar.wmo.int/> (閲覧日 2023年5月11日)
- 3) C. Flesia and C. Korb: *Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement* (Appl. Opt, 38(3),1999) p.432-4404)
- 4) Don. Liu, et al: *System analysis of a tilted field-widened Michelson interferometer for high spectral resolution lidar* (Opt. Express, 20(2), 2012) p.1406-1420
- 5) U.S. Standard Atmosphere,1976 (University of Michigan Library, 1976) p.50-159
- 6) ESA: *ADM-Aeolus Algorithm Theoretical Basis Document ATBD Level1B Products* (2018)