

衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダーのためのシミュレータ開発と 性能評価

山中 沙羅¹, 石井 昌憲^{*1}, 竹中 秀樹¹, 岡部 いくみ², 岡本 幸三²

¹東京都立大学 (〒195-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

²気象庁気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

Development of lidar simulator for space-based coherent Doppler wind lidar and its performance study

Sara YAMANAKA¹, Shoken ISHII¹, Hideki TAKENAKA²,

Kozo OKAMOTO², and Izumi OKABE²

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

²Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine Tsukuba, Ibaraki 305-0052

Abstract: Wind is an important meteorological element as a comprehensive indicator of atmospheric motion. Current wind observations vary widely in the number of observation points from region to region. This causes errors in numerical weather prediction due to spatial inhomogeneity. Earth observation satellites are very effective in obtaining uniform data over a wide area. It is important to assess measurement performance of each sensor onboard a satellite before its launch of the satellite. We are developing a new coherent Doppler wind lidar simulator to assess the system performance on wind measurement. In the new simulator, system parameters set such as pulse energy, pulse repetition frequency, heterodyne efficiency, optical efficiency, orbital altitude of satellite and so on. The new simulator generates pseudo-optical heterodyne signals in the time domain and performs frequency analysis in the frequency domain. In this paper, we describe the new coherent Doppler wind lidar simulator.

Key Words: Lidar, Doppler Wind Lidar, coherent, space-based, simulator

1. はじめに

風は、気圧、気温、湿度等のように大気の状態を表す基本的かつ重要な気象変数の1つであるため、全球での4次元観測が望まれている。風は重要かつ基本的な気象要素にも関わらず、現在の全球観測システムでは、海洋、熱帯、南半球において、直接的な風速観測は行われておらず、地域による観測点数の差が大きい。また、ほとんどの衛星風観測技術は、雲または水蒸気を追跡する風観測（衛星大気追跡風）であるため、雲または水蒸気の領域に限られる¹⁾。衛星大気追跡風は、広域・高頻度で観測可能だが、高度推定、鉛直解像度、観測精度、晴天・乾燥域や中層の風観測に課題がある。次期の静止気象衛星・ひまわりに搭載予定のハイパー赤外サウンド観測による衛星大気追跡風は、これらの課題が改善することが期待されているが、パッシブセンサの観測による高度推定には限界があるため、高精度・高鉛直解像の観測行える衛星センサが必要である。欧州宇宙機関は、数値予報に入力される全球の風の初期値の改善と、全球および領域スケールでの大気力学現象の理解とモデリングの深化を目的として、2018年8月にドップラー風ライダーを搭載した風観測衛星 *Aeolus* を打ち上、風の高度分布観測の重要性を明らかにし、2023年7月に運用を終えた。

日本でも、将来の全球風観測のための衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダーの実現可能性が検討されており、観測性能の評価のためにシミュレータが活用されている²⁻⁴⁾。しかしこれらの研究で用いられてきた衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダーシミュレータは、高解像度化に必要なパラメータの設定が煩雑な上、各高度で取得できるデータ点数に差異があるなどの課題があった。そのため、シミュレーションにおいて必要とされるパラメータ設定が容易で、かつ、アジャイルに開発を進められる高解像度のシミュレータの開発が求められている。東京都立大学では、気象研究所にご協力を頂きながら、現在の課題を解決し、全球で風の高度分布観測シミュレーションを行え、衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダーの観測性能を評価出来るシミュレータの開発を推進している。本発表では、開発を進めている *End-to-End* 型の衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダーのためのシミュレータ開発とシミュレータの性能評価について報告を行う。

2. 衛星搭載ドップラー風ライダーシミュレータ

東京都立大学で開発されている衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダーシミュレータは、ライダーシステムパラメータ、気象場、エアロゾルデータ等を入力値として与え、受信信号スペクトル(周波数領域)、受信電力、信号対雑音比をシミュレートする。理想的な受信信号スペクトルにランダムな雑音を重畳し、逆フーリエ変換を用いて時間領域に変換することで、1レーザパルス毎に光ヘテロダイン検波から出力される受信信号(時間領域)が得られる。受信電力とSNRは、式(1)と式(2)で与えられる。

$$P = \frac{\eta A \beta(R) K(R)^2 U c}{R^2} \quad (1)$$

$$SNR = \frac{\eta P}{h f_L B} \quad (2)$$

ここで、 P は受信電力、 A は受光面積、 $\beta(R)$ は後方散乱係数、 $K(R)$ は大気透過率、 U は送信レーザの出力、 f_L はレーザの発振周波数、 R はライダーから観測領域までの距離、 η は光ヘテロダイン受信機のシステム効率、 B は光ヘテロダイン受信機の帯域幅、 c は光速、 h はプランク定数である。

時間領域の疑似受信信号は、実現可能なドップラー風ライダーの信号処理部の性能に基づいて、フーリエ変換を用いて周波数領域に変換し、1ショット毎のパワースペクトル密度を得る。空間解像度に応じた積分を行い、1レンジ毎の風速を決定する。さらに、空間解像度に対応する複数レンジビンの風速と最尤推定法を用いて、平均周波数と標準偏差を得る。確率密度関数は、式(3)で与えられる：

$$PDF(x) = \frac{P_{be}}{V_s} + \frac{1 - P_{be}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(f - f_m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

ここで、 f は周波数、 V_s は風速探索範囲、 P_{be} は風速探索範囲外にある外れ値の割合、 f_m と σ は、ある空間領域における風の平均周波数とその標準偏差である。風速探索範囲は、平均周波数から、式(4)で与えられる有効スペクトル幅 W_{eff} の ± 3 倍幅(全幅は σ の 6 倍)として設定した。

$$W_{eff} = \sqrt{w_{tb}^2 + w_{shr}^2 + w^2 + w_{LO}^2} \quad (4)$$

ここで、 w_{tb} は乱流寄与分によるスペクトル幅、 w_{shr} は鉛直シア寄与分によるスペクトル幅、 w_L はレーザのスペクトル幅、 w_{LO} は 1 ショット毎のゼロドップラー速度に対する無相関の標準偏差である。

3. シミュレーション実験

風観測シミュレーション実験は、衛星高度 300 km、水平解像度 50 km、鉛直解像度は高度 0 - 12 km に対し 0.5 km、高度 12 - 20 km に対し 1.0 km として実施した。風速や風速誤差の高度プロファイルを比較することで、本シミュレータの妥当性を検証した。本シミュレータで採用されている風観測の品質管理手法は、先行研究で開発されたシミュレータでは行われていない受信スペクトル幅による風速探索範囲を設定したことである。この品質管理手法により、利用出来るデータ数を先行研究のシミュレータよりも大幅に増加することが出来た。シミュレータへの入力値の一つである気象場の風速とシミュレータの出力値である推定風速を統計的に検証したところ、相関係数 0.99、傾き 0.98、切片 0.01 と非常に高い相関関係が得られ、シミュレータが正しく動作し、風の推定アルゴリズムが妥当であることが示された。

4. まとめ

東京都立大学は、気象研究所のご支援を頂きながら、衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダーのためのシミュレータ開発を新たに行っている。本研究で開発を進めるシミュレータは、先行研究で開発されたシミュレータよりも利用出来るデータ点数が 4 倍増加し、入力値である気象場の風速に対し再現性高く出力されることが確認され、シミュレータが正しく動作していることが解った。発表当日は、開発しているシミュレータとシミュレーション性能の詳細な結果について報告する。

参考文献

- 1) Baker et al.: Bull. Am. Meteorol. Soc., **95** (2014), 543-564.
- 2) Ishii et al.: J. Meteor. Soc. Japan, **95** (2017), 301-317.
- 3) Baron et al.: J. Meteor. Soc. Japan, **95** (2017), 319-342.
- 4) Okamoto et al.: J. Meteor. Soc. Japan, **96** (2017), 301-317.