

次世代衛星搭載コヒーレントライダーのためのシミュレータ開発

山中 沙羅, 竹中 秀樹 石井 昌憲
東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Development of Simulator for Future Space Borne Coherent Doppler Wind Lidar

Sara YAMANAKA, Hideki TAKENAKA, and Shoken ISHII
Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract

Wind is an important meteorological element as 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. Therefore, satellite observations are very effective in obtaining uniform data over wide area, and it's important to evaluate the performance of wind measurements prior to launch. We are developing a new Coherent Doppler Wind Lidar (CDWL) simulator to assess the wind measurement performance. The simulator generates pseudo optical heterodyne signal in the time domain and performs frequency analysis in the frequency domain. The mean frequency and standard deviation of the pseudo optical heterodyne signal obtained by the maximum likelihood estimation are then obtained by using probability density function. Thus, pseudo-wind observation data are calculated. In this paper, we describe the development of the new CDWL simulator and the preliminary results of simulations.

Key Words: Lidar, CDWL, Satellite, Wind profiling, Lidar simulator

1. はじめに

風は大気を動かすため気圧配置と密接に関係し、総観規模な大気運動の指標として重要な気象要素である。風の観測値は気象予測精度の向上、異常気象予測など災害リスク低減、地球環境問題の改善に利用される。また持続可能な開発目標である SDGs (Sustainable Development Goals) では安全かつ強靱で持続可能な都市及び人間居住を実現する目標 11「持続可能な都市」や気候変動及びその影響を軽減するための緊急対策を講じる目標 13「気候変動」に関連し、風観測はよりよい社会の実現に必須である。現在の風観測システムは地域による観測点数の差が大きく、数値気象予報において誤差を生じさせている。そのため、広範囲を定期的に同一機器で観測できる衛星観測は非常に有用である¹⁾。世界気象機関が定めるユーザ観測要求の観測精度を満足していない観測の一つに風の高度分布観測がある。そのため、全球で風の高度分布を観測できる衛星センサーが望まれる²⁾。欧州宇宙機関は 2018 年に ADM-Aeolus の運用を開始し、全球 3 次元の風の場合解析を向上するために風のプロファイルを観測している。また、日本において全球風プロファイル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性検討が行われている。これまで衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダーの実現性検討に用いられてきたシミュレータは、高解像度化に必要なパラメータ設定が煩雑化している上、計算コストが大きいことが課題となっている。この課題を解決し高解像度なシミュレーションを行うことが出来るシミュレータの開発が求められている。

本発表では、全球で風の高度分布観測を可能な衛星センサーを実現するため、次世代衛星搭載コヒーレントドップラーライダーのためのシミュレータ開発について報告する。

2. 衛星搭載ライダーシミュレータ

本研究では、衛星搭載性、観測精度、風の高度分布の観測の必要性から、コヒーレントドップラーライダーを用いた視線方向の擬似風観測シミュレーションを実施した。散乱体の視線方向速度は、信号のドップラー周波数または平均周波数から推定される。平均周波数は、周波数スペクトルまたは共分散の推定値を用いて推定する。これらの値はライダーシステムのパラメータで決定される。受信電力 P [W] は式(1)で与えられる。 A は受光面積[m²]、 $\beta(R)$ は後方散乱係数[m⁻¹sr⁻¹]、 $K(R)$ は大気透過率[-]、 U はレーザ出力[J]、 c は光速

[m/s], R はレーザー照射距離[m]である。式(2)のライダー方程式を用いて信号対雑音比 SNR (Signal to Noise Ratio)を算出することで、各高度における周波数スペクトルの算出が可能となる。 η_H はヘテロダイン効率[-], η_Q は量子効率[-], η_O は光学効率[-], h はプランク定数[J_s], f はレーザー周波数[Hz], B はバンド幅[Hz]である。式(1), 式(2)から SNR は後方散乱係数 $\beta(R)$ に依存する。

$$P = \frac{AUc\beta(R)K(R)^2}{R^2} \quad (1)$$

$$SNR = \frac{\eta_H\eta_Q\eta_O P}{hfB} \quad (2)$$

時間領域における定常性をもつ受信信号の共分散関数 R_k は式(3)で与えられ、 $k \times k$ 対角一定行列である。 ρ_k は受光信号を正規化した共分散, T_s はサンプリング時間[s], N_k は雑音項, w は受光信号のスペクトル幅[Hz]である。 R_k をフーリエ変換し周波数領域へ変換することで受信信号の周波数スペクトラム Y_m が得られ, 式(4)で与えられる。 M_s はレンジ毎のサンプリング点数である。

$$R_k = SNR\rho_k \exp(i2\pi fkT_s) + N_k \quad (3)$$

$$Y_m = \frac{1}{M_s} \sum_{k=0}^{M_s-1} R_k \exp\left(-\frac{i2\pi mk}{M_s}\right) \quad (4)$$

時間領域の複素信号データ Z_k は, 周波数領域の受信信号電流 Y_m を逆フーリエ変換することで与えられる(式(5))。 Z_k を時間領域から周波数領域へフーリエ変換することで周波数データのピリオドグラム Pd が求められる(式(6))。式(6)で得られた結果を用いて周波数領域でのパワースペクトル密度を計算し, これを図1に示す。この処理を複数のレンジで繰り返し, 水平時間分解能に対応した積分平均を行う。その後最尤推定法を用いて擬似光ヘテロダイン信号のピーク検出を行い, 確率密度関数を用いてこの信号の平均周波数と標準偏差を求める。平均周波数と標準偏差はそれぞれ疑似風観測データの推定視線方向風速と推定視線方向風速誤差を算出する際に必要である。確率密度関数は式(7)で与えられる⁴⁾。 P_{ge} はライダー観測の総誤差の確率[-], V_s は風速探索窓[-], f_m は平均周波数[Hz], σ は周波数の標準偏差[Hz]である。外れ値 **Bad estimate** は全周波数スペクトルのうち, 風速探索窓の外にある割合である⁵⁾。この処理をレーザーパルスごとに繰り返すことで疑似風観測データを算出することができる。

$$Z_k = \sum_{m=0}^{M_s-1} Y_m \exp\left(\frac{i2\pi mk}{M_s}\right) \quad (5)$$

$$Pd = \frac{T_s}{M_s} \left| \sum_{k=0}^{M_s-1} Z_k \exp\left(-\frac{i2\pi mk}{M_s}\right) \right|^2 \quad (6)$$

$$PDF(x) = \frac{P_{ge}}{V_s} + \frac{1 - P_{ge}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - f_m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

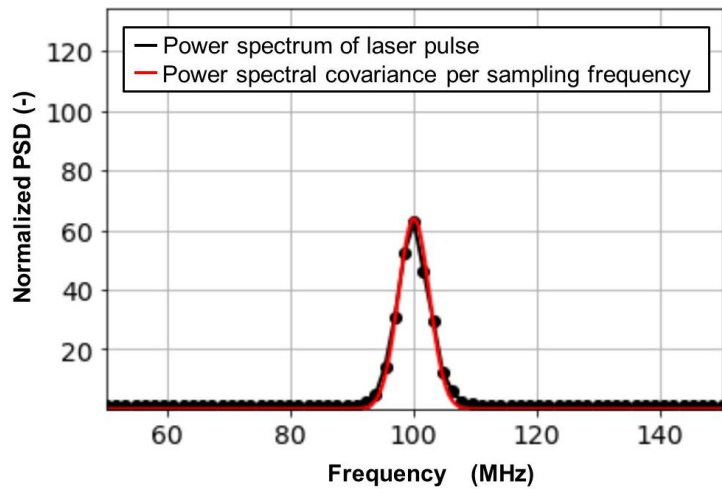


Fig.1. Power spectral density in frequency domain.

3. ライダーシミュレーション実験

式(7)で算出された周波数スペクトルの確率密度分布の結果例を示す. 図 2 (a)はエアロゾルの後方散乱係数を $1.17\text{E-}9 [\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}]$, 風速を $9.32 [\text{m/s}]$ と設定とした場合の確率密度分布, 図 2 (b)はエアロゾルの後方散乱係数を $2.79\text{E-}9 [\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}]$, 風速を $4.91 [\text{m/s}]$ と設定とした場合の確率密度分布である. SNR の大きさにより標準偏差や確率密度分布のピークの高低が変化しており, SNR が小さいほどピークが低く, 標準偏差が大きくなることが確認された.

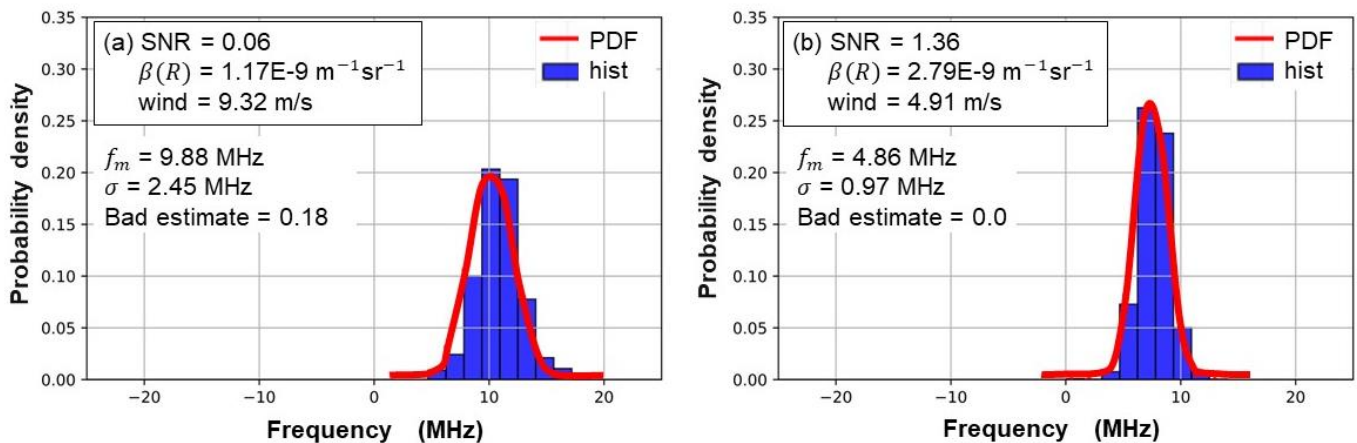


Fig.2. Probability density distribution by the aerosol backscattering coefficient:
(a) SNR=0.06, (b) SNR=1.36

4. 結論

本研究では, 衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダーによる全球風観測性を評価するためのシミュレータ開発を行っており, 受信信号と擬似ヘテロダイン信号を表現している. 中心周波数スペクトルの確率密度分布から, 疑似風観測データの視線方向風速と視線方向風速誤差となる平均周波数と標準偏差, 外れ値の算出, SNR 等の評価を行うことが可能となった. 当日は後方散乱係数の高度プロファイルを用いたシミュレーションの実施結果例を報告する予定である. 今後は, 鉛直分解能に対応する大気気象場データをシミュレータに導入し, シミュレータ開発を更に進めていく.

謝 辞

本研究では JSPS 科研費 19K04849 の助成を受けた。統合型ライダーシミュレータの開発では情報通信研究機構のご支援に感謝致します。また、統合型ライダーシミュレータによるシミュレーション実験では、富士通 Japan 関係者のご支援に感謝いたします。

参考文献

- 1) S.Ishii, et al, “Feasibility Study for Future Space Borne Coherent Doppler Wind Lidar, Part 1: Instrumental Overview for Global Wind Profile Observation”. Journal of the Meteorological Society of Japan October 2017, Vol. 95, No. 5, pp. 301-317.
- 2) Philippe BARON, et al, “Feasibility Study for Future Spaceborne Coherent Doppler Wind Lidar, Part 2: Measurement Simulation Algorithms and Retrieval Error Characterization”. Journal of the Meteorological Society of Japan October 2017, Vol. 95, No. 5, pp. 319-342.
- 3) Barry J. Rye al, “Discrete Spectral Peak Estimation in Incoherent Backscatter Heterodyne Lidar. I: Spectral Accumulation and the Cramer-Rao Lower Bound”. IEEE Transactions on geoscience and Remote Sensing January 1993, Vol.31, No.1, pp.16-27.
- 4) Rod Frehlich, al, “Effects of Wind Turbulence on Coherent Doppler Lidar Performance”. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology February 1997, Vol. 14, No.1, pp.54-75.
- 5) Rod Frehlich, al, “Velocity Error for Coherent Doppler Lidar with Pulse Accumulation”. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology June 2004, Vol. 21, pp.905-920.