

風計測シミュレーションによる衛星搭載 1.5 μm 帯風計測

ドップラーライダーの検出確率及び風速計測精度に関する検討

吉岐 航¹, 亀山 俊平¹, 柳澤 隆行¹, 今村 俊介², 境澤 大亮², 富井 直弥²

¹三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 (〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1)

²国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1)

Numerical simulation on detection probability and measurement accuracy of wind velocity of a satellite-borne 1.5- μm doppler wind LIDAR

Wataru YOSHIKI¹, Shumpei KAMEYAMA¹, Takayuki YANAGISAWA¹,
Shunsuke IMAMURA², Daisuke SAKAIZAWA², and Naoya TOMII²

¹Mitsubishi Electric Corp., 5-1-1 Ofuna, Kamakura, Kanagawa 247-8501

²Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen Tsukuba, Ibaraki 305-8505

Abstract: We report results of a numerical simulation on satellite-borne 1.5- μm coherent doppler wind LIDAR (DWL). We developed a numerical simulation on spectra which are received by the DWL. The simulation was designed to consider a realistic wind profile. Thanks to the wind profile in the simulation, we obtained realistic calculation examples of detection probability and measurement accuracy of wind velocity, which were primary specifications of the satellite-borne DWL.

Key Words: Satellite, Wind, LIDAR, Doppler, Simulation

1. はじめに

近年の大型台風や豪雨を含む異常気象や気候変動を背景として、気象パラメータの一つである風速の空間的・時間的分布を計測することの重要性が高まっている¹⁾。こうした風速の計測は地上付近の観測地点やラジオゾンデ等に設置された風杯型風速計や超音波風向風速計を始めとする in-situ 型の風センサで実現されている。しかしながら、これらの手法には、観測地点や観測頻度が限られることや、リアルタイムに風速の高度分布を導出するのが難しいといった課題があった。

これらの課題を解決する一つ的手段として、衛星搭載型の風計測ドップラーライダー(DWL: Doppler Wind LIDAR)が挙げられる^{1,2)}。DWLは、送信したレーザ光の大気粒子からの散乱を受信光として検出し、その周波数シフト量から風速を求める装置である。受信光を時間分解することで風速のレーザ視線方向上の空間分布を求めることもできる。この DWL を衛星に搭載することによる、全球における風速の高度分布計測が期待される。

現在実際に運用されている唯一の衛星搭載 DWL は、ESA によって 2018 年に打ち上げられた衛星 Aeolus に搭載されている ALADIN(Atmospheric Laser Doppler Instrument)である^{1,3)}。この DWL はインコヒーレント DWL に分類され、光学フィルタを用いて受信スペクトルの周波数シフトを強度変化に変換することで、周波数シフトを間接的に計測する。本方式のライダーでは、紫外域の波長を使用し、分子からのレイリー散乱を捉えられるため、大気分子が存在する成層圏の観測が可能といった特徴を有する。

一方、上記とは異なる方式としてコヒーレント DWL が地上向けに広く利用されている⁴⁾。こちらは送信光と受信光の干渉によって生じるビート信号から周波数シフトを直接計測する手法である。周波数シフトを直接観測するため、受信光の強度変化に伴う系統誤差が原理的に発生しないのが利点である。また、ショット雑音限界に近い SNR を得られるという特徴もある。一方、ドップラーシフトをローカル光との干渉を用いたヘテロダイン検波で検出するため、分子振動によるドップラーブロードニングの影響を受けない、エアロゾルからのミー散乱を捉える必要があり、観測範囲がエアロゾルの分布している高度に限られる。現在までにコヒーレント DWL を衛星搭載した例はなくシミュレーション検討に留まるが⁵⁾、1.5 μm 帯のコヒーレント DWL については、ファイバによる引き回しが可能であることに加え、空港や風力発電所への適用を始めとする製品化が進み技術が成熟しつつあることから²⁾⁴⁾、衛星搭載への適用性を検討することは有用と考える。

上記を踏まえ、本発表では、衛星搭載 1.5 μm 帯 DWL を対象とした、実際の風速場を用いた風計測シミュ

レーションを報告する．さらに，同シミュレーションを用いた風速検出確率及び風速計測精度の計算例を示す．

2. 疑似風速場を用いた風計測シミュレーション

2.1 シミュレーション方法

まず，検討対象とする DWL の動作を説明する．想定する DWL は，高度約 12km までの風速分布を高度 300km から観測する．水平方向空間分解能として 100km 以下を想定し，積算時間は 12 秒（衛星移動距離 92.7km 相当）とした．また，レーザの繰り返し周波数を 150Hz と想定した．したがって，レーザパルスの積算回数は計 1800 回となる．また，視線方向の空間分解能として 1200m(レーザパルス幅は 300m)を想定したが，1200m に対してはコヒーレンシーを確保できない恐れがあり，また FFT のデータ点数を減少させたいことから，空間分解能を 4 ビンで分割測定した後に積算して 1200m へ換算する方式を想定した．その結果，今回想定する DWL は，一つの高度・空間における風速分布の計測のために，計 7200 回の測定(レーザパルス)を積算する想定となった．積算後の受信スペクトルの周波数シフトから，計測範囲における風速を推定できる．

シミュレーションでは，まず，各測定で得られる受信スペクトルを生成した．受信スペクトルの形状は，(1)送信光のスペクトル形状，(2)計測範囲内の風速分散，(3)計測範囲内の平均風速，(4)雑音，(5)スペckル の 5 成分で決まると仮定した．シミュレーションでは，気象庁のメソ数値予報モデル⁶⁾の風速データの空間・高度分布を基に生成した風速場を用いながら，雑音やスペckルに起因するランダム性を付与して，計 7200 回の測定毎に受信スペクトルを生成した．これを全て積算することで求まる受信スペクトルから推定風速を算出した．さらにこの推定風速自体のランダム性を考慮するため，前記のプロセスを多数回繰り返し，各プロセスで得られた推定風速のヒストグラムを作成した．このヒストグラムを以下の関数でフィッティングすることで^{7,8)}，フィッティングパラメータである検出確率及び風速計測精度を求めた．

$$PDF(v_e) = \frac{b}{2v_s} + \frac{1-b}{\sqrt{2\pi}g} \exp\left[-\frac{v_e^2}{2g^2}\right]$$

v_s は計測可能な最高風速， b が誤検出確率， g が風速計測精度， v_e が推定風速である．ただし，検出確率及び風速計測精度は受信スペクトルの SNR に依存するため，ここまでの処理を，想定 SNR を変えながら繰り返し実施した．この計算により，SNR に対する検出確率及び風速計測精度の相関が求められる．本シミュレーションのフローチャートを Fig. 1 に示す．

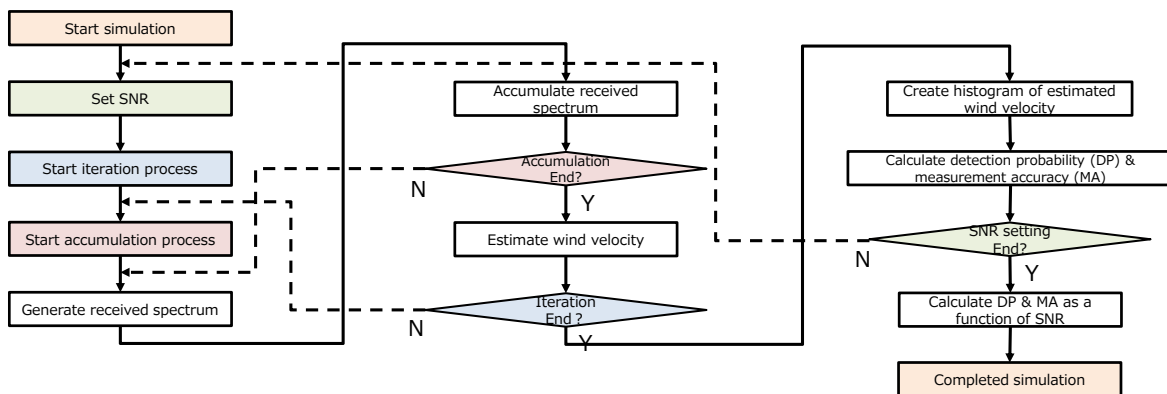


Fig. 1 : Flowchart of the simulation of the DWL

2.2 検出確率及び風速計測精度

上記のシミュレーション手法により求めた SNR と検出確率，風速計測精度の関係を Fig. 2 に示す．定性的な傾向として，高度上昇に伴って，検出確率及び風速計測精度が低下していることが分かる．この傾向は，今回シミュレーションに入力した疑似風速場が有する特徴から説明できる．使用した疑似風速場では，衛星移動に伴う風速の変動が高度上昇に伴って増大していた．風速の変動の増大によって積算後の受信スペクトル

ル幅が拡大するため、検出確率及び風速測定精度は低下したのだと考えられる。検出確率及び風速計測精度が風速場の影響を強く受けるという上記の結果は、疑似風速場を考慮したシミュレーションの有用性を示唆するものである。

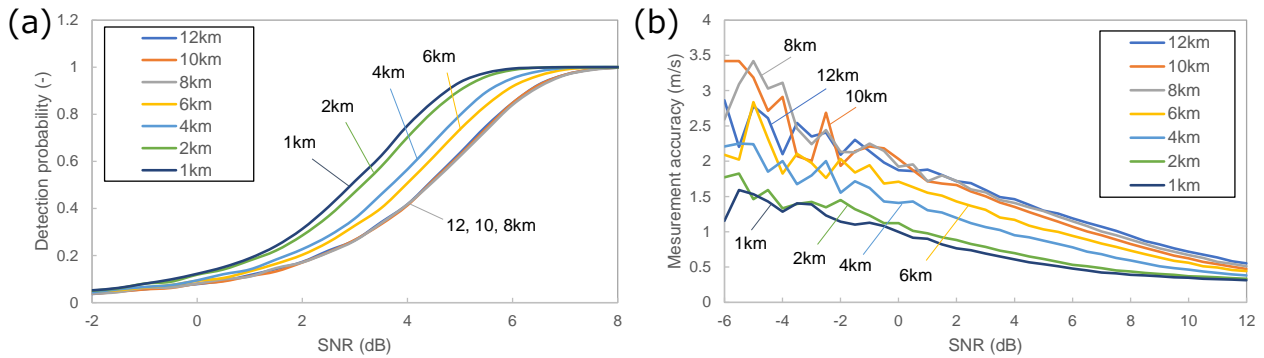


Fig. 2 : Results of the simulation of the DWL.

(a) SNR vs Detection probability, (b) SNR vs Measurement accuracy of wind velocity

3. シミュレーションによる計算例

3.1 SNR の計算モデル

前項にてモデル化した検出確率や風速計測精度は SNR の関数となっていた。本項では、具体的な SNR を想定することで、検出確率や風速計測精度の計算例を示す。DWL の SNR 計算モデルとして次式を想定する⁹⁾。

$$SNR(R) = \frac{\eta\eta_D(D,R)\lambda E\beta K \frac{2R}{1000}\pi D^2\sqrt{N}}{8hBR^2}$$

R はターゲット距離、 η はシステム効率、 η_D は受信結合効率、 λ は波長、E はパルスエネルギー、 β は後方散乱係数、K は透過率、D は送受信有効開口径、N は積算回数、h はプランク定数、B は受信帯域幅である。これらのパラメータの内、主要な設計パラメータは E 及び D である。上式によれば、SNR は E 及び D の増加関数となるが、本検討では、レーザー増幅器の出力や衛星搭載性など現実の制約条件を加味して、E=36mJ、D=700mm を想定した。一方、 β は大気条件に依存するパラメータであり、時刻・地域・季節変動が大きく、また高高度における β は正確な観測が難しい。そこで、 β を変数として SNR を計算することとした。

3.2 SNR・検出確率・風速計測精度の計算例

高度 12km, 6km, 1km における後方散乱係数に対する SNR の計算例を Fig. 3(a) に示す。前出の式形からも明らかな通り、SNR が β の増大に伴って増加している。例えば、高度 12km において SNR>5dB となるためには、約 $3 \times 10^{-8} \text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ の β が必要と見積られる。高度 12km 及び高度 6km の SNR は概ね一致しているが、これは衛星軌道 300km に対して、観測高度差 6km が極めて小さいためである。なお、高度 1km において SNR が低いのは、高度 2km 以下では視線方向空間分解能を 600m としたためである。

上記の SNR の計算例を、前出の検出確率及び風速計測精度と突き合わせることで、これらの β 依存性の計算例を得た (Fig. 3(b))。例えば、高度 12km において $\beta = 4 \times 10^{-8} \text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ の場合、検出確率は約 0.93、風速計測精度は約 0.9m/s rms という結果となった。また、高度 12km と高度 1km を比較すると、検出確率は後者の方が低いにも関わらず、後者の方が高い風速計測精度を示している。これは高度 1km の方が風速の変動が小さいためであり、風速場の影響が顕在化している好例である。

上記の通り、SNR をシミュレーションに入力することで、検出確率や風速計測精度を始めとする衛星搭載 DWL の具体的な性能を見積もることができた。

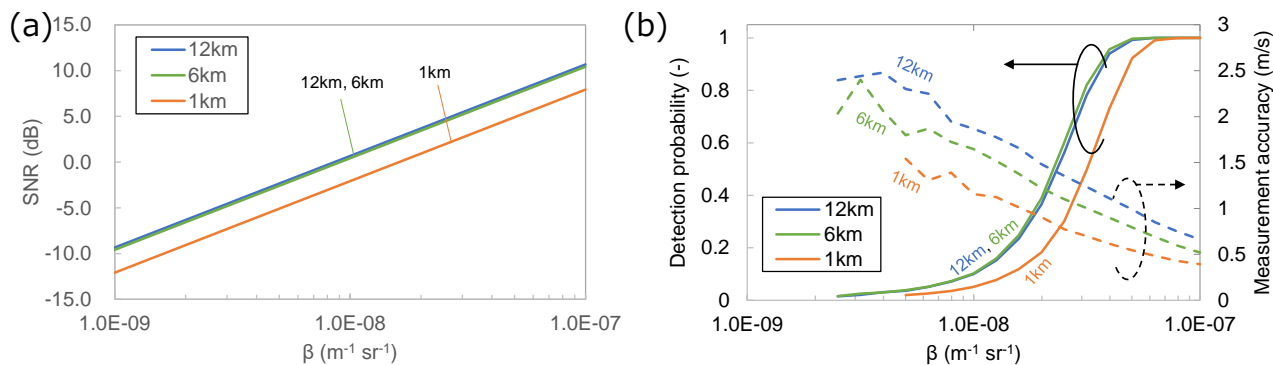


Fig. 3 : (a) Dependency of the SNR on altitude and β
 (b) β vs Detection probability and measurement accuracy of wind velocity

4. 結論

本研究では、衛星搭載 1.5 μ m 帯 DWL 対象とした、疑似風速場を用いた風計測シミュレーションを実施した。さらに同シミュレーションを用いることで風速検出確率及び風速計測精度の計算例を示した。本シミュレーションによれば、風速場の影響を考慮した上で、具体的な装置条件や大気条件における衛星搭載 DWL の性能検討を実施できることが分かった。今後、実際の気象条件及びレーザー特性を考慮して、より実測に近い観測データのシミュレーションを実施する予定である。

参考文献

- 1) 石井 昌憲, 岡本 幸三, 久保田 拓志, 藤平 耕一, 松本 紋子, 今井 正, 境澤 大亮, 今村 俊介, 石橋 俊之, 田中 泰宙, 佐藤 篤, 西澤 智明, 村田 健史, 岡本 創, 沖 理子, 佐藤正樹, 岩崎俊樹: レーザセンシング学会誌 **1** (2020) 61.
- 2) 辻 秀伸, 今城 勝治, 廣澤 賢一, 亀山 俊平, 柳澤 隆行: レーザセンシング学会誌 **2**(2021) 17.
- 3) H. Baars, A. Herzog, B. Heese, K. Ohneiser, K. Hanbuch, J. Hofer, Z. Yin, R. Engelmann, and U. Wandinger: Atmos. Meas. Tech. **13** (2020) 6007.
- 4) <http://www.mitsubishielectric.co.jp/lidar/> (アクセス: 21/6/15)
- 5) P. Baron, S. Ishii, K. Okamoto, K. Gamo, K. Mizutani, C. Takahashi, T. Itabe, T. Iwasaki, T. Kubota, T. Maki, R. Oki, S. Ochiai, D. Sakaizawa, M. Satoh, Y. Satoh, T. Y. Tanaka, and M. Yasui: Journal of the Meteorological Society of Japan **95** (2017) 319.
- 6) https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/cgi-bin/catalogue/make_product_page.cgi?id=MesModel (アクセス: 21/6/15)
- 7) R. Frehlich: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology **14** (1997) 54.
- 8) S. Kameyama, T. Ando, K. Asaka, Y. Hirano, and S. Wadaka: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **47** (2009) 3560.
- 9) S. Kameyama, T. Ando, K. Asaka, Y. Hirano, and S. Wadaka: Applied Optics **45** (2007) 1953.