

衛星搭載ドップラーライダーに用いる風速測定アルゴリズムの改善手法に関する研究

岩田 陸斗, 柴田 泰邦

東京都立大学 (〒195-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Improving Wind Velocity Measurement Algorithm for Space-Borne Doppler Lidar

Rikuto IWATA, Yasukuni SIBATA

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

Abstract: In this study, we attempted to improve the measurement accuracy of satellite-borne Doppler lidar using the double-edge technique, which is unavoidably affected by Mie scattering leakage. We examined a wind velocity derivation algorithm and compared two methods; the conventional pulse accumulation method and a shot-by-shot approach, where wind speed is determined for each shot and averages several pulses. Although the number of samples is limited, the pulse accumulation method demonstrated greater accurate with reduced error variance.

Key Words: Lidar, Doppler Wind Lidar, Satellite

1. はじめに

高精度な全球的物質搬送を評価するための物質搬送モデル開発, 風予測精度向上による数値天気予報の正確化, 航路最適化による燃料使用量削減を目指した気候変動モデルの開発には, 全球的な風の 4 次元観測が必要とされ, 人工衛星を用いたリモートセンシング技術が期待されている. 特に, 上空の境界層や自由対流圏の風向・風速を測定するために, エアロゾルや大気分子を観測対象とする衛星搭載ドップラーライダーによる風観測が世界中で検討され, 2018 年に ESA (欧州宇宙機関) によって打ち上げられた ADM-Aeolus は, 大気分子からのレイリー散乱光とエアロゾルや雲粒からのミー散乱光を捉えた 2 種類の水平視線風速の全体的な観測を行った¹⁾. 本発表では, 対流圏から成層圏にわたる広範囲の風観測を目的とするインコヒーレント方式の一つであるダブルエッジ法²⁾³⁾による衛星搭載ドップラーライダーに着目した. 本手法はレイリー散乱スペクトルの左右の裾に狭帯域フィルタを配置し, 両者の透過信号強度の変化から散乱光に含まれるドップラーシフト成分, つまり風速を導出する. フィルタの性能上, ミー散乱の漏れが避けられず, 雲・エアロゾルの濃淡によって風速測定精度への影響の度合いが変化する. 特に衛星搭載ライダーの場合, 数 km/s の対地速度で地球を周回しているため, 雲・エアロゾル分布の変化に対して測定精度が敏感であることが推察される. この影響を軽減する目的で, 本研究ではドップラーシフト検出アルゴリズムについて検証し, その改善手法を検討する.

2. 風速測定アルゴリズム

2.1 ダブルエッジ法による風速測定方法

本研究では, インコヒーレント方式で主流となっている 2 つのエタロンを用いたダブルエッジ法を適用する. Fig.1 にダブルエッジ法の原理図を示す. ライダーから射出されたレーザーは, 大気分子やエアロゾルによって後方散乱され, ドップラー効果によって散乱光の周波数が偏移する. 2 つのエタロンフィルターによって分光された透過光を検出器によって受光する. 各検出器から出力された信号強度の比よりドップラー周波数を求めて, 風速を算出する. 視線方向の風速 v_{LOS} は, レーザーの波長 λ_L とドップラー周波数 $\Delta\nu$ によって次の式で与えられる.

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

風速 v_{LOS} において各検出器から出力される信号強度 $N_{s,i}$ は次の式で与えられる⁴⁾.

$$N_{s,i}(v_{LOS}) = T_{BS} \cdot \frac{E_T \cdot F_{req} \cdot \Delta t}{h\nu_L} \cdot A_T \cdot T_O \cdot O_A(r) \cdot Q_e \cdot \frac{\Delta r}{r^2} \cdot T_A^2 \times \left[\beta_M(r) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} T_{F,i}(\nu) \cdot \{G_L * G_M(\nu, \Delta\nu)\} d\nu + \beta_A(r) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} T_{F,i}(\nu) \cdot \{G_L * L_A(\nu, \Delta\nu)\} d\nu \right] \quad (2)$$

ここで、 T_{BS} はビームスプリッターの透過率、 E_T はレーザーのパルスエネルギー、 F_{req} は繰り返し周波数、 Δt は積算時間、 h はプランク定数、 ν_L はレーザーの周波数、 A_T は受光望遠鏡面積、 T_O はシステム全体での光学系の効率(ただしエタロンの透過率は含めず)、 $O_A(r)$ はビームオーバーラップ関数、 Q_e は検知器の量子効率、 Δr は距離分解能、 r はライダーからの距離、 T_A は大気透過率、 $T_{Fi}(v)$ は各エタロン ($i=1,2$) の透過率、 $\beta_M(r)$ 及び $\beta_A(r)$ は大気分子とエアロゾルによる後方散乱係数、 G_L 及び G_M はガウシアン分布で表現されるレーザーと Rayleigh-Brillouin 散乱によるスペクトル分布関数である。視線方向の風速誤差は各検出器で得る信号強度の比 $N_{s,2}/N_{s,1}$ を用いて計算する。

Fig.1 に示すようにエタロンフィルターの裾は広がっているため、ミー散乱を完全には遮断できない。したがってエアロゾル濃度が高いとミー散乱が増加して、風速精度に影響を与える。衛星搭載ライダーの場合、数 km/s の対地速度で地球を周回しているためパルスごとに雲・エアロゾル分布が変化している領域では、パルス積算信号から得る風速精度への影響が懸念される。異なる β_A でのドップラーシフトに対する信号強度比をシミュレーションした結果を Fig.2 に示す。Fig.2 より、 β_A が 0.0005/m/sr の場合に、これより小さい β_A と比べて信号強度比の傾きが変化していることより、エアロゾル濃度が風速精度に影響を与えることが確認出来る。地上設置ライダーでは、ミー散乱の後方散乱係数を計測するミーライダーの機能を別に付随する方法を用いてこの影響を軽減可能だが、衛星搭載ライダーにおいてシステム構成は簡便な方が望ましい。そこで、風速導出アルゴリズムを工夫することでミー散乱の漏れの影響が軽減可能かどうかを検討する。

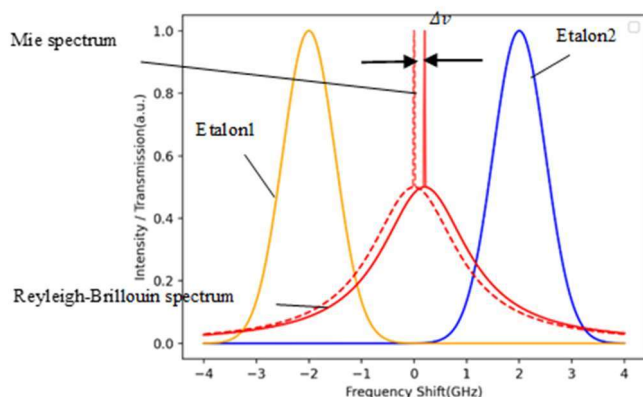


Fig.1 Principle of the wind velocity measurement by the Doppler shift at double edge technique and the Doppler frequency spectra of light backscattered by atmospheric molecules and aerosols.

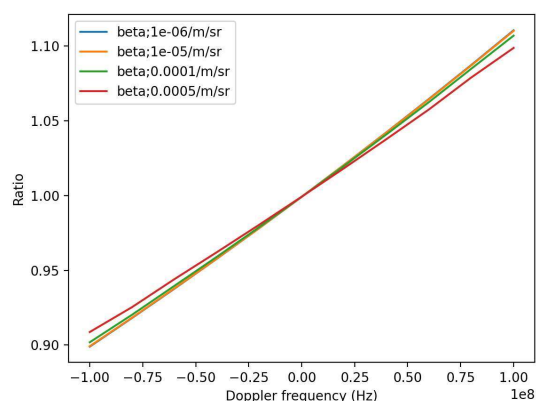


Fig.2 Signal intensity ratios as a function of the various aerosol backscattering coefficient β_A (altitude:10km, temperature:240K).

2.2 風速導出アルゴリズム

地上設置のライダーでは、一般的にパルス積算手法を用いることで高い信号雑音比を実現しており、これはパルス積算時間内で風向風速が大きく変わらないことを前提としている。一方、衛星搭載ライダーでは観測対象領域がパルスごとに変わるため、雲やエアロゾル分布の変化によりミー散乱の漏れ具合もパルスごとに変わる。このため、パルス積算信号を用いた場合の測定誤差を詳しく検証する必要がある。1 ショットごとに風速を求める手法を用いると、全体の信号雑音比は低下するが、ミー散乱の漏れの少ない領域では風速誤差が小さくなることが期待される。本シミュレーションでは、1 ショットごとに風速を求め、それを数パルス分平均化した場合の風速誤差と、パルス積算信号から求めた風速誤差を比較検証する。

3. 風速誤差シミュレーション

Table1 に示すドップラーライダーの各パラメータを用いて式(2)から得るライダー信号を計算し、ポアソン分布に従う統計誤差を加味した。ここで、各高度における温度および後方散乱係数は、CloudSat および CALIPSO の各衛星観測データを使用した⁵⁾。Fig.3 に風速誤差シミュレーションに用いた領域周辺の後方散乱係数分布を示す。今回の解析に用いた領域を赤枠で囲んだ。高度 4 km 以下に全後方散乱係数 ($\beta_M + \beta_A$) が 10^{-6} 程度となるエアロゾル層が存在していることが分かる。

Fig.4(a)は 1 ショットごとの受信光子数を 10 発分重ね書きした図で、青線は式(2)から求めた光子数、赤線はポアソン誤差を付加した

Table1 Simulation parameters for the incoherent Doppler lidar systems.

Satellite altitude(km)	417
Vertical resolution(km)	1
Integrated pulse energy(mJ)	70
Laser wavelength(nm)	532
Beam splitter transmission	0.48
Beam overlap function	1
Telescope diameter(m)	0.6

ものである。Fig.3 で示したように、高度 4 km 以下ではエアロゾルによる散乱信号の増加がみられ、衛星パス上のエアロゾル分布が一樣でないため、Fig. 4(a)ではパルスごとの受信光子数に差が出ていることがわかる。Fig 4(b)は受信光子数をパルス 10 発分積算した図である。積算したことにより、ポアソン誤差は Fig.4(a)より少なくなっていることが分かる。

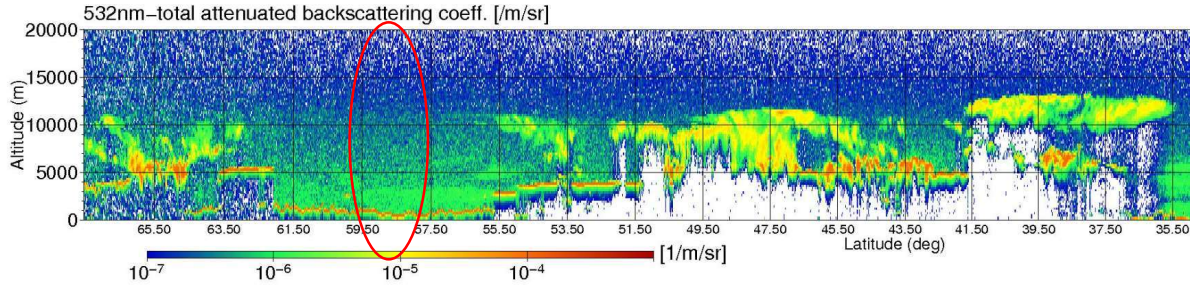


Fig.3 Distribution of 532nm-total attenuated backscattering coefficient.

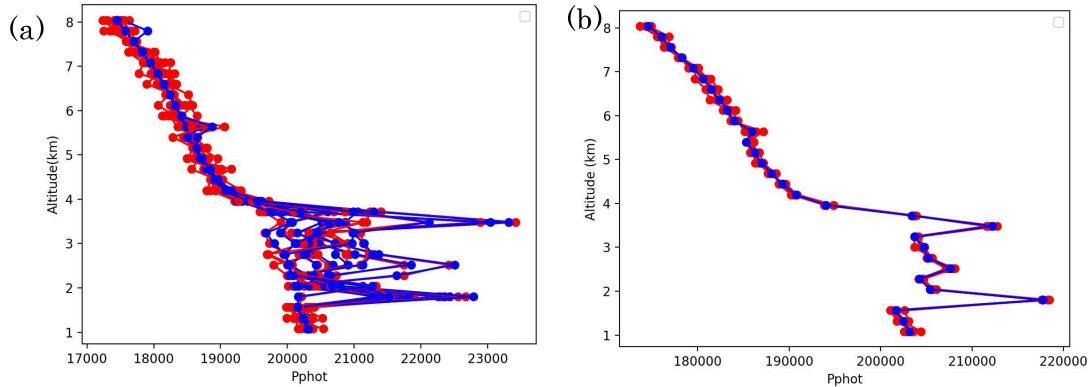


Fig.4 (a) Received photon numbers of each pulse (10 shots) obtained from equation (2) [blue line], and received photon numbers of each pulse including Poisson error [red line].

(b) Received photon numbers in 10 shot integration obtained from equation (2) [blue line], and received photon numbers including Poisson error [red line].

Fig.5(a)と(b)に高度 1-8km のドップラーシフトが 0MHz(無風状態)と仮定した場合のポアソン誤差を含んだ信号から導出した風速誤差の平均値と標準偏差を示す。(a)はパルスごとに風速誤差を求め、誤差を平均化した結果、(b)は 10 ショット加算してから風速誤差を求めた結果である。同様に、ドップラーシフトが+100MHz と仮定した場合の風速誤差の平均値と標準偏差を Fig.5(c)と(d)に示す。(c)はパルスごとに風速誤差を求め、誤差を平均化した結果、(d)は 10 ショット加算してから風速誤差を求めた結果である。どちらの手法も風速誤差は $\pm 5\text{m/s}$ 程度に収まっている。各高度における標準偏差の平均値は Fig.5(a)が 7.13m/s で、Fig.5(b)が 5.93m/s となり、パルス積算した方が誤差のばらつきが小さく、良い結果を得ている。今回抽出したサンプル領域では、ドップラーシフト量の違いによる風速誤差への影響は見られなかった。

3. まとめ

ミー散乱の漏れの影響が避けられないダブルエッジ法による衛星搭載ドップラーライダーの測定精度向上を目的に、風速導出アルゴリズムの検討を行った。一般的なパルス積算手法に加え、1 ショットごとに風速を求めて数パルス分を平均化する手法を用いて風速誤差を算出した。少ないサンプルではあるが、パルス積算手法がより誤差のばらつきが小さい高精度な結果が得られた。現時点ではサンプル数が少ないため、更なる検討が必要である。

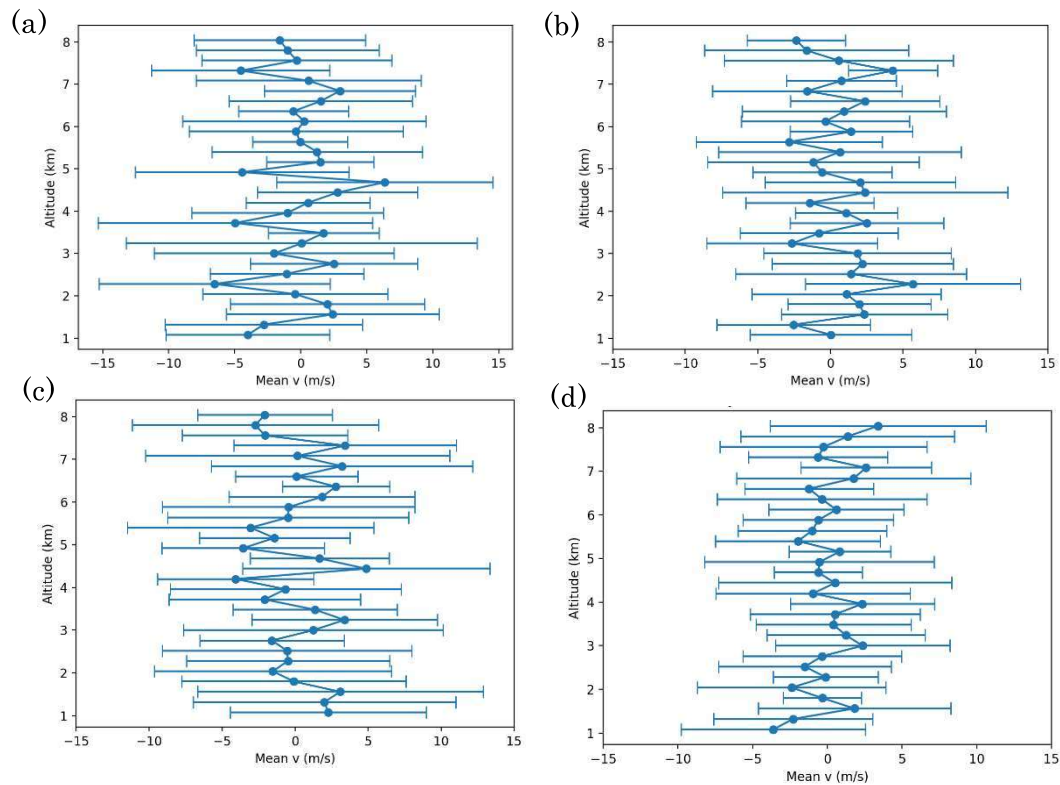


Fig.5 (a) Mean and standard deviation of wind speed errors calculated for each pulse for 10 shots.(0MHz).
 (b) Wind speed errors and standard deviation calculated in 10 shot integration.(0MHz).
 (c) Mean and standard deviation of wind speed errors calculated for each pulse for 10 shots.(100MHz).
 (d) Wind speed errors and standard deviation calculated in 10 shot integration.(100MHz).

謝 辞

本研究にて使用した後方散乱比及び気温の高度分布に関するデータは,宇宙航空研究開発機構(JAXA)のEarthCARE研究プロダクトモニタ(https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/research_product/ecare_monitor.html)より提供を受けました.

参考文献

- 1) https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Aeolus
- 2) C. L. Korb, B. M. Gentry, and C. Y. Weng: Edge tech-nique : Appl. Opt 31(1992) 4202-4213
- 3) C. Flesia, and C. L. Korb : Appl. Opt. 38(1999) 432-440
- 4) 石井 昌憲, 水谷 耕平, 篠野 雅彦, 板部 敏和, 浅井 和弘: レーザセンシング学会誌 22(2002) 423-432
- 5) https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/research_product/ecare_monitor.html