

全光ファイバ型パルスドップラライダの計測精度評価

Accuracy of measured wind velocity by a all-fiber pulse Doppler lidar

若山 俊夫¹ 酒巻 洋¹ 安藤 俊行¹ 亀山 俊平¹ 平野 嘉仁¹
Toshio Wakayama Hiroshi Sakamaki Toshiyuki Ando Shunpei Kameyama Yoshihito Hirano
関口 高志¹ 古田 匡¹ 山本 文雄² 磯 修²
Takashi Sekiguchi Masashi Furuta Fumio Yamamoto Osamu Iso

¹ 三菱電機株式会社 ² 関西電力株式会社
Mitsubishi Electric Corporation The Kansai Electric Power Co., Inc.

abstract: The all-fiber pulse Doppler lidar we have developed has a function of wind vector estimation. Wind velocity and direction are estimated from Doppler velocities observed with plural beam directions. This estimation assumes spatially uniform wind distribution. Therefore nonuniformity of wind will cause a measurement error. In this paper, we first theoretically evaluate the accuracy of estimated wind velocity under the nonuniform wind condition, and clarify that averaging time of Doppler velocity observed at each beam direction should be long enough to suppress bias error of wind velocity estimation caused by nonuniformity of wind distribution. The result of the field test indicates that the bias of the wind velocity measured by the all-fiber Doppler lidar is suppressed when the Doppler velocity of each direction is averaged in 120 seconds.

1 まえがき

著者らは複数点/空間の風向風速を遠隔で観測できる風況精査用光波レーダを開発した [1, 2]. 本発表では, 複数方向にビームを指向して観測されたドップラー速度 (視線方向風速) から算出される風速の精度について, その特性を理論的に検討し, 実データ解析により確認する.

2 風速ベクトル算出方法

Fig.1 に示す観測状況を考える. 方位角 θ_0 にある観測点 0 の風速ベクトルを求めるために, 光波レーダによって, 方位角 θ_1 に存在する観測点 1 と, 方位角 θ_2 に存在する観測点 2 の 2 点で視線方向風速を計測する場合を考える. 方位角 θ_1 と θ_2 は次式で定義されるとする.

$$\theta_1 = \theta_0 - \alpha \quad (1)$$

$$\theta_2 = \theta_0 + \alpha \quad (2)$$

観測点 0 における風速ベクトル V を方位角 θ_1 の方向に射影した成分を v_1 , 方位角 θ_2 の方向に射影した成分を v_2 とする. 観測点 0 の周囲の風の空間分布が一樣であるとする. 観測点 1 で観測されるドップラー速度は v_1 と, 観測点 2 で観測されるドップラー速度は v_2 とそれぞれ一致する.

方位角 θ_0 と直交する方向の風速成分 u と, 方位角 θ_0 の方向の風速成分 v は次式で算出される.

$$u = \frac{v_1 - v_2}{2 \sin \alpha} \quad (3)$$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2 \cos \alpha} \quad (4)$$

風速ベクトルの大きさ (以下では単に風速と呼ぶ) V は次式で算出される.

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

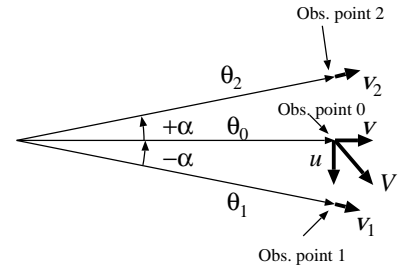


Fig. 1 Relationship between a wind vector and beam directions.

式 (3), 式 (4), 式 (5) から, V^2 は次式で表される.

$$\begin{aligned} V^2 &= \frac{(v_1 - v_2)^2}{4 \sin^2 \alpha} + \frac{(v_1 + v_2)^2}{4 \cos^2 \alpha} \\ &= \frac{v_1^2 + v_2^2 + (4 \sin^2 \alpha - 2)v_1 v_2}{4 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha} \end{aligned} \quad (6)$$

3 光波レーダで計測される風速値の誤差解析

実際には, 観測点 1 および観測点 2 のドップラー速度に推定誤差が含まれること, また, 風の空間不均一により, 観測点 0, 観測点 1, 観測点 2 の風速が異なることなどから, 観測点 1 で観測されるドップラー速度 \hat{v}_1 は次式のように誤差 Δv_1 を含むものとなる.

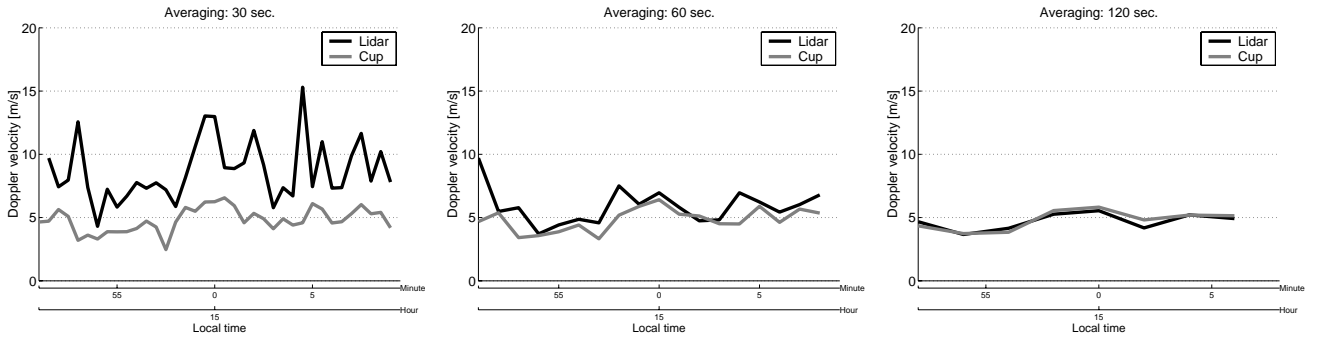
$$\hat{v}_1 = v_1 + \Delta v_1 \quad (7)$$

同様に観測点 2 で観測されるドップラー速度 \hat{v}_2 は誤差 Δv_2 を含むものとなる.

$$\hat{v}_2 = v_2 + \Delta v_2 \quad (8)$$

ただし, Δv_1 と Δv_2 にはバイアスがないものとする.

$$\langle \Delta v_1 \rangle = \langle \Delta v_2 \rangle = 0 \quad (9)$$



(a) 30 sec. averaging (b) 60 sec. averaging (c) 120 sec. averaging
 Fig. 2 Evaluation of the accuracy of measuring wind velocity : comparison with anemometer.

また以後の議論では， Δv_1 と Δv_2 が無相関であると仮定する．

$$\langle \Delta v_1 \Delta v_2 \rangle = 0 \quad (10)$$

u の推定値 \hat{u} ， v の推定値 \hat{v} は次式で表される．

$$\hat{u} = \frac{(v_1 + \Delta v_1) - (v_2 + \Delta v_2)}{2 \sin \alpha} \quad (11)$$

$$\hat{v} = \frac{(v_1 + \Delta v_1) + (v_2 + \Delta v_2)}{2 \cos \alpha} \quad (12)$$

風速の推定値 \hat{V} は次式で計算される．

$$\hat{V} = \sqrt{\hat{u}^2 + \hat{v}^2} \quad (13)$$

式 (11)，式 (12)，式 (13) から，風速推定値を 2 乗した \hat{V}^2 は次式で表される．

$$\hat{V}^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + (4 \sin^2 \theta - 2) v_1 v_2}{4 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha} + \frac{(v_1 - v_2)(\Delta v_1 - \Delta v_2)}{2 \sin^2 \alpha} + \frac{(v_1 + v_2)(\Delta v_1 + \Delta v_2)}{2 \cos^2 \alpha} + \frac{(\Delta v_1 - \Delta v_2)^2}{4 \sin^2 \alpha} + \frac{(\Delta v_1 + \Delta v_2)^2}{4 \cos^2 \alpha} \quad (14)$$

式 (14) 右辺の第 1 項は式 (6) 右辺と同じものであり，真値を表す項である．第 2 項と第 3 項は Δv_1 および Δv_2 に関して 1 次の誤差項である．これらの誤差項は式 (14) においてバイアスを生じない．第 4 項と第 5 項は Δv_1 および Δv_2 に関して 2 次の誤差項であるが，式 (14) においてバイアスを生じるものである．

\hat{V}^2 のバイアス誤差は，式 (6)，式 (9)，式 (10)，式 (14) により次式で表される．

$$\langle \hat{V}^2 - V^2 \rangle = \frac{\langle (\Delta v_1)^2 \rangle + \langle (\Delta v_2)^2 \rangle}{4 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha} \quad (15)$$

ここで，次式のように Δv_1 と Δv_2 の分散が σ_d^2 に等しいとする．

$$\langle (\Delta v_1)^2 \rangle = \langle (\Delta v_2)^2 \rangle \equiv \sigma_d^2 \quad (16)$$

式 (16) を式 (15) に代入すると，

$$\langle \hat{V}^2 - V^2 \rangle = \frac{\sigma_d^2}{2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha} \quad (17)$$

以上の結果から，風速値計測値のバイアスが，風の空間不均一に起因する量である σ_d に比例することが分かった．すなわち，十分長い時間で各視線方向風速を平均すれば， σ_d は小さくなるため，風速のバイアスは小さくなる．しかし，時間平均長が十分でない場合は， σ_d が小さくなっていないため，風速値のバイアスが大きくなる．

4 観測例

時間平均長と風速ベクトル算出精度の関係を検討するために，時間平均長を 30 秒，60 秒，120 秒としたときのベクトル合成後の風速値および風向値の時系列を Fig.2 に示す．各グラフでは，著者らが開発した光波レーダ [1] と風杯式風速計 (Vaisala 社 MAWS201) と得られた風速時系列値を比較している．

時間平均長が 30 秒の (a) では，大きなバイアス誤差が風速値に生じているのが分かる．それに対し，時間平均長が 60 秒の (b) では，若干のバイアスが残っているものの，光波レーダと風向風速計の差は小さくなっている．さらに時間平均長を 120 秒とすると，(c) のように，バイアス誤差がほぼ消えることが分かる．以上の結果から，風速計測精度を維持するためには，時間平均長を十分長く取ることが必要であることが分かる．

5 むすび

本発表では，複数方向にビームを指向して観測されたドップラー速度 (視線方向風速) から算出される風速の精度について検討した．風の空間不均一に起因する風速バイアス値を抑圧するために，十分長い時間で各視線方向風速を平均する必要がある．実データ解析の例では，120 秒程度の平均処理により，風速バイアス値が抑圧されることを確認した．

参考文献

- [1] 酒巻 他, 第 25 回風力エネルギー利用シンポジウム 予稿集, pp. 137-140, 2003.
- [2] 酒巻 他, 風況精査用光波レーダの開発および計測精度の検証 (1) 日本気象学会 2004 年度春季大会 講演予稿集, p.256, 2004.