

レーダー・ライダー融合システムのドップラー速度測定精度検証

青木 誠¹, 岩井 宏徳¹

¹ 国立研究開発法人 情報通信研究機構 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1)

Accuracy and precision of radial Doppler velocity measured with phased array weather radar and Doppler wind lidar fusion data system

Makoto AOKI¹ and Hironori IWAI¹

¹National Institute of Information and Communication Technology, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

NICT installed two commercial 1.54 μm coherent Doppler wind lidars (CDWL) as phased array weather radar (PAWR) and Doppler lidar network fusion data system (PANDA) in NICT Kobe and Okinawa on March 2014. To validate the accuracy and precision of wind measurement using CDWL, we evaluated the systematic bias in the radial wind velocity through measurements with a hard target and experimentally observed velocity random error as a function of wideband SNR. The bias and random error of radial Doppler velocity measured with PAWR were evaluated on the basis of comparative measurements with highly reliable CDWL. These experiments show that CDWL and PAWR fusion data system possesses high accuracy and precision of wind measurements.

Key Words: Coherent Doppler wind lidar, CDWL, Phased array weather radar, PAWR, PANDA

1. はじめに

情報通信研究機構 (NICT) では、局地的大雨や突風等の局地現象の予測と被害の軽減を目指して最先端リモートセンシング技術の研究開発を進めている。2014年3月には、Xバンドフェーズドアレイ気象レーダー (PAWR) と晴天時でも風速分布を測定できるコヒーレントドップラー風ライダー (CDWL) を融合させた最先端のセンシングシステム (PANDA: Phased Array weather radar and Doppler lidar Network fusion DATA system) を NICT 未来 ICT 研究所 (神戸) および NICT 沖縄電磁波技術センターに整備し、現在に至るまで試験観測を続けている。2015年8月31日には、同システムを用いて、世界で初めてレーダーとライダーの融合観測による海上竜巻および竜巻に関連した渦構造の同時観測に成功している^{1,2)}。

観測データの信頼性を確保することは気象観測の基本であり、精度が確保されていない気象観測機器が観測に利用され、その観測データが公表されたり、その結果に基づいた数値予報や気象解析などが行われたりすると社会的混乱を生ずる恐れがある。また、竜巻などの重大な気象災害を的確に捉えるためには、信頼性の高い気象測器を用いる必要がある。そのため、NICT では PAWR と CDWL の測定精度検証を進めている。

本報告では、CDWL の風測定精度検証および CDWL との比較観測に基づく PAWR のドップラー速度測定精度検証について報告する。

2. 観測装置および実験概要

PANDA は、局地的大雨や竜巻、突風などによる災害の予測と被害の軽減を目指す研究を行うためのシステムである。既存のパラボラ型のレーダーと比べて、高時間・空間分解能 (30秒ごとに 600レンジ×300方位×110仰角) で捉えることができる PAWR³⁾だけでなく、晴天時に風速の3次元分布を観測するための CDWL を備えている。レーダーとライダーの相補的な観測によって、PANDA は晴天時から荒天時までの3次元観測の風分布測定が実現でき、重大な気象災害をもたらす局地的大雨発生前の風速分布、積乱雲の急激な発達およびその詳細な構造の途切れない観測が可能である。

PAWR のアンテナは、20m 鉄塔の最上階のレドーム内に収められており、CDWL は (WINDCUBE400S, LEOSPHERE) は、同じ鉄塔の高さ 17.5 m のデッキに設置されている。そのため、レーダーとライダーの違いによる観測体積の差はあるが、PAWR と CDWL は、ほとんど同じ地点の視線方向ドップラー速度を観測することができる。本研究では、まず CDWL の風測定精度検証を実施して、CDWL のドップラー速度測定精度が確保されることを示し、その後、PANDA の PAWR と CDWL がほぼ同じ場所に設置されている点に着目して、信頼性が保証された CDWL をリファレンスとして、PAWR のドップラー速度推定精度の検証を行った。

2.1 CDWL のドップラー速度測定精度検証

CDWL の風測定精度は、Iwai et al. (2013)の手法⁴⁾に基づいて実施されている。その手法は、以下の通りである。

バイアス (確度) : 固定ハードターゲットに CDWL の送信光を当て、ゼロドップラー速度の分布から、装置固有のバイアスおよびその標準偏差を評価する。本研究では、2014年6月23日15:00から16:00の期間において、NICT 沖縄に設置されている CDWL から北北東、約 13.1 km の地点にある本部半島に送信光を当て、1秒積分1時間の観測を実施、ハードターゲット地点でのドップラー速度の速度分布を求めて、CDWL のバイアスおよびその標準偏差を評価した。

ランダムエラー (精度) : 夜間静穏時に鉛直流観測を行い、velocity-difference method⁵⁾を用いて Wideband SNR 毎の標準偏差を求め、Cramer-Rao lower bound (CRLB) 理論曲線⁶⁾と比較する。本研究では、2014年10月17日00:00から02:00の夜間静穏時に鉛直観測を実施、そのデータ系列から標準偏差を求めて、CDWL のランダムエラーを評価した。

2.2 PAWR のドップラー速度測定精度検証

PAWR のドップラー速度測定精度検証は、CDWL との比較観測に基づいて実施されている。その手法は、以下の通りである。

バイアス (確度) : NICT 沖縄の PANDA は、東シナ海に面しており、仰角 0 度の観測を行うと、両装置ともに、船舶からの強いエコーが頻りに観測される。同一の観測レンジおよび方位角内で観測できていると見なせる観測時間の差が5秒以内の船舶エコードップラー速度を取り出して、CDWL と PAWR の視線方向ドップラー速度の比較を実施、PAWR のドップラー速度測定におけるバイアスを評価する。本研究では、ドップラー速度比較のために、CDWL で 2016年5月21日から5月31日の期間において、仰角 0 度、方位角 225 度から 15 度、方位角分解能 1 度、観測時間 75 秒のセクター PPI を継続的に実施した。

ランダムエラー (精度) : 降雨中に CDWL で観測を行うとエアロゾルからの散乱信号に加えて、雨滴からの散乱信号を受信することができる。二つの信号に速度差がある場合、それぞれのスペクトルを分離して、エアロゾルの流れ (=風速) と雨滴の移動速度を別々に推定することができる。推定手法としては、それぞれのスペクトルにガウス分布を仮定して、最小二乗法でフィッティングを行い、そのピーク速度から風速と雨滴の移動速度を求める手法⁷⁾を用いた。本研究では、観測時間差 1 秒以内、CDWL の観測レンジが PAWR の観測レンジ内に存在する条件下で、エアロゾルおよび雨滴からの散乱信号が分離可能なデータを抽出して、雨滴のドップラー速度の比較を実施、PAWR のドップラー速度測定におけるランダムエ

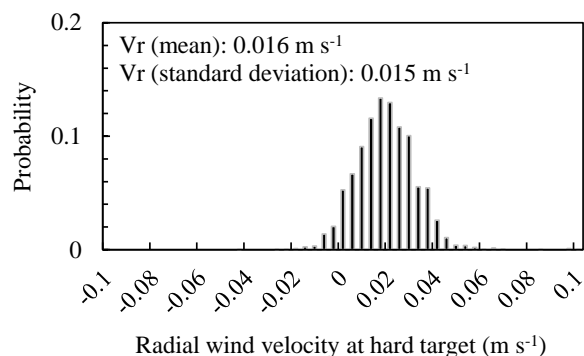


Fig. 1. Probability of radial wind velocities measured with CDWL at the point of hard target. Mean radial wind velocity is $V_{r,\text{mean}} = 0.016 \text{ m s}^{-1}$ and its standard deviation is $\sigma_{V_r} = 0.015 \text{ m s}^{-1}$.

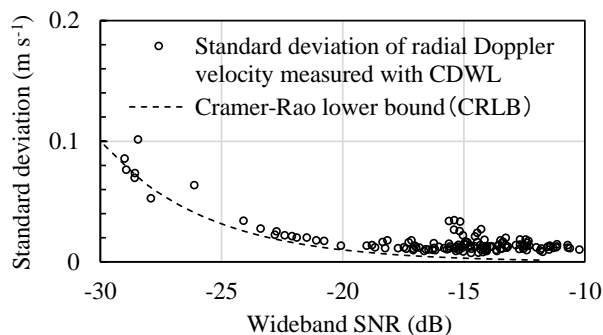


Fig. 2. Comparison of standard deviation of radial wind velocity measured with CDWL with theoretical Probability of radial wind Cramer-Rao lower bound. Errors are constant (about 0.02 m s^{-1}) in the high wideband SNR region and increase with decrease in the wideband SNR to 0.1 m s^{-1} at wideband SNR of -30 dB , where is minimum wind-measurable region.

ラーを評価する。本研究では、仰角毎のドップラー速度を比較するために、降雨時 (2016年6月3日および2016年6月13日) に複数の仰角で、方位角 255-15 度、方位角分解能 1 度、観測時間 120 秒のセクター PPI 観測を継続的に実施した。

3. 実験結果および考察

図 1 に、1 秒積分 1 時間の CDWL を用いたハードターゲット観測から推定された、ハードターゲット地点のドップラー速度の確率分布を示す。移動しないハードターゲットにおけるドップラー速度測定の真値は 0 である。したがって、確立分布の 0 からの差が CDWL の確度を表し、分布のばらつきがハードターゲット観測における (=非常に SNR が良い領域での) CDWL の精度となる。バイアスおよびランダムエラーは、それぞれ 0.016 m s^{-1} および 0.015 m s^{-1} と見積もられた。CDWL には、わずかにバイアスが存在するが、非常に良い精度でドップラー速度が推定できるこ

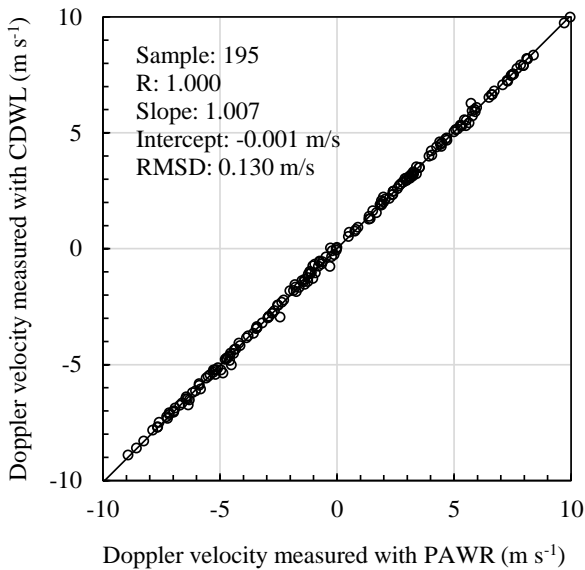


Fig. 3. Scatterplot of ship velocities measured with PAWR and CDWL from 21 to 31 May 2016. Solid line represents a regression line estimated by the least-squares method. In the legend, R means correlation coefficient, slope and intercept are for the regression line, and RMSD means root-mean-square difference between PAWR and CDWL measurements.

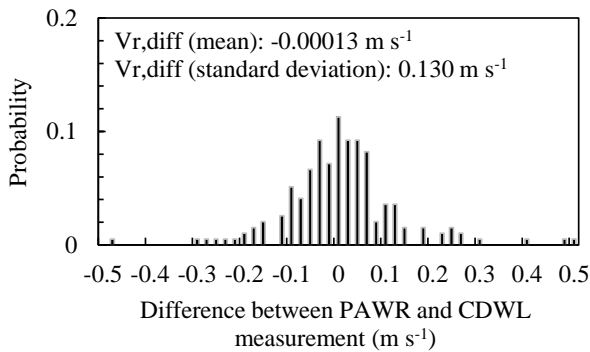


Fig. 4. Probability of difference between PAWR and CDWL ship velocity measurements. Average of differential velocity is $V_{r,diff,mean} = -0.00013 \text{ m s}^{-1}$ and its standard deviation is $\sigma_{Vr,diff} = 0.130 \text{ m s}^{-1}$.

とが確かめられた。

図 2 に、夜間静穏時の観測結果から得られた CDWL のランダムエラーと統計上の推定誤差の下限を与える CRLB 理論曲線の比較結果を示す。観測結果から得られたランダムエラーは、理論曲線とよく一致し、ほとんどの測定値が SNR>-20 dB 以上の測定精度の良い領域 (0.02 m s^{-1} 程度) に集中すること、CDWL 装置の検出限界の SNR が低い領域であっても、非常に良い精度での測定 (0.1 m/s @ -30 dB) が可能であることが確かめられた。

図 3 に、PAWR と CDWL の船舶エコー Doppler 速度の比較を示す。ハードターゲットを用いた

バイアス測定から CDWL の Doppler 速度には 0.016 m s^{-1} 程度の非常に小さいバイアスが存在することが確かめられている。そのため、移動するハードターゲットである船舶の Doppler 速度推定においても、CDWL の Doppler 速度測定結果には、それと同等のバイアスが存在すると考えられる。そのため、CDWL の Doppler 速度にバイアス分の補正を加えて視線方向船速度の真値として、PAWR の船舶エコーの Doppler 速度との比較を行った。PAWR の測定結果は、正負の幅広い領域において、真値である CDWL の測定結果と極めて良い一致を示すことがわかる。

図 4 に、PAWR と CDWL で測定された船舶の Doppler 速度の差分値の確率分布を示す。CDWL の測定結果が真値であると仮定しているので、確率分布の 0 からの差が PAWR の精度を表している。PAWR の測定結果には、ほとんどバイアスが存在しないことがわかる ($-0.00013 \text{ m s}^{-1}$)。確率分布のばらつきは測定精度を表すが、このばらつきには PAWR と CDWL の両装置の測定誤差が含まれている。相関がない独立変数の誤差の足し合わせは、誤差伝搬の法則によって誤差同士の二乗和の平方根で表すことができる。ハードターゲットにおける CDWL の測定誤差 (0.015 m s^{-1}) は、確率分布のばらつき (0.13 m s^{-1}) よりも一桁小さいので、比較結果から得られた測定誤差は、PAWR の測定誤差が大部分を占めていると考えられる。

図 5 に、分離可能な状態で観測された降雨中の CDWL の Doppler スペクトルを示す。降雨時・高仰角での CDWL 観測では、視線方向風速に、雨滴の自由落下成分が入り込むために、スペクトル内に速度差が生まれやすい。そのため、比較的高い頻度で、大気中のエアロゾルの速度 (= 風) と雨滴の移動速度を分離可能なスペクトルが観測される(本研究の場合、仰角 30 度で 4 割程度)。

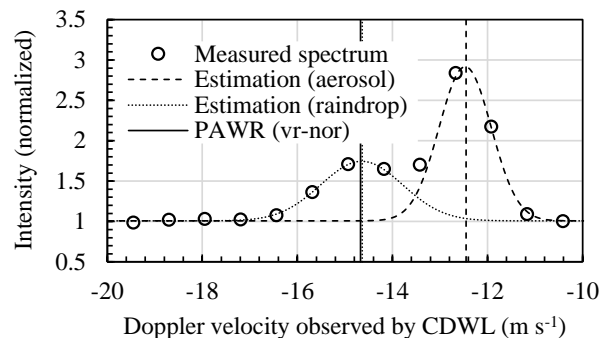


Fig. 5. Example of Doppler spectrum obtained during a rain event (open circles) and fitting curves calculated with the two-component Gaussian model at the range of 1300 m, azimuth of 260 degree, and elevation of 30 degree (22:59:48 JST on 13 June 2016). Dashed, dotted, and solid lines show the Doppler velocities of radial wind and rain particles velocity estimated by CDWL and radial Doppler velocity measured with PAWR.

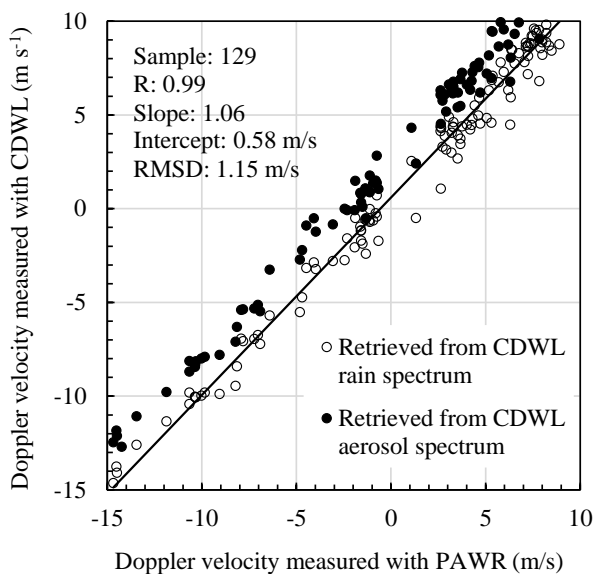


Fig. 6. Scatterplot of radial Doppler velocities measured with PAWR and CDWL during rain events at 3 and 13 June 2016. Filled and open circles show the velocities retrieved from CDWL aerosol and raindrops spectra, respectively. Solid line represents a regression line between PAWR and CDWL measurement. Legend as in Fig. 3.

破線および点線は、それぞれ2峰ガウス分布でフィッティングされ分離された風と雨のスペクトル成分およびその平均速度を示している。実線はPAWRによって、ほとんど同時刻同地点で観測されたドップラー速度（雨滴粒子の移動速度）を示している。CDWLの観測結果と推定されたスペクトルの結果がよく一致し、CDWLで推定された降雨粒子の移動速度がPAWRの測定値がよく一致することがわかる。晴天時のCDWLのドップラー速度推定では、ガウス分布などを仮定してスペクトルで重み付けされた平均的なドップラー速度を求めるが、風と雨の成分をそれぞれ独立に推定する必要がある降雨時のCDWLのドップラー速度推定では、二峰ガウス分布が適していることがわかる。

図6に、仰角30度でのPAWRとCDWLで観測された降雨時のドップラー速度比較結果を示す。両装置で観測体積や雨滴の散乱機構の差はあるが、CDWLの降雨スペクトルから推定されたドップラー速度は、雨滴の移動を測定しているPAWRのドップラー速度とよく一致することがわかる。回帰曲線にわずかなオフセットが存在し、PAWRの方がCDWLよりも雨滴の移動速度を早く推定している理由は、XバンドレーダーであるPAWRの雨滴からの散乱は、粒子径の6乗に比例するレイリー散乱が支配的（つまり、雨滴落下速度が速い、大きな雨滴粒子に圧倒的に感度が高い。）であるのに対し、ライダーの雨滴からの散乱は、幾何光学的な散乱が支配的であり、その散乱強度は

雨滴の幾何光学的な断面積に比例するからだと考えられる。今回の比較においても、RMSDには両装置の測定誤差が含まれていると考えられる。CDWLのランダムエラー（0.02から0.1 m s⁻¹）はSNRの良い領域から悪い領域にかけて、比較結果から得られた値（1.15 m s⁻¹）よりも1桁以上小さいことをから、雨滴のドップラー速度測定における測定誤差も、主にPAWRの測定誤差に起因していると考えられる。つまり、PAWRのドップラー速度には1 m s⁻¹程度の測定誤差が含まれている。PAWRの測定誤差が大きい理由は、PAWRの観測体積がCDWLのそれと比べて大きいため、観測体積内のドップラー速度の乱れが反映されやすいからだと考えられる。

PAWRのドップラー速度は、自由落下の影響が小さいエアロゾル成分から推定された速度（=風速）とは明確な差があることも確かめられた。気象現象の研究やデータ同化などにPAWRのドップラー速度データを「雨滴の移動=風の流れ」が成り立つとして使用すると、自由落下の影響が大きい高仰角のドップラー速度データは勿論のこと、影響を受けづらい低仰角のデータであっても、オフセットが生じている可能性がある。そのため、その影響を考慮して慎重に使用する必要がある。

4. まとめ

局地的大雨や竜巻等の極端気象の実態把握、機構解明、および数値予報などの研究を進めるためには、信頼性の高い気象測器を用いて、このような気象現象を的確に捉える必要がある。本研究では、レーザー・ライダー融合システムで捉えられた気象現象の信頼性を保証するために、CDWL単体での検証とCDWLとの比較観測に基づくPAWRのドップラー速度測定精度検証を実施した。その結果、両装置共にバイアスが非常に小さく（-0.00013および0.016 m s⁻¹）、精度が高いことが確かめられた。風測定における誤差は、PAWRで1 m s⁻¹程度、CDWLでは検出限界のSNR付近であっても0.1 m s⁻¹以下で保証されることも確かめられた。今後は、風測定精度が保証された本システムによる観測的気象研究を行う予定である。

参考文献

- 1) 岩井 宏徳, 青木 誠, 久保田 実: 気象学会 2016年度春期大会予稿集 B153 (2016).
- 2) H. Iwai et al.: Submitted to Mon. Wea. Rev (2016).
- 3) T. Ushio et al.: Atmos. Res. **154** (2014) 89.
- 4) H. Iwai et al.: J. Atmos. Ocean. Tech. **30** (2013) 429.
- 5) R. Frehlich: J. Atmos. Ocean. Tech. **18** (2001) 1628
- 6) B. J. Rye and R. M. Hardesty: IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. **31** (1993) 16.
- 7) M. Aoki et al.: Accepted for publication in J. Atmos. Ocean. Tech. (2016).