

基于三台测风激光雷达的大气湍流和三维风场研究*

程志刚¹ 李 炬¹ 张鑫宇¹ 张京江¹ 窦军霞¹ 程月星²

CHENG Zhigang¹ LI Ju¹ ZHANG Xinyu¹ ZHANG Jingjiang¹ DOU Junxia¹ CHENG Yuexing²

1. 北京城市气象研究院, 北京, 100089

2. 北京市朝阳区气象局, 北京, 100016

1. *Institute of Urban Meteorology, Beijing 100089, China*

2. *Meteorological Service in Chaoyang District of Beijing, Beijing 100016, China*

2019-12-17 收稿, 2020-08-18 改回.

程志刚, 李炬, 张鑫宇, 张京江, 窦军霞, 程月星. 2020. 基于三台测风激光雷达的大气湍流和三维风场研究. 气象学报, 78(6): 1021-1036

Cheng Zhigang, Li Ju, Zhang Xinyu, Zhang Jingjiang, Dou Junxia, Cheng Yuexing. 2020. A study on turbulence and three-dimensional wind field based on observations of three wind lidars. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(6):1021-1036

Abstract To obtain atmospheric turbulence and three-dimensional wind field observations, cooperative observation experiments were carried out using three wind lidars. (1) Turbulence is detected based on the virtual tower stares cooperative observation technology (VTS) using three wind lidars. Comparison with observations of the three-dimensional ultrasonic anemometer (sonic) deployed on a meteorological tower indicates that the results of the VTS are good. The correlation coefficient, average error (BIAS), root mean square error (RMSE) of wind speed with 10 Hz frequency at 32 m between VTS and sonic are 0.92, 0.77 m/s and 0.41 m/s, respectively. For the atmospheric turbulent kinetic energy (TKE), the correlation coefficient, BIAS, RMSE are 0.99, $-0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ and $0.08 \text{ m}^2/\text{s}^2$, respectively. The wind speed observed by VTS has the same spectral structure as that observed by the sonic. (2) Three-dimensional wind field detection is also carried out by using the scan cooperative observation technology based on three wind lidars. The observations of scan agree well with observations of the conventional wind anemometer deployed on the meteorological tower. The correlation coefficients, BIAS, RMSE of 10 min average horizontal wind speed and direction at 90 m are 0.92 and 0.93, -0.41 m/s and 0° , 0.73 m/s and 34° , respectively. Compared with observation of a single wind lidar, the cooperative observation using three wind lidars show certain advantages in that it doesn't need to assume uniform wind and has higher observation accuracy, etc. However, the cooperative observation has higher requirements for observational environment, e.g., there should be no block on the beam of the three wind lidars, the observations must be synergistic, etc. In the application, it is necessary to make a reasonable observational plan based on actual observational needs.

Key words Wind lidar, Cooperative observation, Virtual tower stares, Atmospheric turbulence, Three-dimensional wind field

摘 要 为了获取大气湍流和空间三维风场结构, 利用3台同型号的测风激光雷达开展协同观测试验。(1)利用虚拟铁塔协同观测技术开展大气湍流探测, 与香河102 m铁塔安装的三维超声风速仪观测结果做对比, 32 m处高频(10 Hz)风速的相关系数高达0.92, 平均误差为0.77 m/s, 均方根误差为0.41 m/s; 大气湍流强度(TKE)的相关系数高达0.99, 平均误差为 $-0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 均方根误差为 $0.08 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 并且协同观测的高频风速与三维超声风速仪的观测结果具有相同的频谱结构。(2)利用扫描协同观测技术开展三维风场探测, 与铁塔上的常规测风设备相比, 其90 m高度处的水平风速和风向的相关系数分别为0.92和0.93, 平均误差为 -0.41 m/s 和 0° , 均方根误差为 0.73 m/s 和 34° 。相比于单台测风激光雷达, 基于3台测风激光雷达协同观测技术具有一定的优势:

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2018YFF0300101、2017YFC0209604)、北京市气象局科技项目(BMBKJ201701002)。

作者简介: 程志刚, 主要研究领域为城市边界层观测与分析。E-mail: zgcheng@ium.cn

通信作者: 李炬, 主要研究领域为城市边界层观测与分析。E-mail: jli@ium.cn

不需要风场水平均匀的假设、探测精度更高等。但其对观测环境的要求较高:观测路径上不能有遮挡、观测必须协同等。在科研业务应用中,需要根据实际的观测需求合理制定观测方案。

关键词 测风激光雷达, 协同观测, 虚拟铁塔, 大气湍流, 三维风场

中图法分类号 P425.2

1 引言

大气湍流和大气风场研究占大气科学研究的很大一部分,尤其是边界层气象学研究。基于对动量、热量和物质的输送,大气湍流和大气风场对地表能量平衡、大气污染扩散、积云对流发展和飞机飞行安全等都非常重要(Baker, et al, 1995; 张宏昇等, 2020)。测风激光雷达具有时、空分辨率高,测量精度高,可三维扫描,便携易移动等优点,可用于全天候大气风场测量(刘源等, 2009)。开展测风激光雷达在大气风场测量和大气湍流探测应用方面的研究有重要意义(Fuertes, et al, 2014; Choukulkar, et al, 2017; Bonin, et al, 2017; 杨璐等, 2019)。

测风激光雷达相比于多普勒声雷达和相控阵风廓线雷达,具有测量精度高、可三维扫描、响应速度快等优点,在边界层风场和湍流探测、风电领域均有很好的应用(Sathe, et al, 2011; Tucker, et al, 2009; Mann, et al, 2010; Aitken, et al, 2014; Drechsel, et al, 2009)。测风激光雷达与相控阵风廓线雷达类似,可以利用五波束探测模式获取垂直风廓线(高祝宇等, 2016; 黄小彦, 2020; 张旭斌, 2015),用于研究大气风场变化。Li等(2018)利用测风激光雷达获取的垂直风廓线和载噪比进行了污染过程影响机理分析。测风激光雷达的扫描模式可以探测空间径向风速,张洪玮等(2018)利用测风激光雷达扫描探测,分析了机场低空风切变的变化特征。测风激光雷达在风电领域主要用于风能资源评估、风功率预测、风电场运营管理等,通过测风激光雷达对风电机组前几百米区域风的测量,可以实现风电机组的偏航控制、载荷优化等功能,能够生产更多的电量并降低风电系统运行成本(Aitken, et al, 2012, 2014)。

大气湍流探测技术的发展能够加强人们对大气湍流运动的认识,加快大气湍流理论的发展。如今,大气湍流的观测主要集中在地表和近地面层(基于气象铁塔安装的三维超声风速仪)(全利红等, 2016),对边界层湍流的探测手段较少,探测能力不足是困扰边界层湍流理论发展的难点之一(刘

树华等, 2005; 罗涛等, 2008; 袁仁民, 2005; Young, et al, 2000)。基于其响应速度快、可三维扫描等特点,测风激光雷达主动式遥感设备成为获取低空大气湍流强度的手段之一(Berg, et al, 2013; Klein, et al, 2015; Mann, et al, 2010; Sathe, et al, 2011; Tucker, et al, 2009; Bonin, et al, 2017; Choukulkar, et al, 2017)。单台测风激光雷达的边界层湍流探测主要是基于速度方位显示(Velocity-Azimuth Display, VAD)技术(王春晖等, 2008; Tucker, et al, 2009; Bonin, et al, 2017)。速度方位显示技术的计算方法最早由Browning等(1968)提出,用于天气雷达反演二维风场,后用于相控阵风廓线雷达反演水平散度、测风激光雷达反演二维风场。但Sathe等(2011)指出,测风激光雷达基于速度方位显示技术反演的水平风速误差较大,不能精确反演湍流强度。Huang等(2017)利用单台测风激光雷达获取的垂直速度标准差表征边界层湍流强度,并根据此湍流强度的垂直廓线定义边界层高度。但是测风激光雷达探测垂直速度的误差较大,此方法估量的湍流强度误差也较大。有研究(陈冬等, 2012; 崔朝龙等, 2013)利用湍流对激光波束产生的扩散和漂移来反演湍流强度,但是反演的湍流强度不能量化。还有研究基于3台测风激光雷达协同观测,获取三维风场,如Fuertes等(2014)在CESAR观测试验中对比了3台测风激光雷达协同观测与三维超声风速仪观测,发现结果比较一致。Choukulkar等(2017)在XPIA观测试验中对比了单台和3台测风激光雷达的测风结果,发现协同观测精度优于单台测风激光雷达。

与相控阵风廓线雷达类似,测风激光雷达可以利用五(三)波束探测模式获取垂直风廓线(Li, et al, 2018)。除此之外,基于其高灵敏性和可三维扫描的特点,测风激光雷达可以反演二维和三维风场。基于单台测风激光雷达反演二维风场的方法主要有速度方位显示、最优插值(Optimal Interpolation, OI)等方法(Cherukuru, et al, 2017),速度方位显示方法假设风场水平均匀或各向同性(Browning, et al, 1968),最优插值方法假设风场背景误差水平均

匀(Choukulkar, et al, 2012, 2017)。Hill等(2010)利用2台测风激光雷达反演共面二维风场,研究山谷涡旋变化特征。以上的研究均是对二维风场的反演,对三维风场的反演较少,基于3台测风激光雷达扫描探测模式可以获取三维风场(Choukulkar, et al, 2017)。

2 观测试验和反演算法

2.1 观测试验

为了研究基于3台测风激光雷达的协同观测技术,2018年3月21—25日依托香河102 m气象铁塔开展协同观测试验(测风激光雷达和铁塔位置见图1)。3台测风激光雷达(BDH、BDJ和BCE)为青岛华航环境科技有限责任公司生产的WindPrint S4000型3D扫描式相干多普勒激光雷达,其性能参数见表1。试验中测风激光雷达的径向分辨率为15 m,脉冲宽度为250 ns,径向探测频率为10 Hz(虚拟铁塔协同观测模式)和1 Hz(扫描协同观测模式)。香河102 m气象铁塔安装有:(1)2层(32和63 m)湍流观测系统,所用仪器为英国Gill公司的WindMaster Pro型三维超声风速仪,观测精度小于1%,观测频率为10 Hz,安装在铁塔的西南支臂上;(2)7层(8、15、32、47、63、80、102 m)常规梯度风观测系统,风速和风向观测所用仪器为美国Campbell公司的010C型风速传感器



图1 2018年3月21—25日观测试验示意
(BCE、BDJ和BDH为3台WindPrint S4000型测风激光雷达,白色实线为香河102 m气象铁塔)

Fig. 1 Diagram of observational scheme during 21–25 March 2018 (BCE, BDJ, BDH are the three WindPrint S4000 wind lidars. The white solid line denotes the location of the Xianghe 102 m height meteorological tower)

表1 测风激光雷达(WindPrint S4000)性能参数
Table 1 Parameters of WindPrint S4000 wind lidar

| 指标项 | 指标性能 |
|----------|--------------------|
| 激光波长 | 1550 nm |
| 脉冲宽度 | 100—400 ns(可调) |
| 单脉冲能量 | >100 μ J |
| 径向数据更新速率 | 10—1 Hz(可调) |
| 风速测量范围 | 0—75 m/s |
| 径向风速测量精度 | < \pm 0.1 m/s |
| 径向探测距离 | 60—4000 m |
| 径向距离分辨率 | 15/30/60 m(可调) |
| 扫描伺服精度 | \pm 0.1 $^\circ$ |
| 功耗 | <500 W |
| 重量 | 95 kg |

和020C型风向传感器,观测精度分别为0.11 m/s和 \pm 3 $^\circ$ 。每层观测高度在西南和东北支臂上各有一个风速传感器(32和63 m除外,这两层高度仅东北支臂安装风速传感器),风向传感器安装在西南支臂上。中国科学院大气物理研究所325 m气象铁塔的观测资料用于验证测风激光雷达的探测性能。

为了获取不同观测资料,开展了以下两种模式的协同观测试验:(1)虚拟铁塔(Virtual Tower Stares, VTS)协同观测模式,即3台测风激光雷达同时探测某一位置,反演这一位置的三维风速(u 、 v 和 w)。改变探测位置,获取空间上不同位置的三维风速;提高测风激光雷达的探测频率,获取高频的三维风速,用于计算大气湍流强度。试验过程中,2018年3月21日01时—3月23日15时(北京时间,下同)开展虚拟铁塔协同观测(图1),在每小时的前半小时,3台测风激光雷达同时探测铁塔32 m处,后半小时同时探测铁塔63 m处(雷达方位角和俯仰角见表2)。由于铁塔对激光探测产生遮挡,3台测风激光雷达探测的交点位置在铁塔南侧,距离铁塔2 m左右。为了获取高频的三维风速,测风激光雷达的探测频率设置为10 Hz,用于计算大气湍流强度,与三维超声风速仪观测结果对比,分析虚拟铁塔协同观测的精度。(2)扫描模式,即3台测风激光雷达同时对三维空间进行扫描观测,获取空间三维风场。试验过程中,2018年3月23日16时—3月25日10时开展扫描模式协同观测(图2),其中BCE和BDJ利用PPI扫描模式(雷达在某个俯仰角上水平扫描),通过改变俯仰角获取空间径向风速;BDH利用RHI扫描模式(雷达在某个方位

表2 3台测风激光雷达(BDJ、BDH和BCE)的位置及协同观测方案
Table 2 The location of three wind lidars (BDJ, BDH, BCE), and cooperative observation schemes

| 测风激光 雷达 | 相对于铁塔的 方位角(°) | 相对于铁塔的 距离(m) | 虚拟铁塔协同观测模式 | | 扫描协同观测模式 | |
|------------|------------------|-----------------|------------|----------------------------|--------------------------|---|
| | | | 方位角(°) | 俯仰角(°) | 方位角(°) | 俯仰角(°) |
| BDJ | 327.5 | 107.24 | 147.5 | 17.2 (32 m) 31.7 (63 m) | 104.1—184.1, 扫描间隔为4.0 | 17.2, 31.7, 41.7, 50.0, 55.0, 60.0, 70.0, 80.0 |
| BDH | 84.5 | 165.18 | 264.5 | 10.5 (32 m) 20.3 (63 m) | 240.4—292.4, 扫描间隔为4.0 | 10.0—90.0, 间隔为6.0 |
| BCE | 204.3 | 142.23 | 24.3 | 11.9 (32 m) 22.8 (63 m) | -7.2—72.8, 扫描间隔为2.0 | 11.9, 22.8, 31.0, 38.7, 45.1, 50.0, 60.0, 70.0, 80.0 |

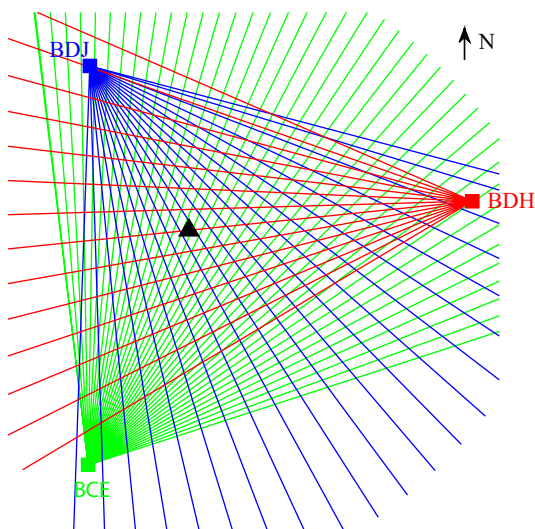


图2 扫描协同观测模式示意(俯视)

Fig. 2 Schematic diagram of scan cooperative observation (bird's-eye view)

角上垂直扫描),通过改变方位角获取空间径向风速(雷达方位角和俯仰角见表2)。利用3台测风激光雷达的方位角、俯仰角和径向风速,获取空间三维风场,与铁塔常规梯度测风结果对比,分析扫描协同观测的精度。

为了实现时间上同步观测,分别将3台测风激光雷达的时间与网络时间同步,计算机时间与网络时间同步误差在20 μs左右(王树宝等,2009),远低于观测时间分辨率(0.1 s)。

2.2 反演算法及误差分析

2.2.1 三维风速反演

文中协同观测技术是利用3台测风激光雷达同时探测某一个位置,根据测风激光雷达的径向速度、方位角和俯仰角,反演计算出这一位置的三维风速 u 、 v 和 w (图3)。空中某一位置的径向风速为

$$V_{ri}(\varphi_i, \theta_i) = u \cdot \cos \theta_i \cdot \sin \varphi_i + v \cdot \cos \theta_i \cdot \cos \varphi_i + w \cdot \sin \theta_i \quad (1)$$

式中, i 为3台测风激光雷达; V_r 为雷达径向风速,指向雷达为负,远离雷达为正; φ 为雷达方位角; θ 为雷达俯仰角; u 、 v 、 w 为雷达指向位置的三维风速。上式的矩阵形式为

$$MV = V_r \quad (2)$$

式中, $M = \begin{bmatrix} \cos \theta_A \cdot \sin \varphi_A & \cos \theta_A \cdot \cos \varphi_A & \sin \theta_A \\ \cos \theta_B \cdot \sin \varphi_B & \cos \theta_B \cdot \cos \varphi_B & \sin \theta_B \\ \cos \theta_C \cdot \sin \varphi_C & \cos \theta_C \cdot \cos \varphi_C & \sin \theta_C \end{bmatrix}$,

$V = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$, $V_r = \begin{bmatrix} V_{rA} \\ V_{rB} \\ V_{rC} \end{bmatrix}$, A、B、C分别代表3台测风激光雷达。式(2)等号两边同时乘以 M 的逆矩阵 M^{-1} ,则

$$M^{-1}MV = M^{-1}V_r \quad (3)$$

根据逆矩阵相关性质可知, $M^{-1}M$ 为单位矩阵,则

$$V = M^{-1}V_r \quad (4)$$

由此,根据测风激光雷达的方位角、俯仰角和径向速度可以计算出三维风速 u 、 v 和 w 。

虚拟铁塔协同观测时,测风激光雷达的探测频率为10 Hz,通过上述反演算法可以获得10 Hz的三维风速,利用10 Hz三维风速可以计算5 min平均的大气湍流强度(TKE)。公式为

$$\begin{aligned} \text{TKE} &= \frac{1}{2} \left(\overline{(u - \bar{u})^2} + \overline{(v - \bar{v})^2} + \overline{(w - \bar{w})^2} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

2.2.2 三维风场反演

扫描协同观测模式通过PPI、RHI等扫描模式结合,获取了空间径向风场(雷达扫描方式见2.1节),可以反演空间三维风场,其计算步骤如下:(1)根据实际观测需求,设定空间三维风场的范围和分辨率,确定空间三维网格。以铁塔为原点,三维坐标分别以东、北、上为正,水平和垂直分辨率均为10 m。(2)根据确定的三维空间网格,计算每个空

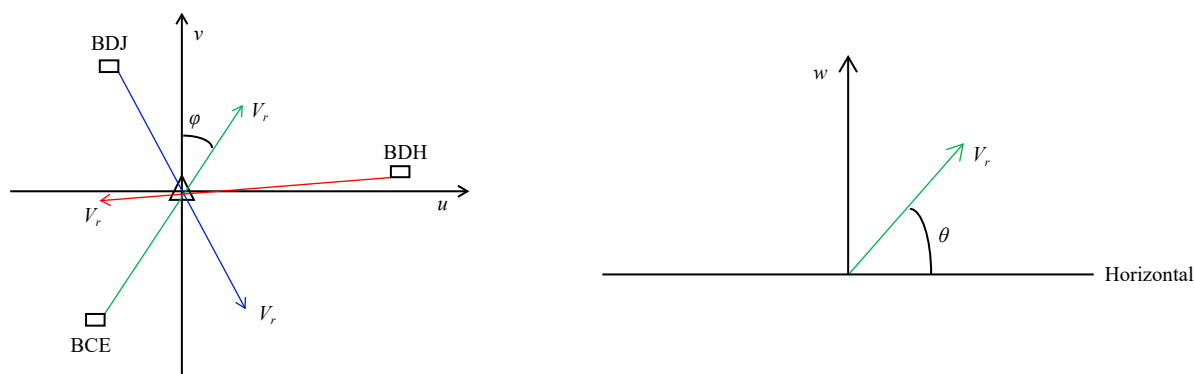


图3 协同观测反演算法示意

Fig. 3 Schematic diagram of the algorithm of cooperative observation

间网格相对于3台测风激光雷达的方位角和俯仰角。试验中铁塔为原点,其空间坐标为 $(0, 0, 0)$ 。根据雷达相对于铁塔的方位角和与铁塔的直线距离(表2),可以计算BDJ、BDH和BCE的空间坐标,分别为 $(-57.62, 90.45, 0)$ 、 $(164.42, 15.83, 0)$ 、 $(-58.53, -129.63, 0)$ 。根据每个三维空间网格的中心坐标 (x, y, z) 和雷达坐标 (x_0, y_0, z_0) 可以计算每个空间网格相对于3台测风激光雷达的方位角和俯仰角。(3)将3台测风激光雷达获取的空间径向风速进行网格平均,确定每个网格内3台测风激光雷达的径向风速。(4)根据第(2)和(3)步获取的每个网格内3台测风激光雷达的俯仰角、方位角和径向风速,利用2.2.1节的三维风速反演算法,计算每个网格的三维风速 u 、 v 和 w ,获取精细化的空间三维风场。

2.2.3 误差分析

基于3台测风激光雷达协同观测技术存在一定的误差,主要有2种:

(1)探测原理误差。测风激光雷达的探测原理是利用激光探测获取大气气溶胶后向散射信号,根据多普勒频移原理计算大气风速。通常而言,测风激光雷达探测的最低距离约为50 m,最低的距离门(range gate)约为15 m。测风激光雷达探测的径向风速是每个距离门上平均的风速,并不是某一位置的风速,这就为湍流和风速计算带来误差,这种由探测原理不同而导致的误差无法避免。文中所用的WindPrint S4000型测风激光雷达的发散角为0.01 mrad,雷达波束宽度为5.5 cm,试验过程中雷达距离铁塔的探测距离为100—200 m(表2),因此波束到达铁塔位置的宽度为5.7—5.9 cm,雷达在铁

塔对比位置的采样体积为直径5.7—5.9 cm,长15 m的圆柱体。而三维超声风速仪在水平方向的测量路径为5.8 cm,垂直方向的测量路径为10 cm,其采样体积为水平直径5.8 cm,垂直直径10 cm的椭球体。两种仪器之间的采样体积差异很大。

(2)探测过程中测风激光雷达间距、方位角和俯仰角等人为误差。协同观测过程中,需利用3台测风激光雷达的间距、方位角和俯仰角来确定探测点的位置。但是雷达伺服的方位角和俯仰角等存在一定的误差,会对最终的探测结果带来影响。文中雷达伺服定位误差约为 0.1° ,当径向距离为1000 m时, 1° 的方位角或俯仰角误差能使探测位置产生17 m的误差。人为误差主要为协同观测过程中雷达位置、定北、摆放是否水平等导致的。为降低人为误差,利用激光测距仪确定测风激光雷达之间的距离和方位,利用高精度水平仪确定测风激光雷达摆放是否水平,利用测风激光雷达靶向性测量的方式确定测风激光雷达定北方位。

3 测风激光雷达的探测性能

开展基于3(多)台测风激光雷达协同观测试验,对测风激光雷达的观测性能和观测一致性有较高的要求。尽管文中所用的3台测风激光雷达为同一厂家、同一型号的产品,并且厂家在设备出厂前均检验了观测精度,但是出于科研的严谨性,试验时仍对3台测风激光雷达进行了观测性能和观测一致性检验。

为了验证测风激光雷达的观测性能,将测风激光雷达的测风结果与中国科学院大气物理研究所325 m铁塔的测风结果进行对比。2017年1月

22日至2月21日,开展了测风激光雷达与铁塔测风对比观测试验。将测风激光雷达放置在距离铁塔西偏北50 m处,开展5波束(东、西、南、北和垂直方向)风廓线探测。大气所325 m气象铁塔安装有15层(8、15、32、47、65、80、100、120、140、160、180、200、240、280、320 m)常规风的观测,风速和风向传感器分别为美国Campbell公司的010C型风速传感器和020C型风向传感器。选取

47—320 m高度的铁塔测风,与最接近铁塔观测高度的测风激光雷达的测风对比分析(图4a、b),发现测风激光雷达和铁塔测风水平风速的相关系数(R)高达0.98,平均误差(BIAS)为0.23 m/s,均方根误差(RMSE)为0.57 m/s;水平风向的相关系数高达0.99,平均误差为 6° ,均方根误差为 16° 。

为了确定测风激光雷达之间的观测一致性,2017年11月7—9日,将其中两台测风激光雷达放在一

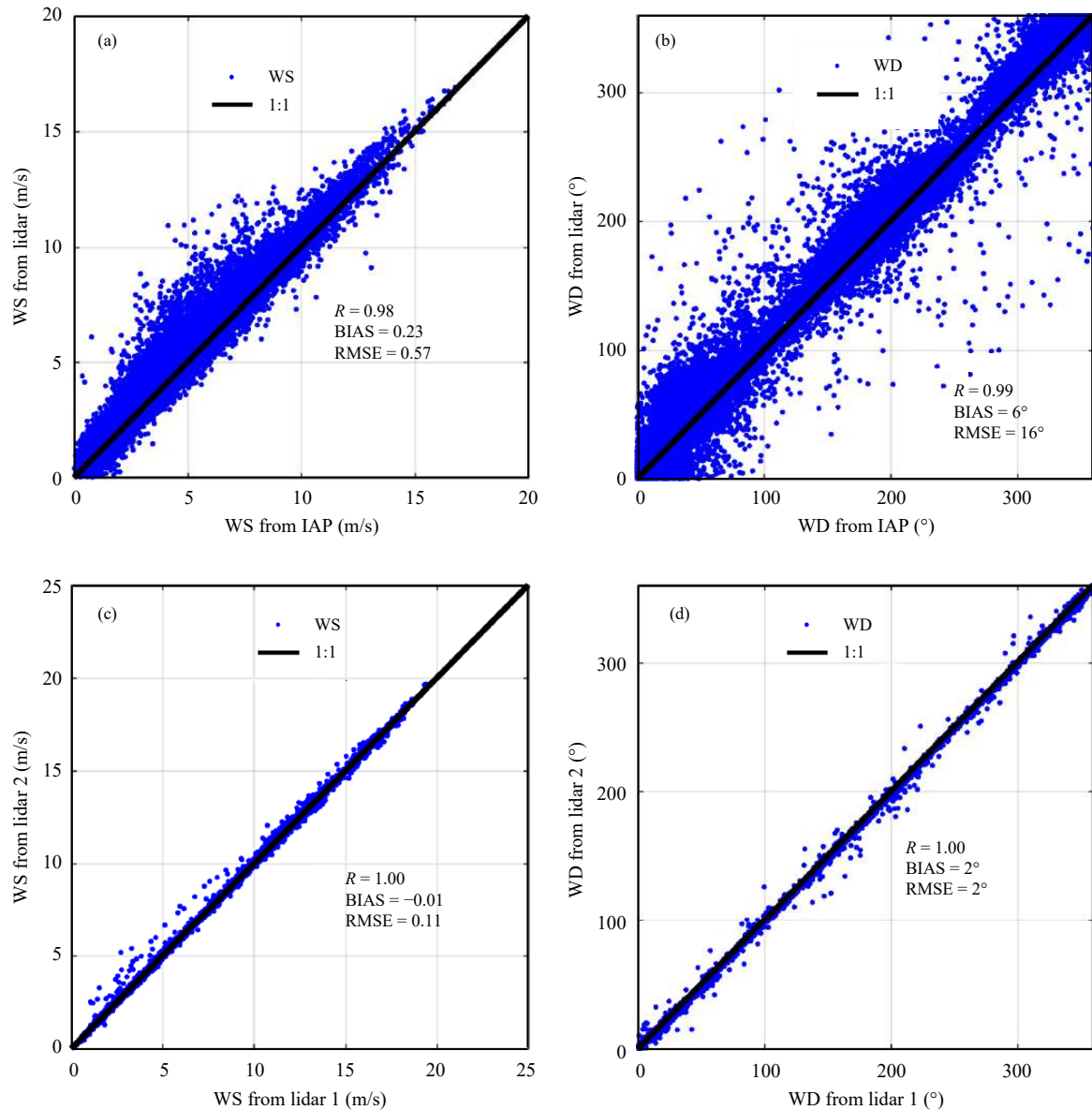


图4 测风激光雷达(lidar)与铁塔测风(IAP)结果对比(a.水平风速(WS),b.水平风向(WD)),(c)、(d)与(a)、(b)类似,但为测风激光雷达(lidar1与lidar2)对比结果

Fig. 4 Comparisons of (a) horizontal wind speed (WS) and (b) horizontal wind direction (WD) between wind lidar (lidar) and tower anemometer (IAP), (c) and (d) are the same as (a) and (b), but for the results between two wind lidars (lidar1, lidar2)

起(两台测风激光雷达之间的距离为 1 m)进行对比验证。均采用 5 波束探测模式开展风垂直廓线探测, 对比测风激光雷达测风结果(图 4c、d)发现, 测风激光雷达之间水平风速的相关系数达 1.00, 平均误差为 -0.01 m/s, 均方根误差为 0.11 m/s; 水平风向的相关系数为 1.00, 平均误差和均方根误差均为 2° 。第三台测风激光雷达也与这两台雷达做过类似的对比验证, 探测一致性也非常好(图略)。

测风激光雷达和铁塔实际探测的水平风速、风向的偏差和均方根误差略偏大, 主要有两方面原因: (1) 测风激光雷达距离铁塔位置较远, 两个位置的平均风存在差异; (2) 测风激光雷达探测的是垂直方向上空间平均的风, 而铁塔测风探测的是某一高度的风, 探测结果存在差异。但测风激光雷达探测性能优于相控阵风廓线雷达(董德保等, 2014)。总的来说, 测风激光雷达探测的风与铁塔的测风结果一致性较好。相对于铁塔测风结果, 测风激光雷达探测结果之间相关性较好、平均误差和均方根误差较小, 表明测风激光雷达之间的探测一致性更高。因此, 此测风激光雷达可用于协同观测试验。

4 虚拟铁塔(VTS)协同观测模式

4.1 风

利用虚拟铁塔协同观测模式获取了 32 和 63 m

高度处 10 Hz 的高频径向风速观测资料, 根据 3 台测风激光雷达的方位角、俯仰角和径向速度, 利用反演算法, 计算两处位置的三维风速 u 、 v 和 w 。与铁塔的三维超声风速仪观测结果对比发现: 32 m 处(图 5a—c), w 的相关性较差, 相关系数仅为 0.56, 而 u 和 v 的相关系数高达 0.95 和 0.86; w 的平均误差和均方根误差为 1.36 和 0.42 m/s, u 和 v 的平均误差为 0.62 和 0.40 m/s、均方根误差为 0.48 和 0.58 m/s。尽管 w 的均方根误差较小, 但 w 的量级较小, 反演效果较差。这主要是由于探测高度较低, 雷达俯仰角较小, 雷达径向速度的方向与 w 的方向近乎垂直, 使得反演的 w 的噪声较大。随着探测高度的升高, w 的反演效果有明显提高(图 5g)。

由 u 、 v 和 w 可计算风速 (SPD)

$$\text{SPD} = \frac{1}{2} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (6)$$

与三维超声风速仪探测的风速相比(图 5d), 其相关系数为 0.92, 平均误差为 0.77 m/s, 均方根误差为 0.41 m/s。

与 32 m 处的结果相比, 反演的三维风在 63 m 处与实测结果更接近。尽管 u 风的差异更大, 相关系数降为 0.76, 但是 v 和 w 风协同观测反演的结果与三维超声风速仪的观测结果更接近, 尤其是 w 风, 其相关系数达到 0.80, 平均误差和均方根误

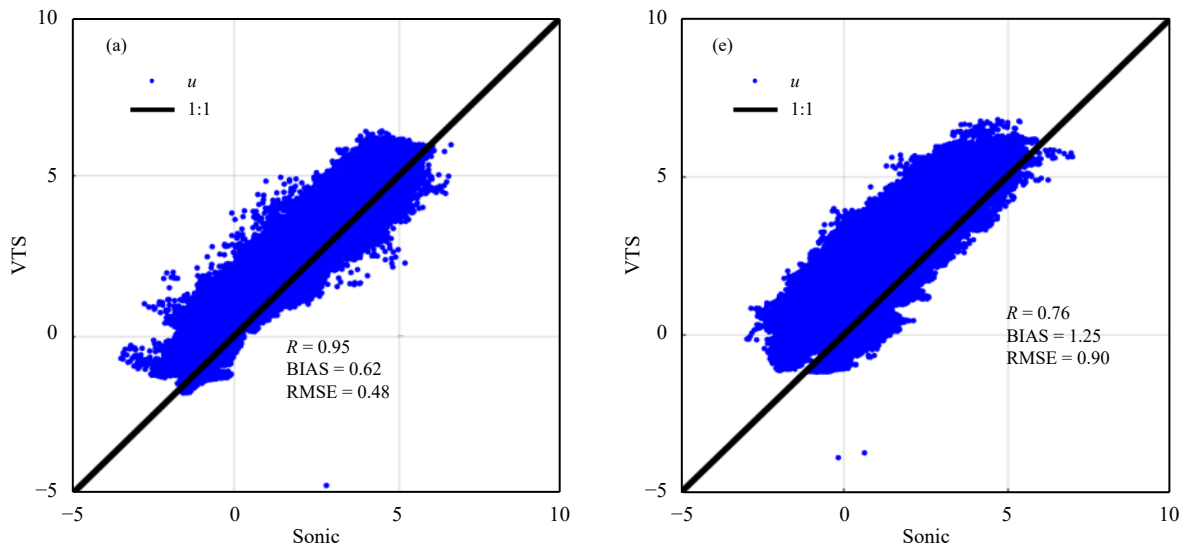
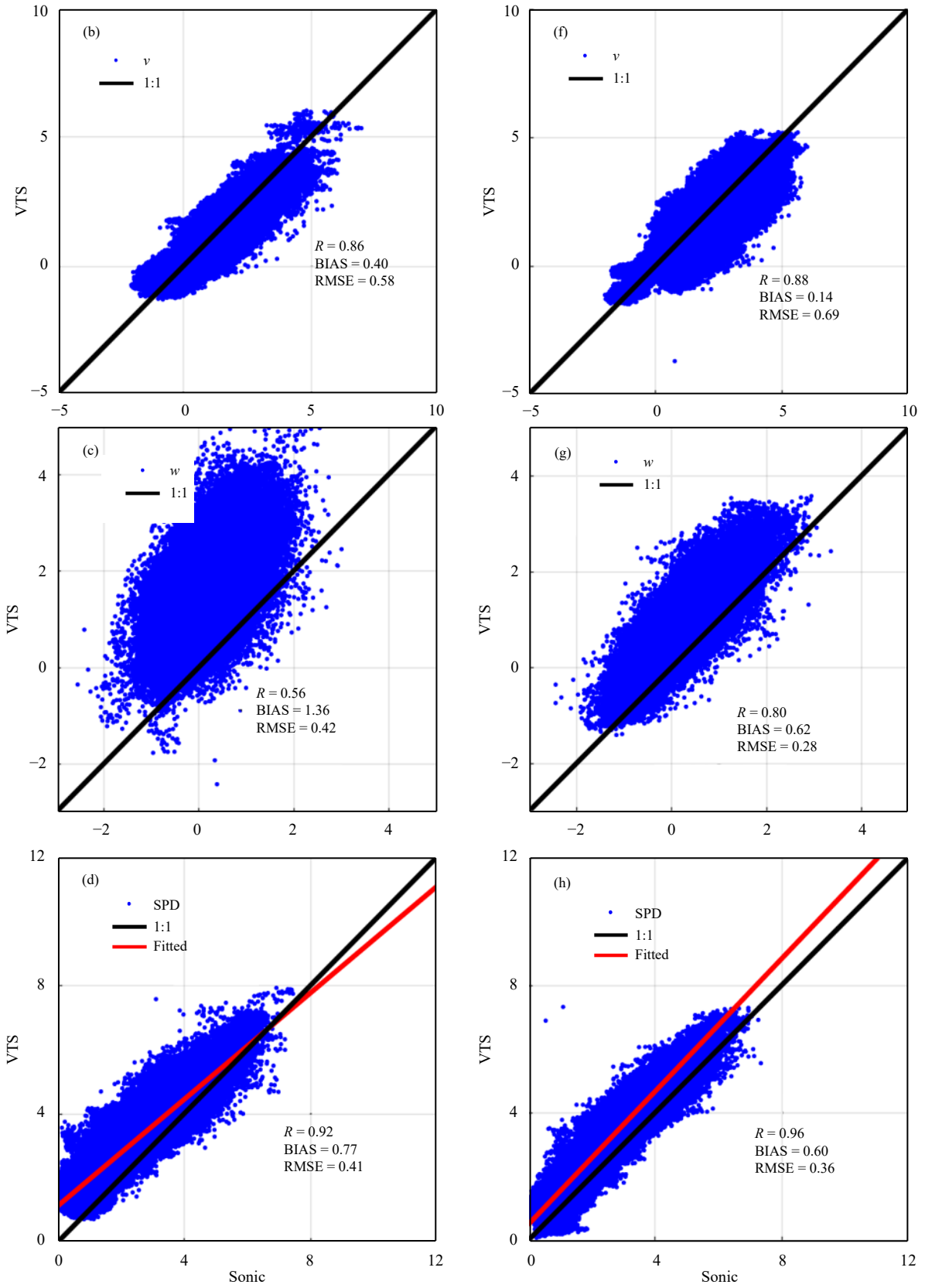


图 5 虚拟铁塔协同观测模式 (VTS) 反演的 10 Hz 风与三维超声风速仪 (sonic) 的对比结果

(a—d. 32 m 高度 u 、 v 、 w 和风速, e—h. 63 m 高度 u 、 v 、 w 和风速; 单位: m/s)

Fig. 5 Comparison results of high frequency (10 Hz) u 、 v 、 w and SPD at 32 m (a—d) and 63 m (e—h) between observations of VTS and sonic (unit: m/s)



续图 5

Fig. 5 Continued

差分别降为 0.62 和 0.28 m/s(图 5g)。风速的相关系数高达 0.96, 平均误差和均方根误差分别为 0.60 和 0.36 m/s(图 5h)。由此可见, 随着探测高度的升高, 虚拟铁塔协同观测模式对高频风速的探测效果有一定的提升, 尤其在 w 风上, 这与 Choukulkar 等 (2017) 的研究结论一致。

对 10 Hz 频率的高频三维风做 5 min 平均, 将其与三维超声风速仪的观测结果对比, 发现其与 10 Hz 高频三维风的结果类似(图 5 和 6): 对 u 和 v 风的观测效果较好, w 风的观测效果较差。

对于平均风, 由于垂直速度的量级较低, 人们常常关注水平风速和风向。将反演的水平风速、风

向与铁塔三维超声风速仪实测结果对比, 32 和 63 m 处: 水平风速的相关系数分别为 0.96 和 0.98, 平均误差分别为 0.34 和 0.51 m/s, 均方根误差分别为 0.30 和 0.32 m/s; 水平风向的相关系数分别为 0.98 和 0.94, 平均误差分别为 25°和 28°, 均方根误差分别为 18°和 24°。从图 7b 和 d 可知, 协同观测对水平风向的反演效果与风向有很大关系, 西南风时反演的风向与实测风向最接近, 这与三维超声风速仪的安装位置有关。三维超声风速仪安装在铁塔的西南方位, 其余风向下, 受铁塔的影响, 三维超声风速仪和协同观测反演的风向均有一定影响(McCaffrey, et al, 2017)。

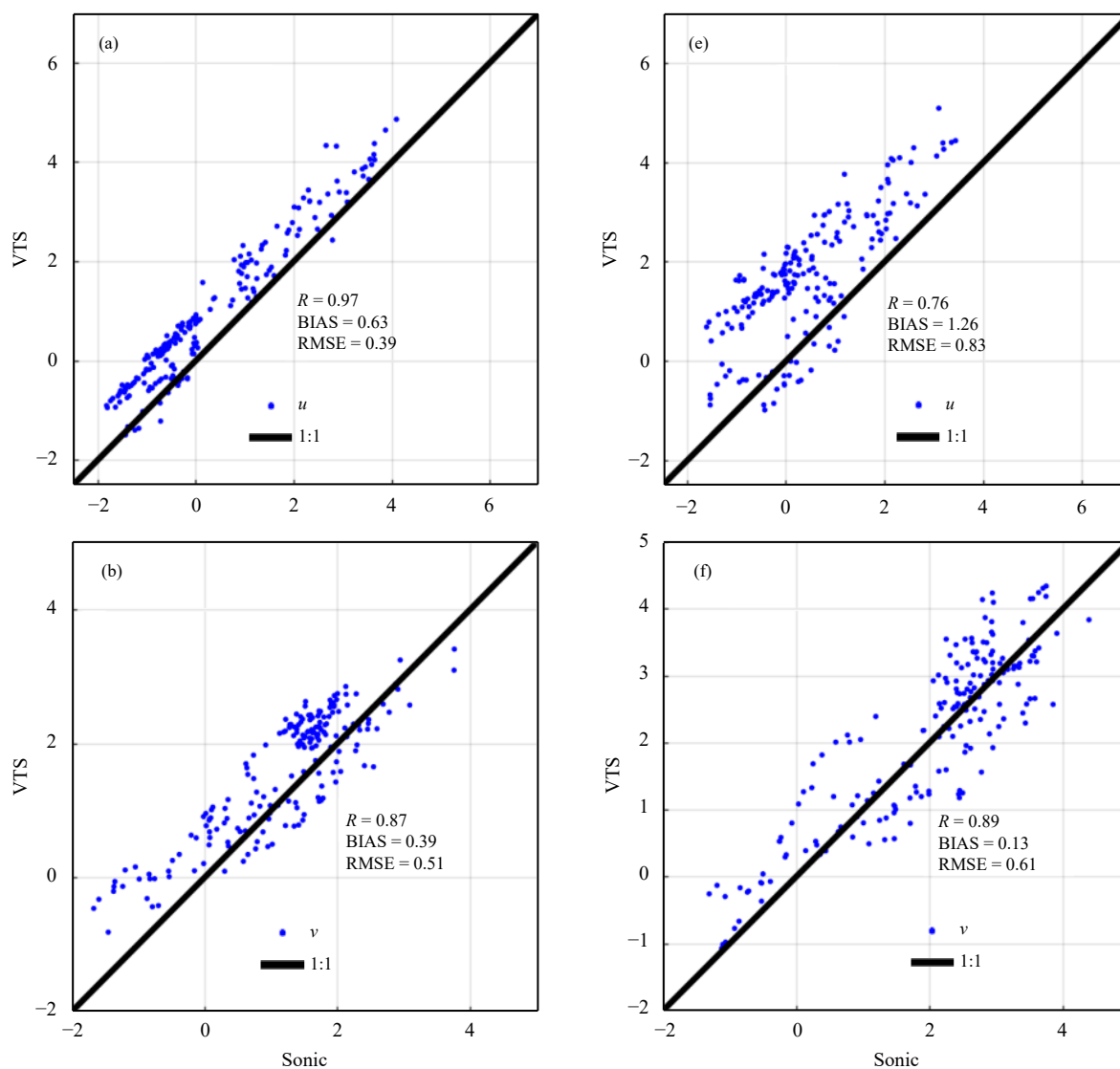
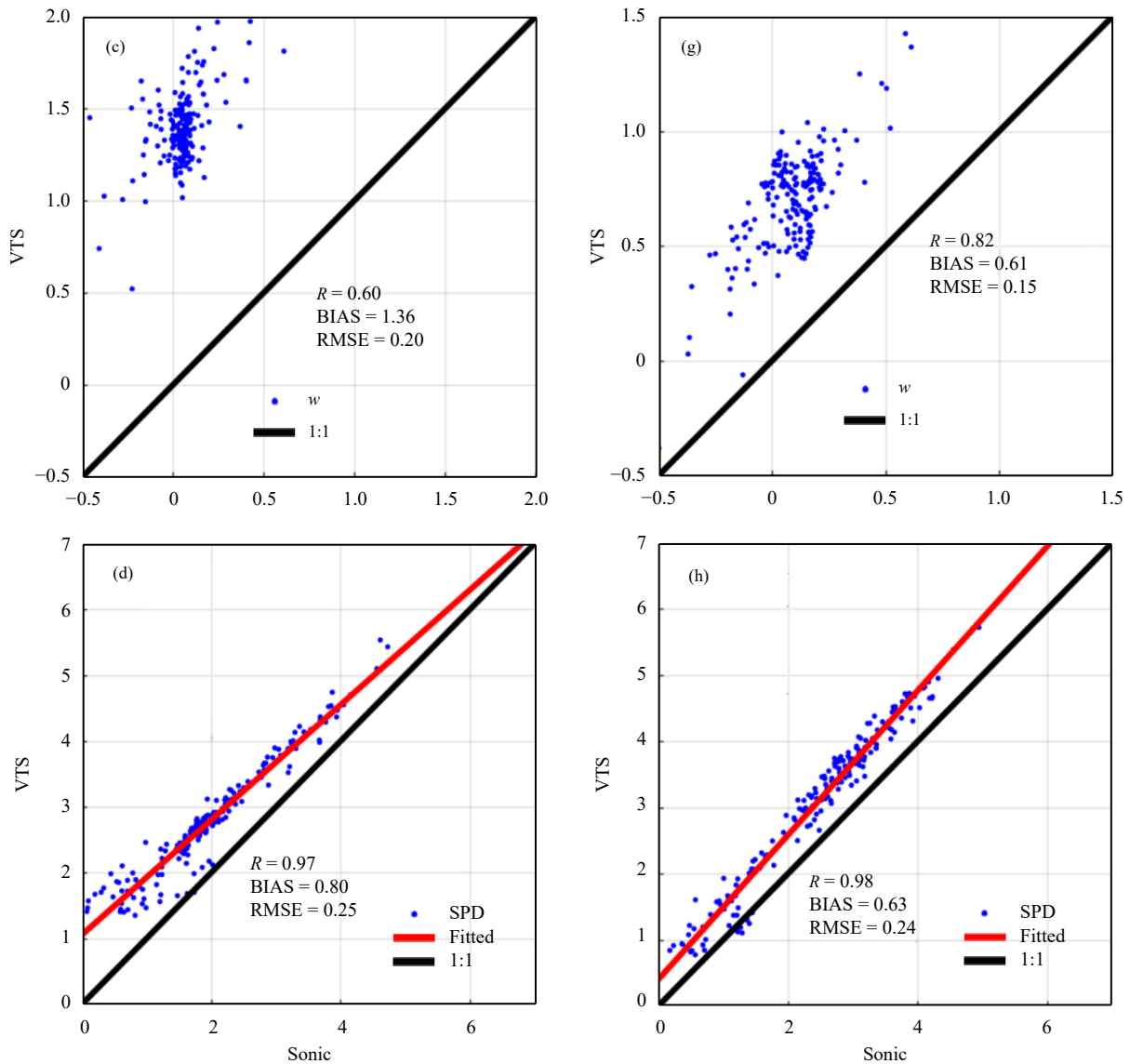


图 6 同图 5, 但为 5 min 平均结果

Fig. 6 Same as Fig. 5 but for the results of 5 min average



续图 6

Fig. 6 Continued

4.2 湍流强度

尽管虚拟铁塔模式反演的风速比三维超声风速仪观测的风速偏大,但是基于虚拟铁塔协同观测模式反演的 10 Hz 高频风计算的 5 min 平均的湍流强度 (TKE) 与三维超声风速仪的结果比较一致 (图 8)。在 32 和 63 m 处,其相关系数均为 0.99,平均误差分别为 -0.02 和 $-0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2$,均方根误差分别为 0.08 和 $0.06 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。虚拟铁塔协同观测模式反演的高频三维风速与实测结果有一定的偏差,但是其相关性较高 (图 5 和 6),风速脉动一致性较强。而大气湍流强度表征风速脉动的强弱,因此虚拟铁

塔协同观测模式能够很好地反演大气湍流强度,获取大气湍流信息。

大气中湍流运动是由无数大大小小的湍涡组成,谱分析是了解湍流运动的一个有力工具。选取 32 和 63 m 高度中午和夜晚的高频风速进行功率谱分析,研究不同层结稳定度下虚拟铁塔协同观测模式反演的大气湍流谱结构。从功率谱分析结果 (图 9) 可知,虚拟铁塔协同观测模式反演的风与三维超声风速仪实测的风具有相同的频谱结构,在惯性子区均满足 Kolmogorov (1941) 提出的 $-5/3$ 能量串级理论。说明虚拟铁塔协同观测反演的大气湍

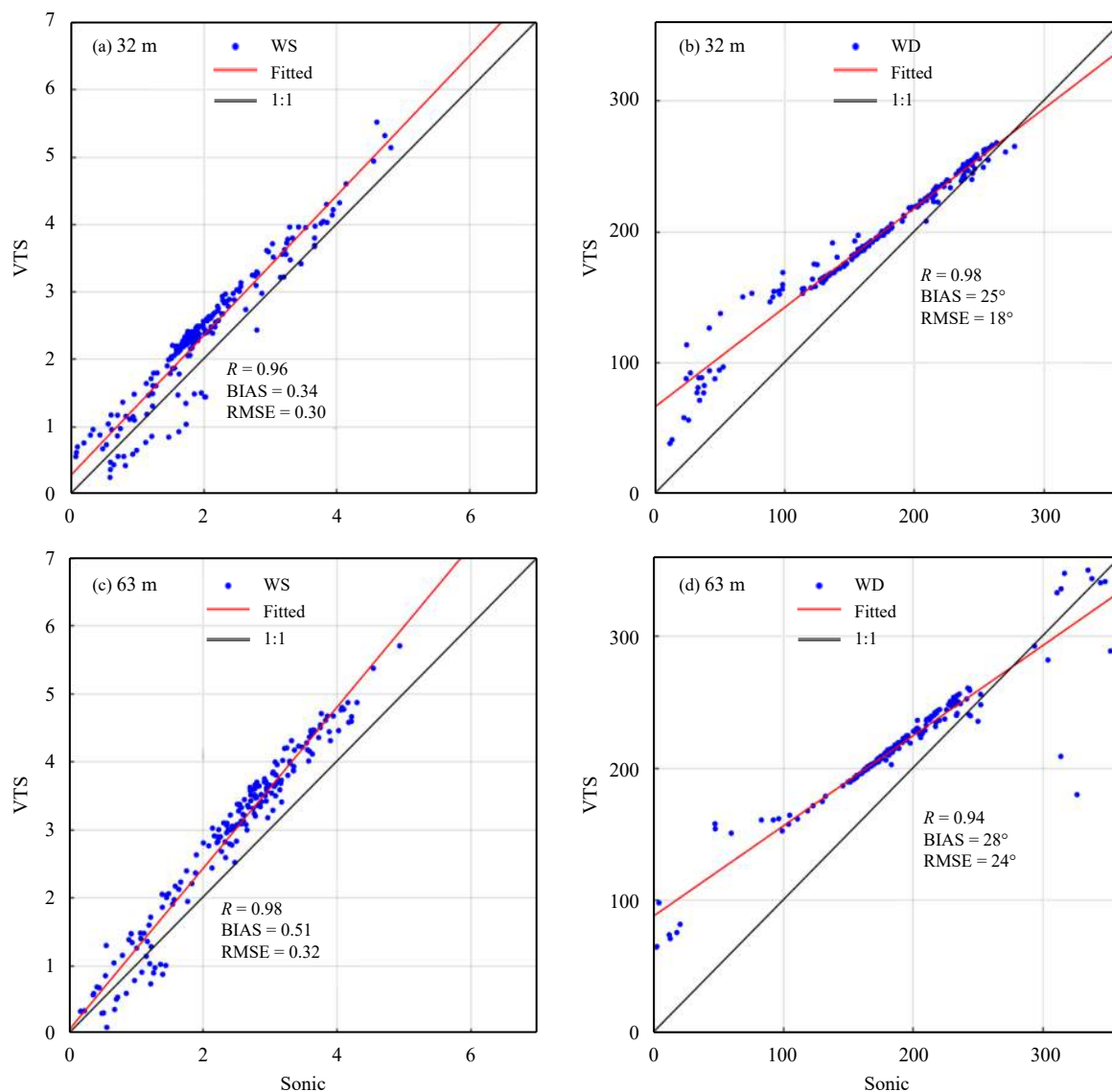


图7 同图6, 但为水平风速 (a, c, 单位: m/s) 和水平风向 (b, d, 单位: °) 的结果

Fig. 7 Same as Fig. 6 but for the results of horizontal wind speed (WS)(a, c; unit:m/s) and direction (WD)(b, d; unit: °)

流与三维超声风速仪观测的大气湍流具有同样的物理意义, 可用于大气湍流的研究。

5 扫描协同观测模式

利用3台测风激光雷达开展扫描协同观测, 获取精细化空间三维风场, 分析其变化特征。BDJ和BCE进行PPI扫描, 通过改变俯仰角获取空间径向风速; BDH进行RHI扫描, 通过改变方位角获取空间径向风速, 详细扫描角度见表2。利用2.2.2节三维风场反演算法, 获取精细化三维空间风场。

将获取的精细化三维空间风场与香河102 m

铁塔常规测风结果进行对比(图10)发现, 30 m处, 10 min 平均的水平风速和风向的相关系数分别为0.77和0.89, 平均误差为-0.75 m/s和2°, 均方根误差为0.88 m/s和38°; 60 m处相关系数分别为0.71和0.94, 平均误差为-0.33 m/s和-6°, 均方根误差为1.43 m/s和30°; 90 m处相关系数分别为0.92和0.93, 平均误差为-0.41 m/s和0°, 均方根误差为0.73 m/s和34°。

基于获取的精细化三维空间风场, 分析了风场的空间变化特征。从给出的2018年3月24日铁塔常规测风的风廓线(图11a)可见, 04时之前, 100 m

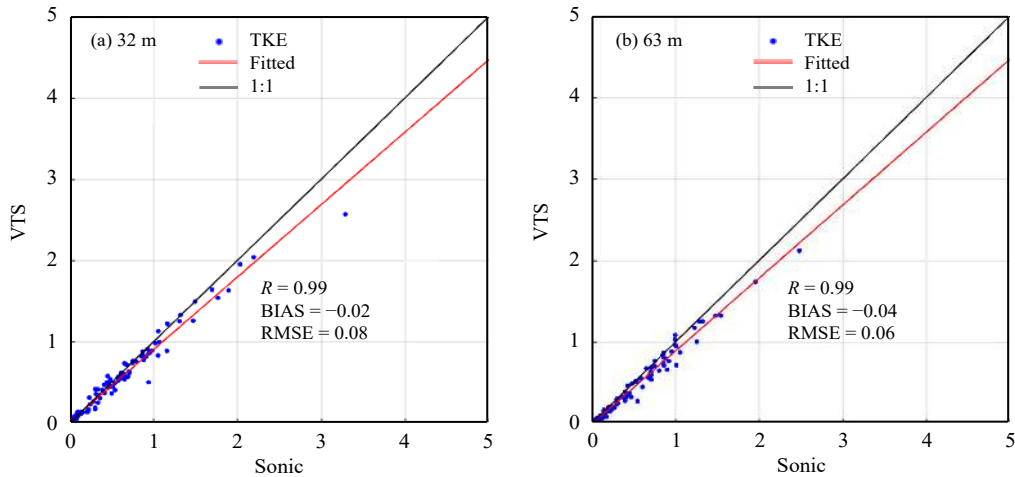


图 8 同图 7, 但为 5 min 平均湍流动能 (TKE) 的结果(单位: m^2/s^2)

Fig. 8 Same as Fig. 7 but for the results of 5 min average turbulent energy (TKE)(unit: m^2/s^2)

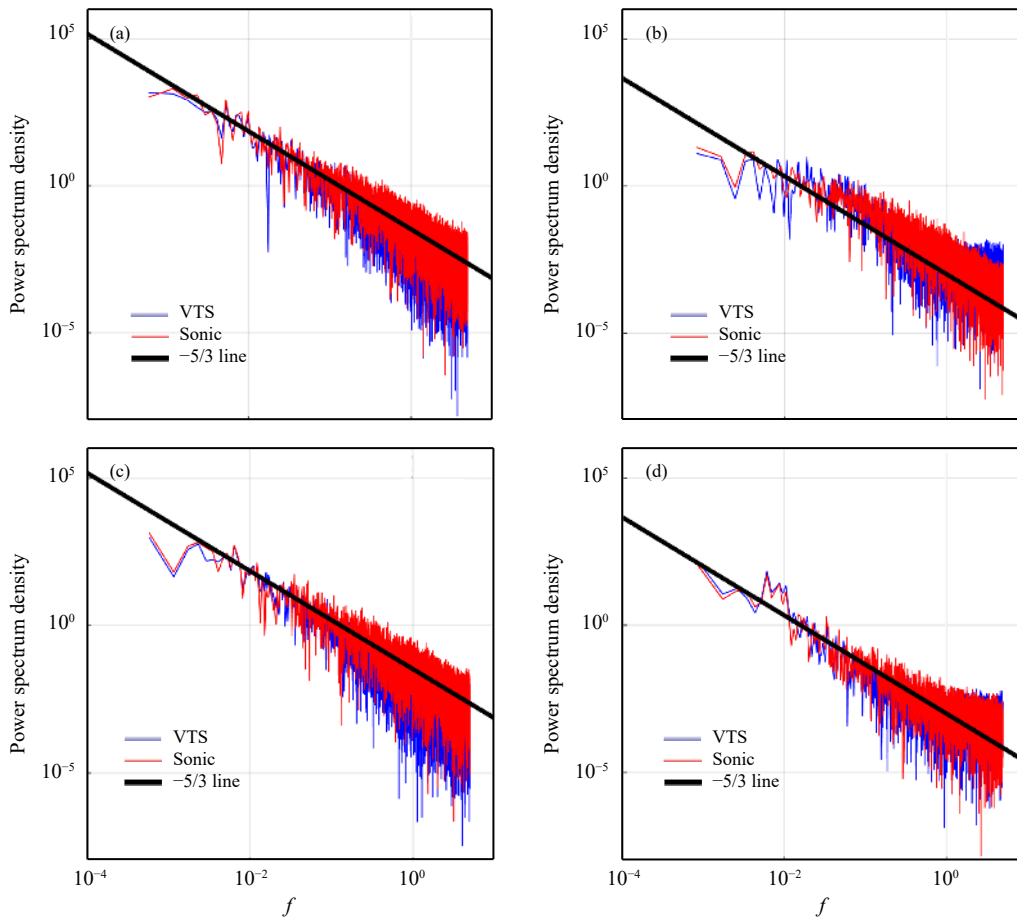


图 9 虚拟铁塔协同观测模式和三维超声风速仪风速的功率谱对比分析 (a, b. 32 m 高度中午 (2018 年 3 月 21 日 13 时 00—30 分) 和夜间 (2018 年 3 月 22 日 00 时 00—30 分) 的结果, c, d. 63 m 高度中午 (2018 年 3 月 21 日 13 时 30 分—14 时) 和夜间 (2018 年 3 月 22 日 01 时 30 分—02 时) 的结果, 黑色实线为 $-5/3$ 斜率直线)

Fig. 9 Comparison results of power spectrum density of SPD between VTS and sonic anemometer (a, b. The results at noon (13:00—13:30 BT 21 March 2018) and midnight (00:00—00:30 BT 22 March 2018) at 32 m; c, d. The results at noon (13:30—14:00 BT 21 March 2018) and midnight (01:30—02:00 BT 22 March 2018) at 63 m. The black solid line is the $-5/3$ slope line)

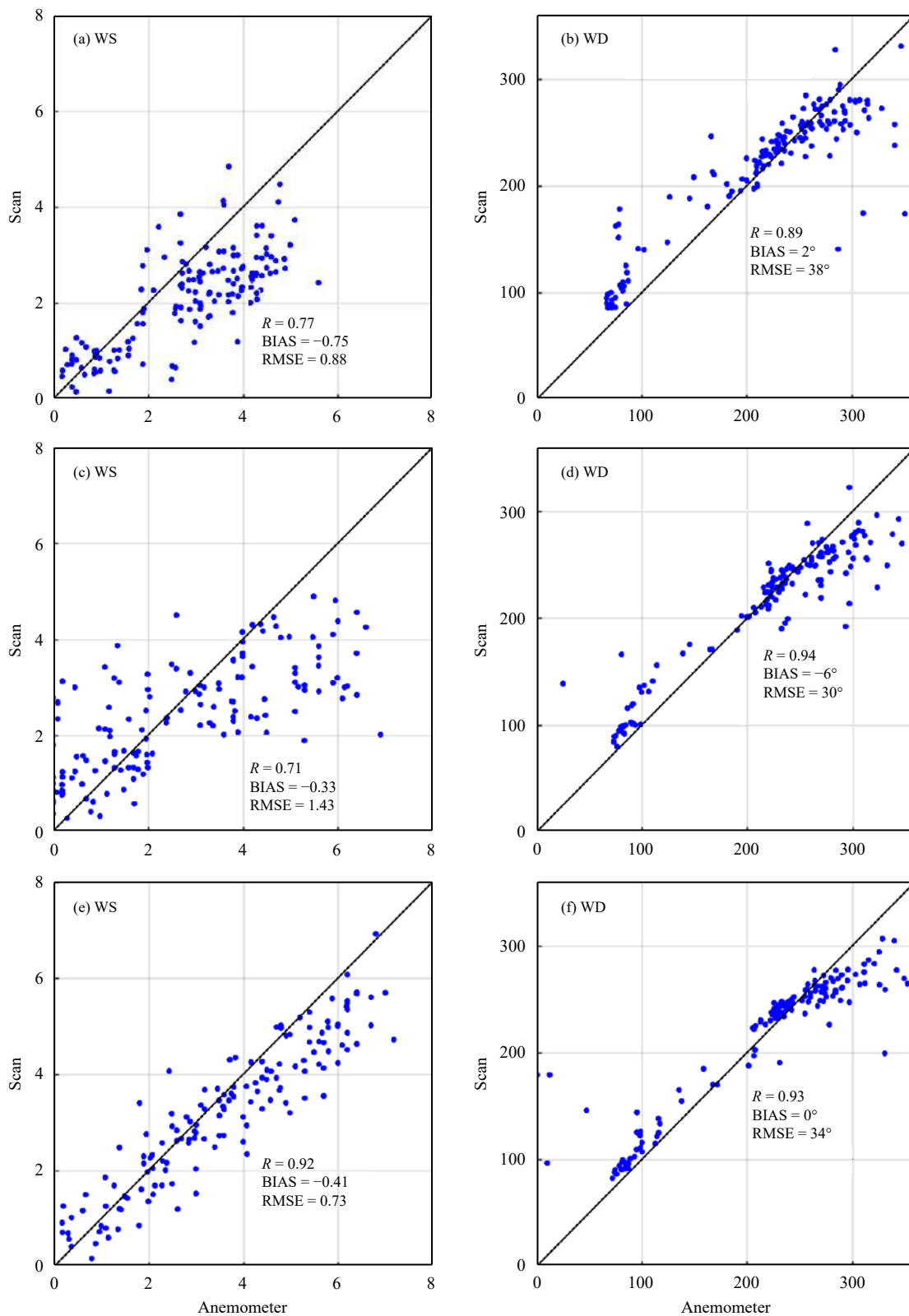


图 10 扫描协同观测模式与香河 102 m 铁塔常规测风 (a、c、e. 风速, 单位: m/s; b、d、f. 风向, 单位: °) 对比 (a、b. 30 m 高度水平风速和风向, c、d. 60 m 高度水平风速和风向, e、f. 90 m 高度水平风速和风向)

Fig. 10 Comparison results of horizontal wind speed (WS, a, c, e. unit: m/s) and direction (WD, d, f. unit: °) at 30 m (a, b), 60 m (c, d), and 90 m (e, f) between observations of scan cooperative and tower anemometer

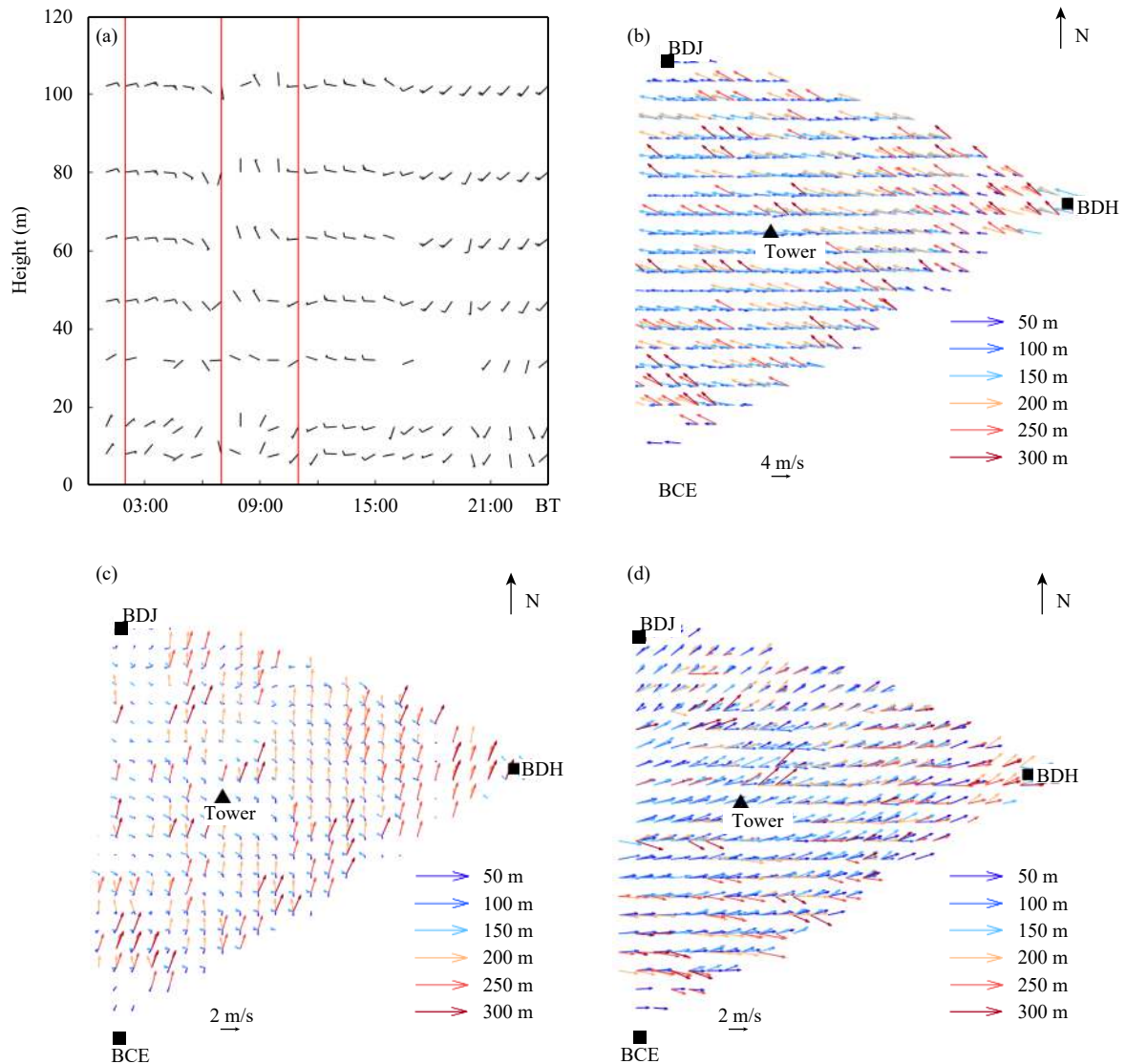


图 11 2018 年 3 月 24 日 (a) 铁塔常规梯度风廓线, (b) 02、(c) 07、(d) 11 时扫描模式协同观测获取的不同高度 (50、100、150、200、250、300 m) 10 min 平均水平风场 (时间与 (a) 中红色实线相对应)

Fig. 11 (a) Tower anemometer wind profiles, and 10 min average horizontal wind field from scan cooperative observation at 50, 100, 150, 200, 250, 300 m at 02: 00 BT (b), 07: 00 BT (c), 11: 00 BT (d) on 24 March 2018 (The red solid lines in (a) correspond to observation times for (b), (c), (d))

高度以内, 整层均为偏东风; 04—09 时, 由偏东风转为偏西风, 并持续到夜间。图 11b、c 和 d 给出了不同时刻 (02、07、11 时) 6 层观测高度 (50、100、150、200、250 和 300 m) 的水平风场。由扫描协同观测模式获取的 02 时三维风场 (图 11b) 可知, 三维空间都是偏东风, 风的水平空间变化不大, 垂直方向上, 水平风向存在一个顺时针方向风切变。在偏东风向偏西风转变的过程中, 风的空间变化比较大 (图 11c), 并且在垂直方向上低层为偏东或偏东北

风, 高层为偏南或偏西南风, 风切变较大。偏西风时 (图 11d) 空间变化不大。

6 总结与讨论

基于 3 台测风激光雷达开展虚拟铁塔和扫描协同观测试验, 分别获取了大气湍流和三维风场资料, 与铁塔搭载的测风设备进行对比, 研究协同观测技术反演的大气湍流和三维风场的观测精度, 主要结论如下:

(1) 虚拟铁塔协同观测模式可以反演高频(10 Hz)三维风速, 相对于 w 来说, u 和 v 的反演效果更好。在 32 和 63 m 处, 虚拟铁塔协同观测模式反演的高频风速与实测风速的相关系数分别为 0.92 和 0.96, 平均误差分别为 0.77 和 0.60 m/s, 均方根误差分别为 0.41 和 0.36 m/s。虚拟铁塔的反演效果随着高度的升高有所提升, 这与 Choukulkar 等(2017)的研究结果一致。

(2) 虚拟铁塔协同观测模式能够很好地反演大气湍流强度, 在 32 和 63 m 的相关系数均为 0.99, 平均误差为 -0.02 和 -0.04 m^2/s^2 , 均方根误差为 0.08 和 0.06 m^2/s^2 , 观测结果较好。虚拟铁塔模式探测的高频风速与实测风速具有相同的频谱结构, 在惯性子区均符合 $-5/3$ 定律。

(3) 扫描协同观测模式可以获取精细化空间三维风场, 与铁塔搭载的常规测风设备相比, 10 min 平均的水平风速和风向(90 m 高度处)的相关系数分别为 0.92 和 0.93, 平均误差为 -0.41 m/s 和 0° , 均方根误差为 0.73 m/s 和 34° 。与虚拟铁塔协同观测模式相比, 其相关系数有所减小, 均方根误差增大, 观测结果的不确定性较大。

相对于单台或两台测风激光雷达, 基于 3 台测风激光雷达协同观测技术开展大气湍流和三维风场探测具有一定的优势, 不需要风场水平均匀等假设、观测精度更高。但也存在一定的劣势, 3 台测风激光雷达协同观测对观测场地、雷达的协同性等有一定的要求, 观测条件比单台或两台测风激光雷达更苛刻。在科研业务应用中, 需根据实际的观测任务需求, 合理设计观测方案。

致谢: 感谢中国科学院大气物理研究所李爱国、南卫东和贾京京提供的香河 102 m 气象铁塔搭载的三维超声风速仪和常规测风观测资料。

参考文献

陈冬, 王江安, 王乐东. 2012. 激光雷达湍流大气探测. 光学与光电技术, 10(1): 63-66. Chen D, Wang J A, Wang L D. 2012. A new method for atmosphere turbulence detection by lidar. Opt Optoelectron Technol, 10(1): 63-66 (in Chinese)

崔朝龙, 黄宏华, 梅海平等. 2013. 探测大气湍流的光强闪烁激光雷达. 强激光与粒子束, 25(5): 1091-1096. Cui C L, Huang H H, Mei H P, et al. 2013. Turbulent scintillation lidar for acquiring atmospheric turbulence information. High Power Laser Particle Beams, 25(5): 1091-1096 (in Chinese)

董德保, 张统明, 芮斌. 2014. 风廓线雷达大气风场观测误差分析. 气象科技, 42(1): 48-53. Dong D B, Zhang T M, Rui B. 2014. Wind profiler radar observation error analysis of atmospheric wind fields. Meteor Sci Technol, 42(1): 48-53 (in Chinese)

高祝宇, 阮征, 魏鸣等. 2016. 风廓线雷达数据质量影响因子及处理算法. 应用气象学报, 27(2): 148-159. Gao Z Y, Ruan Z, Wei M, et al. 2016. Quality factors and processing algorithm for wind profiling radar data. J Appl Meteor Sci, 27(2): 148-159 (in Chinese)

黄小彦, 孙继松, 刘文婷. 2020. 地形作用下低空急流的演变与强降水对流风暴系统的相互作用. 气象学报, 78(4): 551-567. Huang X Y, Sun J S, Liu W T. 2020. The interaction between low-level jet evolution and severe convective rainstorms under topographic effect. Acta Meteor Sinica, 78(4): 551-567 (in Chinese)

刘树华, 李洁, 刘和平等. 2005. 在 EBEX-2000 实验资料中湍流谱和局地各向同性特征. 大气科学, 29(2): 213-224. Liu S H, Li J, Liu H P, et al. 2005. Characteristics of turbulence spectra and local isotropy in EBEX-2000. Chinese J Atmos Sci, 29(2): 213-224 (in Chinese)

刘源, 刘继桥, 陈卫标. 2009. 人眼安全相干多普勒测风激光雷达全光纤单频激光器. 中国激光, 36(7): 1857-1860. Liu Y, Liu J Q, Chen W B. 2009. An all-fiber single frequency laser for eye-safe coherent Doppler wind lidar. Chinese J Lasers, 36(7): 1857-1860 (in Chinese)

罗涛, 袁仁民, 吴晓庆等. 2008. 正交小波变换研究复杂下垫面边界层的湍流特征. 高原气象, 27(6): 1195-1204. Luo T, Yuan R M, Wu X Q, et al. 2008. Turbulent characteristics of atmospheric boundary layer under complex underlying using discrete orthogonal wavelet transform. Plateau Meteor, 27(6): 1195-1204 (in Chinese)

全利红, 袁春红, 王丙兰. 2016. 应用印痕函数研究测风塔资料代表性. 气象学报, 74(3): 442-449. Quan L H, Yuan C H, Wang B L. 2016. Application of footprint function in characterizing the representation of wind tower data. Acta Meteor Sinica, 74(3): 442-449 (in Chinese)

王春晖, 李彦超, 徐博等. 2008. 激光测风雷达速度方位显示反演中数据质量的控制方法与仿真. 中国激光, 35(4): 515-518. Wang C H, Li Y C, Xu B, et al. 2008. Method and simulation of data quality control in velocity azimuth display inversion of wind lidar. Chinese J Lasers, 35(4): 515-518 (in Chinese)

王树宝, 拱长青, 王富良等. 2009. TCP/IP 网络时间同步机制的误差分析. 计算机工程, 35(18): 111-112, 115. Wang S B, Gong C Q, Wang F L, et al. 2009. Error analysis of time synchronization mechanism in TCP/IP network. Comput Eng, 35(18): 111-112, 115 (in Chinese)

杨璐, 陈敏, 陈明轩等. 2019. 高时空分辨率三维风场在强对流天气临近预报中的融合应用研究. 气象学报, 77(2): 243-255. Yang L, Chen M, Chen M X, et al. 2019. Fusion of 3D high temporal and spatial resolution wind field and its application in nowcasting of severe convective weather. Acta Meteor Sinica, 77(2): 243-255 (in Chinese)

袁仁民. 2005. 白天混合层顶部夹卷层厚度的特征研究. 地球物理学报, 48(1): 19-24. Yuan R M. 2005. A study on characteristics of thickness of the entrainment zone above the mixed layer in the daytime. Chinese J

- Geophys, 48(1): 19-24 (in Chinese)
- 张宏昇, 张小曳, 李倩惠等. 2020. 大气边界层高度确定及应用研究进展. 气象学报, 78(3): 522-536. Zhang H S, Zhang X Y, Li Q H, et al. 2020. Research progress on estimation of atmospheric boundary layer height. Acta Meteor Sinica, 78(3): 522-536 (in Chinese)
- 张洪玮, 吴松华, 尹嘉萍等. 2018. 基于短距相干测风激光雷达的机场低空风切变观测. 红外与毫米波学报, 37(4): 468-476. Zhang H W, Wu S H, Yin J P, et al. 2018. Airport low-level wind shear observation based on short-range CDL. J Infrared Millim Waves, 37(4): 468-476 (in Chinese)
- 张旭斌, 万齐林, 薛纪善等. 2015. 风廓线雷达资料质量控制及其同化应用. 气象学报, 73(1): 159-176. Zhang X B, Wan Q L, Xue J S, et al. 2015. Quality control of wind profile radar data and its application to assimilation. Acta Meteor Sinica, 73(1): 159-176 (in Chinese)
- Aitken M L, Rhodes M E, Lundquist J K. 2012. Performance of a wind-profiling lidar in the region of wind turbine rotor disks. J Atmos Oceanic Technol, 29(3): 347-355
- Aitken M L, Banta R M, Pichugina Y L, et al. 2014. Quantifying wind turbine wake characteristics from scanning remote sensor data. J Atmos Oceanic Technol, 31(4): 765-787
- Baker W E, Emmitt G D, Robertson F, et al. 1995. Lidar-measured winds from space: A key component for weather and climate prediction. Bull Amer Meteor Soc, 76(6): 869-888
- Berg J, Mann J, Patton E G. 2013. Lidar-observed stress vectors and veer in the atmospheric boundary layer. J Atmos Oceanic Technol, 30(9): 1961-1969
- Bonin T A, Choukulkar A, Brewer W A, et al. 2017. Evaluation of turbulence measurement techniques from a single Doppler lidar. Atmos Meas Tech, 10(8): 3021-3039
- Browning K A, Wexler R. 1968. The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. J Appl Meteor, 7(1): 105-113
- Cherukuru N W, Calhoun R, Krishnamurthy R, et al. 2017. 2D VAR single Doppler lidar vector retrieval and its application in offshore wind energy. Energy Procedia, 137: 497-504
- Choukulkar A, Calhoun R, Billings B, et al. 2012. A modified optimal interpolation technique for vector retrieval for coherent Doppler LIDAR. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 9(6): 1132-1136
- Choukulkar A, Brewer W A, Sandberg S P, et al. 2017. Evaluation of single and multiple Doppler lidar techniques to measure complex flow during the XPIA field campaign. Atmos Meas Tech, 10(1): 247-264
- Drechsel S, Mayr G J, Chong M, et al. 2009. Three-dimensional wind retrieval: Application of MUSCAT to dual-Doppler lidar. J Atmos Oceanic Technol, 26(3): 635-646
- Fuertes F C, Iungo G V, Porté-Agel F. 2014. 3D turbulence measurements using three synchronous wind lidars: Validation against sonic anemometry. J Atmos Oceanic Technol, 31(7): 1549-1556
- Hill M, Calhoun R, Fernando H J S, et al. 2010. Coplanar Doppler lidar retrieval of rotors from T-REX. J Atmos Sci, 67(3): 713-729
- Huang M, Gao Z Q, Miao S G, et al. 2017. Estimate of boundary-layer depth over Beijing, China, using Doppler lidar data during SURF-2015. Bound-Layer Meteor, 162(3): 503-522
- Klein P, Bonin T A, Newman J F, et al. 2015. LABEL: A multi-institutional, student-led, atmospheric boundary layer experiment. Bull Amer Meteor Soc, 96(10): 1743-1764
- Kolmogorov A N. 1941. Energy dissipation in locally isotropic turbulence. Doklady AN SSSR, 32(1): 19-21
- Li J, Sun J L, Zhou M Y, et al. 2018. Observational analyses of dramatic developments of a severe air pollution event in the Beijing area. Atmos Chem Phys, 18(6): 3919-3935
- Mann J, Peña A, Bingöl F, et al. 2010. Lidar scanning of momentum flux in and above the atmospheric surface layer. J Atmos Oceanic Technol, 27(6): 959-976
- McCaffrey K, Quelet P T, Choukulkar A, et al. 2017. Identification of tower-wake distortions using sonic anemometer and lidar measurements. Atmos Meas Tech, 10(2): 393-407
- Sathe A, Mann J, Gottschall J, et al. 2011. Can wind lidars measure turbulence?. J Atmos Oceanic Technol, 28(7): 853-868
- Tucker S C, Senff C J, Weickmann A M, et al. 2009. Doppler lidar estimation of mixing height using turbulence, shear, and aerosol profiles. J Atmos Oceanic Technol, 26(4): 673-688
- Young G S, Cameron B K, Hebble E E. 2000. Observations of the entrainment zone in a rapidly entraining boundary layer. J Atmos Sci, 57(18): 3145-3160