

文章编号: 0253-2239(2010)s100510

一种新型的空中运动目标信息获取算法的研究

吴永华 胡以华 顾有林 张林虎 徐世龙

¹ 脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037
² 安徽省电子制约技术重点实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 针对空中运动目标雷达截面积小、速度快的特点以及雷达、红外等常规目标探测手段探测效果差、探测效率低的现状,提出了一种基于激光雷达探测风场扰动来获取空中运动目标信息的算法,给出了基于风场扰动的运动目标信息获取的基本原理和主要流程。基于接收大气反射的激光回波信号,通过径向和水平风速反演算法获得扫描区域内的风场分布;滤除背景风场影响获得扰动风场分布,并结合运动目标信息获取算法完成目标的位置、属性等信息获取。实验表明,基于该算法获取目标位于径向距离 800 m,仰角 82°处的结论与实际情况基本吻合,从而验证了该新型目标探测手段切实可行,为未来空中运动目标的高效探测发现提供了一种崭新的途径。

关键词 探测;目标信息获取算法;空中运动目标;大气风场;激光雷达

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201030.s100510

Research on a New Air Moving Target Information Acquisition Algorithm

Wu Yonghua Hu Yihua Gu Youlin Zhang Linhu Xu Shilon

¹ State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (Electronic Engineering Institute),
Hefei, Anhui 230037, China
² Anhui Key Laboratory of Electronic Restriction, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract Based on the characteristics of small radar cross section, high speed of air moving target, the existing condition of shitty target detection effect and low detection efficiency of those conventional radar and infrared means, a new algorithm of acquiring air moving target information based on wind field disturbance detected by lidar is proposed. The basic principle and main process of moving target information acquisition based on wind field disturbance is given. Through receiving the laser echo signal reflected by atmosphere and the retrieval algorithm of radial and horizontal wind speed, the wind field distribution in scanning area can be acquired. Meanwhile, the disturbance wind field can be acquired by filtering background wind field, the location and attribute of target can also be obtained based on the moving target information acquisition algorithm. The experimental result shows that the target location is the radial distance of 800 m and the pitching angle of 82° drawn by this algorithm is the same as the practical situation. Consequently, this new means of target detection is practicable, which will offer a brand-new path of detecting and discovering air moving target efficiently in the future.

Key words detection; target information acquisition algorithm; air moving target; atmosphere wind field; lidar

OCIS codes 120.0120; 120.1880; 280.1100; 280.3640

1 引 言

空中运动目标一般具有雷达截面积小、运动速

度快的特点,基于单一波段的雷达、红外等手段探测目标往往容易出现虚警和漏警等现象,并且存在各

收稿日期: 2010-05-30; 收到修改稿日期: 2010-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(60672154, 60908033)和中国博士后科学基金(20080441307)资助项目。

作者简介: 吴永华(1986—),男,硕士研究生,主要从事光电信息处理技术方面的研究。

E-mail: wuyonghua2010@126.com

导师简介: 胡以华(1962—),男,博士,教授,主要从事航天信息处理方面的研究。E-mail: yh_hu@263.net

自的弱点。具体表现为红外探测具有目标发现速度较慢、作用距离近,并且难以对目标进行精确测距,易受天气条件影响等弱点;雷达探测存在低空盲区和空中运动目标的反射截面小、目标定位精度低等缺陷^[1,2]。基于雷达、红外手段的空中运动目标探测往往探测效果较差,探测效率较低,因此,迫切需要发展一种能够大范围搜索、远距离发现、快速精确定位的空中运动目标探测手段。

由于以飞机为首的空中目标在运动时会产生严重的大气风场扰动,包括翼尖涡流、喷射气流和附面层紊流。这些扰动具有扰动强度大(每秒几十米左右),存留时间长(可达几十秒至几百秒),扩展距离远(可达几十公里)等便于探测发现的优点^[3]。此外,随着当前多普勒激光测风雷达远距离、高精度、高分辨率探测风场技术的日趋成熟,高空三维风场信息的获取能力已经极大增强,其风速测量的精度可达 1 m/s,探测距离可至几十千米左右^[4,5]。基于这两方面的优势,本文着眼于空中运动目标的传统探测手段的不足,结合目标运动时产生的大气扰动和激光雷达在风场探测中的优良特性,发展了一种通过激光雷达探测风场扰动来发现空中运动目标的新目标探测手段,并提出了一套基于风场扰动激光探测的运动目标信息获取算法。该研究对于丰富目标探测手段的种类,提高空中运动目标的探测发现能力具有重要的研究价值。

2 算法的基本原理

基于激光探测风场扰动来获取运动目标信息的基本原理如图 1 所示,主要包括风场建模、风场探测和运动目标检测 3 个部分。其中,风场建模主要是通过长期观察监测某地区的背景大气条件和统计研究风场分布数据,获取该空域大气风场运动变化规律,进而完成背景风场建模和背景风场数据库创建的工作。风场探测主要是基于激光雷达系统扫描特定空域,通过接收反射的激光回波信号,反演出径向和水平风速分量,进而获取扫描扇面上的风场分布。运动目标检测,通过滤除背景风场对扫描风场的影响,获得扫描空域内的扰动风场分布;基于扰动检测原理,提取出扰动位置、强度以及形状等信息;并结合此类扰动信息,判断该扰动是否由运动目标引发的,若否,则说明扫描空域内无目标存在,若是,则说明可能存在运动目标。进而,基于扰动与运动目标的内在关联,完成运动目标的可能位置和大致属性

等信息获取。

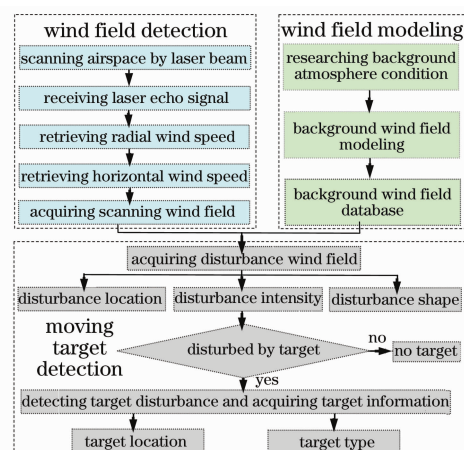


图 1 基于风场扰动激光探测的运动目标信息获取流程图

Fig. 1 Flow chart of moving target information acquisition based on wind field disturbance detected by laser

3 算法的理论分析

3.1 大气风场分布反演算法

3.1.1 风场的径向风速反演

激光多普勒雷达探测大气风速的是通过测量大气分子的多普勒频移得到的。大气分子的激光脉冲回波信号被望远镜接收后,通过碘分子滤波器把大气回波信号的多普勒频移检测转换为信号强度检测,即把频率微小变化转换为较强的信号强度变化,进而进行非相干脉冲激光多普勒测速^[6,8]。

径向风速 v_r 与多普勒频移 $\Delta\nu$ 关系为

$$\Delta\nu = \frac{2v_r}{\lambda} \cos \theta, \quad (1)$$

式中 v_r 为径向风速, $\Delta\nu$ 为多普勒频移,其值为激光脉冲多普勒回波信号的频率与激光雷达发射频率的频差; λ 为激光雷达发射的波长。

碘分子滤波器测量多普勒频移的原理如图 2 所示。若大气后向散射光谱分布为 $h(\nu)$, 所选的碘分子吸收滤波器一条吸收线边缘的光谱分布为 $f(\nu)$, 则图中的透射率函数为 $f(\nu)$ 和 $h(\nu)$ 的卷积, 即

$$T(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\nu') h(\nu - \nu') d\nu'. \quad (2)$$

由激光雷达方程,假设脉冲激光发射的光子数为 N_0 , 则光电探测器 1、2 接收到的光子数 N_1 和 N_2 分别为

$$N_1(r) = \frac{N}{2} \eta_1 \frac{A}{r^2} \Delta r [\beta_a(r) + \beta_m(r)] \times \exp\left\{-2 \int_0^r [\alpha_a(r') + \alpha_m(r')] dr'\right\}, \quad (3)$$

$$N_2(r, \nu) = \frac{N}{2} \eta_2 \frac{A}{r^2} \Delta r [\beta_a(r) f_a(\nu) + \beta_m(r) f_m(\nu)] \times \exp\left\{-2 \int_0^r [\alpha_a(r') + \alpha_m(r')] dr'\right\}, \quad (4)$$

式中 η_1, η_2 分别为两个通道的各自的光学效率与光电探测器量子效率的乘积; A 为激光雷达系统接收面积; Δr 为激光雷达系统探测距离分辨率; r 为探测距离; β_a 为大气气溶胶后向散射系数; β_m 为大气分子后向散射系数; α_a 为大气气溶胶消光系数; α_m 为大气分子消光系数。

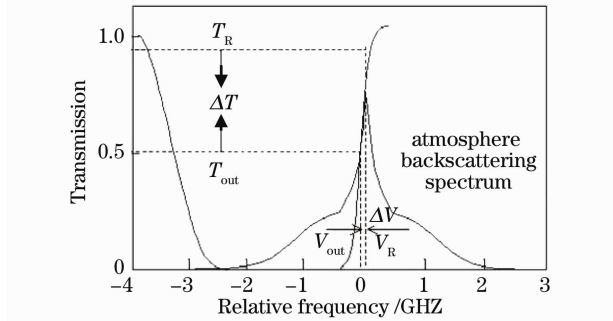


图2 基于碘分子滤波器测量多普勒频移示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measuring Doppler shift based on the iodine filter

在(2)式中定义

$$f_a(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(\nu') h_a(\nu - \nu') d\nu', \quad (5)$$

$$f_m(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(\nu') h_m(\nu - \nu') d\nu', \quad (6)$$

式中 h_a 为大气气溶胶后向散射光谱分布; h_m 为大气分子后向散射光谱分布; 即 $f_a(\nu)$ 和 $f_m(\nu)$ 分别为大气气溶胶后向散射和大气分子后向散射透过碘分子吸收滤波器的光谱响应。

由(3), (4)式可得到碘分子吸收滤波器光谱透射率为

$$R(r, \nu) = \frac{N_2(r, \nu)}{N_1(r)} = K \frac{\beta_a(r) f_a(\nu) + \beta_m(r) f_m(\nu)}{\beta_a(r) + \beta_m(r)}, \quad (7)$$

式中 K 为系统校正参数。大气后向散射比 $R_b(r)$ 一般定义为

$$R_b(r) = \frac{\beta_a(r) + \beta_m(r)}{\beta_m(r)}, \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式得到

$$R(r, \nu) = K \frac{[R_b(r) - 1] f_a(\nu) + f_m(\nu)}{R_b(r)}, \quad (9)$$

当激光发射频率为 ν_{out} 时, 对应的碘分子吸收滤波器光谱透射率为 $R(r, \nu_{out})$ 。由于大气振动的作用, 大气气溶胶后向散射信号和分子后向散射信号相对于激光发射频率 ν_{out} 会产生多普勒频移 $\Delta\nu$, 此时对应的碘分子吸收滤波器光谱透射率为 $R(r, \nu_{out} + \Delta\nu)$ 。将 $R(r, \nu_{out} + \Delta\nu)$ 在 ν_{out} 处展开成泰勒级数, 并忽略高阶导数项, 得

$$R(r, \nu_{out} + \Delta\nu_{out}) + \frac{dR(r, \nu_{out})}{d\nu} \Delta\nu \approx R(r, \nu_{out}) + \frac{K}{R_b(r)} \times \left\{ [R_b(r) - 1] \frac{df_a(\nu)}{d\nu} + \frac{df_m(\nu)}{d\nu} \right\} \Delta\nu. \quad (10)$$

从(10)式可得到

$$\Delta\nu \approx \frac{R(r, \nu_{out} + \Delta\nu) - R(r, \nu_{out})}{\frac{K}{R_b(r)} \left\{ [R_b(r) - 1] \frac{df_a(\nu)}{d\nu} + \frac{df_m(\nu)}{d\nu} \right\}}, \quad (11)$$

这样就可以反演出径向风速

$$v_r = \frac{c}{2\nu_{out}} \Delta\nu \approx \frac{c}{2\nu_{out}} \times \frac{R(r, \nu_{out} + \Delta\nu) - R(r, \nu_{out})}{\frac{K}{R_b(r)} \left\{ [R_b(r) - 1] \frac{df_a(\nu)}{d\nu} + \frac{df_m(\nu)}{d\nu} \right\}}. \quad (12)$$

3.1.2 风场的水平风速反演

水平风场反演方法很多, 主要有速度方位显示(VAD)、体积速度处理(VVP)、速度方位处理(VAP)等方法^[9,10], 由于VAP方法计算简便、计算量小, 易于在计算机上实现, 反演结果可靠, 是单多普勒雷达反演风场的一种方便的方法。此处拟采用VAP方法进行水平风场的反演, 该方法假定相邻方位角速度相等即局地均匀, 从各个距离圈上的多普勒速度随方位角分布的廓线计算风向、风速。

VAP原理示意图3所示。

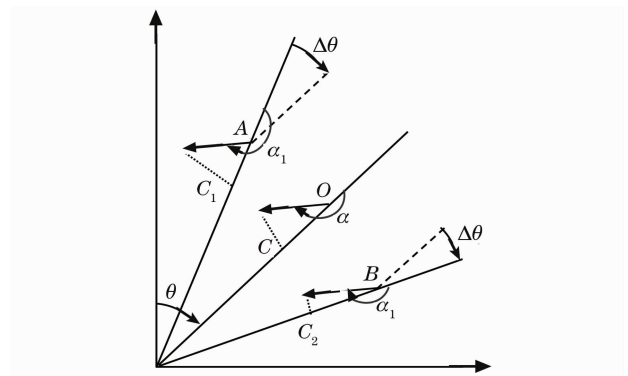


图3 VAP原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of VAP principle

规定 $v_r > 0$ 风趋近雷达, $v_r < 0$ 风远离雷达 v_{r1} 和 v_{r2} 分别为把演点相邻水平径向速度, α 为水平径向速度与风矢量的夹角, θ 为方位角。当扫描仰角很低时, 可以忽略下落垂直速度, 则可以从距离圈上的多普勒速度随方位分布的廓线上计算出:

则水平风速为

$$v = \left| \frac{v_{r1} - v_{r2}}{2 \sin \alpha \sin \Delta \theta} \right|, \quad (13)$$

水平风向为

$$\tan \alpha = -\frac{v_{r1} - v_{r2}}{v_{r1} + v_{r2}} \cot \Delta \theta = A, \quad (14)$$

可求出 α 值为

$$\begin{cases} \alpha = \arctan A, & v_{r1} - v_{r2} > 0, & v_{r1} + v_{r2} > 0 \\ \alpha = \arctan A + \pi, & v_{r1} - v_{r2} > 0, & v_{r1} + v_{r2} < 0 \\ \alpha = \arctan A, & v_{r1} - v_{r2} < 0, & v_{r1} + v_{r2} > 0 \\ \alpha = \arctan A - \pi, & v_{r1} - v_{r2} < 0, & v_{r1} + v_{r2} < 0 \end{cases}. \quad (15)$$

3.2 运动目标信息获取算法

3.2.1 风场扰动信息获取

通过前期风场建模获得的某地区大气风场分布的统计数据, 来滤除背景风场对激光雷达实时获取的扫描风场的影响, 进而获得扫描空域内的扰动风场分布。基于扰动检测原理, 在探测空域的扰动风场内寻求各方向上数据变化最大值点并判断是否超出门限, 对于数据变化值没有超过门限的不予考虑, 仅考虑超出门限部分的值, 进而提取出扰动位置、强

度以及形状等信息。其中, 该门限阈值是预先设定的。其随探测地点、距离、角度以及背景大气条件的具体状况而变化, 实际应用中可通过理论上的建模仿真、外场探测实验以及背景知识积累共同确定。

3.2.2 运动目标信息获取

基于获取的风场扰动信息, 首先要进行扰动种类判别, 确认其是由空中目标运动引发的目标扰动还是大气自然突发的大气突变或自然紊流。虽然两者的某些参数比较相似, 但在很多方面则有着显著的不同。这里主要提出了两个判决准则:

1) 基于扰动的不同结构特征进行定性判断。飞机等空中目标运动时产生的大气扰动主要是由两个相反方向旋转的圆柱状涡流组成, 从卷成截面上来看, 其是两个相互对称且强度相同转向相反的螺旋线旋转结构^[11]。但通常的大气突变(如离散阵风、高空风切变)的结构特征单一, 与运动目标产生的扰动结构迥异。

2) 基于定义的风场速度结构系数 C_v^2 进行定量判断。根据风场激光探测原理, 大气中散射粒子产生的光电流功率谱是单个散射粒子产生的单个功率谱的叠加, 并且多普勒频率与散射粒子速度矢量投影成正比, 从而谱密度可被看作速度的函数。基于光电流谱宽度积分的平方平均值与风的速度场间的特定关系, 可引入如下的风场速度结构系数 C_v^2 ^[12]:

$$C_v^2 = \langle \Delta v_s^2 \rangle / (11 \text{ m}^{2/3}) = \iiint \langle [V(r_1, t_1) - V(r_2, t_2)]^2 \rangle \times W(r_1, t_1) \times W(r_2, t_2) dr_1 dt_1 dr_2 dt_2 / (11 \text{ m}^{2/3}), \quad (16)$$

式中 Δv_s^2 为光电流谱宽度积分的平方平均值, $V(r, t)$ 为 t 时刻 r 处的径向风速值, $W(r, t)$ 为表征激光雷达外差效率和探测光束中功率分布的函数, 其仅依赖于激光雷达自身参数。有实验研究表明: 平静气候条件下的大气的自然扰动等级若选用 C_v^2 表示时, 其数值大致处在 $0.005 \sim 0.1 \text{ m}^{4/3}/\text{s}^2$ 范围; 而飞过飞机后的 C_v^2 取值范围是 $2 \sim 6 \text{ m}^{4/3}/\text{s}^2$, 两者取值相差得很多。因而, C_v^2 可作为区分运动目标扰动和自然扰动的重要参数。

在完成扰动属性判决后, 便进行运动目标的信息获取。将从扫描风场上提取的扰动位置、强度以及形状等扰动信息与风场扰动数据库中之前一段时间内存储的该点处的风场扰动数据进行比较, 进而

通过扰动与运动目标间的内在关联, 完成运动目标的可能位置和大致属性等信息获取。

4 算法的实验验证

为验证基于风场扰动激光探测的运动目标检测算法的可行性, 课题组在天气条件为晴空无云、微风、能见度较高的某天下午, 选择了某民航机场开展了空中运动目标探测实验。利用激光雷达对指定的空域进行扫描并获取了目标飞机未飞入指定区域以及飞离指定区域两种条件下的风场数据。其中, 风场扫描时间通常与雷达自身参数(如扫描速度)以及扫描空域大小等有关, 本实验中扫描时间约为 13 s 。图 4, 5 分别给出了运动目标经过前后的风场分布示意图。

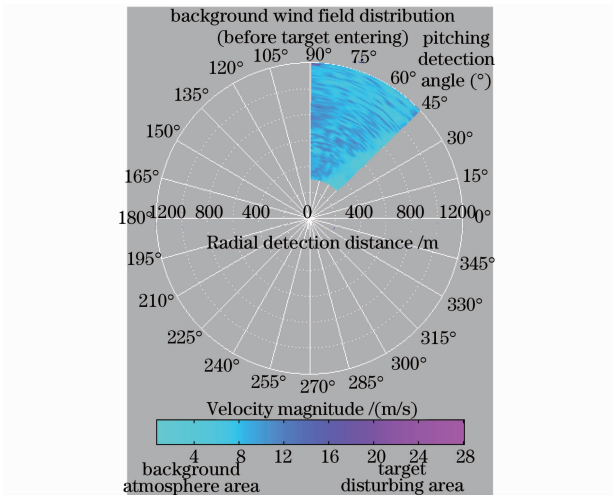


图 4 运动目标经过前的背景风场分布示意图
Fig. 4 Schematic diagram of background wind field distribution before target entering

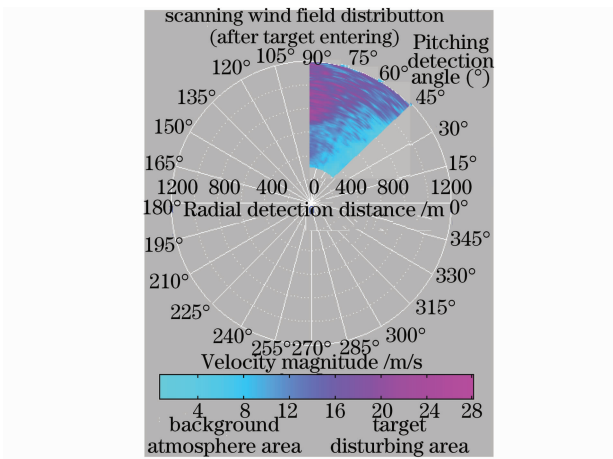


图 5 运动目标经过后的扫描风场分布示意图
Fig. 5 Schematic diagram of scanning wind field distribution after target entering

图 4 可看出,运动目标进入前,雷达扫描扇区内背景风场的速度分布基本处在 0~10 m/s 内,与背景风场数据库内所存数据比较接近。图 5 可看出,运动目标离开后,扇区内部分区域风场因运动目标而受到明显扰动,其速度分布达到 20~28 m/s 左右。

图 6 给出的是滤除背景风场对扫描风场的影响后获得扫描空域内的扰动风场分布。基于扰动检测原理可分析出,扰动的中心点位于径向距离 800 m,仰角 82°处,强度达 18 m/s 左右,并呈圆状向四周扩散,已基本覆盖径向距离[700 m,1100 m]和俯仰角度[75°,90°]的区域。基于运动目标检测算法,检测出运动目标为飞机,可能位于径向距离 800 m,仰角 82°的位置点附近。此结果与先前实验记录的飞机飞经该扫描扇面的位置点坐标基本吻合。

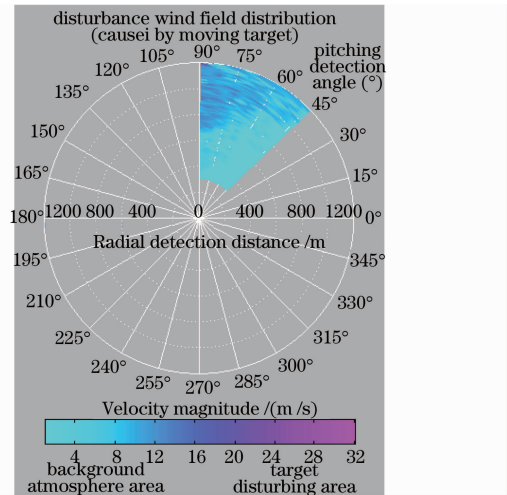


图 6 经运动目标扰动的扰动风场分布示意图
Fig. 6 Schematic diagram of disturbance wind field distribution caused by moving target

5 结 论

本文提出了一种基于激光雷达探测风场扰动来获取运动目标信息的算法,通过利用激光雷达探测风场扰动实现了间接探测空中运动目标的目的。基于开展的风场激光雷达探测实验,成功反演了运动目标经过前后特定空域内的风场分布;基于分析滤除背景风场影响后获得的扰动风场,准确获取了该空域内运动目标(飞机)位置坐标信息:径向距离 800 m,仰角 82°。研究表明,此算法切实可行,其为未来探测发现特定空域内的快速小型运动目标提供了一种崭新的途径。后续可在目标检测的基础上进一步研究目标识别问题。

参 考 文 献

- 1 Fu Wei. Electro-Optical stealthy technology of aircraft[J]. *Aero Weaponry*, 2001, **4**: 9~13
付 伟. 飞机的光电隐身技术[J]. *航空兵器*, 2001, **4**: 9~13
- 2 Bao Shi, Gu Wenhui, Zhang Xiaoguang. Infrared and radar composite stealth technology [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, **24**(4): 29~31
保 石, 顾文慧, 张晓光. 红外雷达复合隐身技术探讨[J]. *光电技术应用*, 2009, **24**(4): 29~31
- 3 Li Jun, Wang Xuesong, Wang Tao. Radar detection performance of aircraft wake vortices in wet air [J]. *Radar Science and Technology*, 2009, **7**(5): 333~338
李 军, 王雪松, 王 涛. 湿性大气中飞机尾流的雷达探测性能[J]. *雷达科学与技术*, 2009, **7**(5): 333~338
- 4 Liu Yuan, Liu Jiqiao, Chen Weibiao. An all-fiber single frequency laser for eye-safe coherent doppler wind lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1857~1860
刘 源, 刘继桥, 陈卫标. 人眼安全相干多普勒测风激光雷达全光纤单频激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1857~1860
- 5 Igor Smalikho, Friedrich Kopp, Stephan Rahm. Measurement of atmospheric turbulence by 2- μ m doppler lidar[J]. *J. Atmospheric*

- and Oceanic Technology*, 2005, **22**(11): 1733~1747
- 6 Guo Jinjia, Liu Zhishen, Sun Dapeng *et al.*. Comparison between high spectral iodine filter and double-edge doppler wind lidar techniques[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, **34**(3): 489~496
郭金家, 刘智深, 孙大鹏等. 高光谱碘分子和双边缘多普勒测风激光雷达技术比较[J]. *中国海洋大学学报*, 2004, **34**(3): 489~496
- 7 Wang Gang. Research on the Atmospheric Wind Velocity Measurement by Incoherent Lidar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004. 11~13
王 刚. 非相干激光雷达测量大气风速的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004. 11~13
- 8 Liu Zhisheng, Song Xiaoquan, Liu Jintao *et al.*. An incoherent doppler pulse lidar for measuring velocity[J]. *Science Letter*, 2001, **46**(24): 2080~2085
刘智深, 宋小全, 刘金涛等. 非相干脉冲激光多普勒雷达测速系统[J]. *科学通报*, 2001, **46**(24): 2080~2085
- 9 Yu Yanmei, Feng Qihang, Xie Ming *et al.*. A study of VVP algorithm for 3D wind retrieval [J]. *J. Sichuan University(Natural Science Edition)*, 2008, **45**(2): 321~326
余艳梅, 冯启航, 谢 明等. VVP 三维风场反演方法研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2008, **45**(2): 321~326
- 10 Zhou Xin, Liu Yan. Research of retrieving doppler radar wind field based on VAP method [J]. *J. Chengdu University of Information Technology*, 2007, **22**(3): 338~342
周 鑫, 刘 艳. 基于 VAP 方法的多普勒雷达风场反演研究[J]. *成都信息工程学院学报*, 2007, **22**(3): 338~342
- 11 Li Wenchen, Liu Junkai, Wang Tao. *et al.*. Radar echo simulation of aircraft wake vortex based on particle model[J]. *J. System Simulation*, 2009, **21**(23): 7397~7400
李文臣, 刘俊凯, 王 涛等. 基于粒子模型的飞机尾流雷达回波仿真[J]. *系统仿真学报*, 2009, **21**(23): 7397~7400
- 12 Jin You. CO₂ coherent lidar for detecting wind field and atmosphere disturbance [J]. *Light and Electromechanical Information*, 1996, **13**(10): 1~6
金 友. 测量风速和大气扰动的二氧化碳相干激光雷达[J]. *光机电信息*, 1996, **13**(10): 1~6