

# 姿态误差对机载激光多普勒三维速度测量精度的影响

张月新 牛燕雄 韩凤山 范哲 孙绪印 张颖

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 激光多普勒测速系统可实现空中运动平台的速度测量,平台的姿态测量误差是影响其测速精度的重要因素。为实现运动平台三维速度的测量,以相干探测原理为基础,设计并搭建了全光纤三光束激光多普勒测速系统,建立了运动平台三维速度测量的数学物理模型,对系统测速相对误差进行了数值模拟研究。研究表明,姿态测量误差对测速精度的影响不可忽略;随着俯仰角度的不同,俯仰误差与旋转误差对测速精度的影响程度会发生变化;测速精度与旋转误差呈线性关系,而与俯仰误差存在着非线性关系。研究结果可为激光多普勒测速系统的设计以及速度修正提供理论依据。

**关键词** 激光技术;相干光学;激光测速;速度测量精度;姿态角

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.041402

## Impact of Attitude Errors on Three-Dimensional Velocity Measurement Accuracy of Airborne Laser Doppler

Zhang Yuexin Niu Yanxiong Han Fengshan Fan Zhe Sun Xuyin Zhang Ying

*Department of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

**Abstract** The velocity of aerobat can be measured by laser Doppler velocimetry system and its accuracy is seriously affected by the attitude measurement errors. To precicely measure the three-dimensional (3D) velocity, an all-fiber triple-beam laser doppler velocimetry (TLDV) system based on coherent detection principle is proposed. Mathematical model of velocity measurement is described. According to the simulations, it is found that, firstly, effect of the attitude errors on the velocity measurement accuracy should not be neglected; secondly, with the pitch angle changing, influence of the pitch error and roll error on velocity measurement accuracy change; thirdly, the relationship between velocity accuracy and roll error is linear, while that between the accuracy and pitch error is nonlinear. The conclusions can be used for the design and velocity error correction of laser Doppler velocimetry system.

**Key words** laser technique; coherence optics; laser velocimetry; velocity measurement accuracy; attitude angle

**OCIS codes** 140.3510; 030.1640; 280.3340; 060.1660

## 1 引言

激光多普勒测速技术具有非接触测量、实时性好、精度高、稳定性好等特点,被广泛应用在航空航天、流体力学、空间动力学、医疗检测仪器等方面<sup>[1-3]</sup>。载体三维速度信息的获取在空间交会对接、小卫星自主临近作业、飞行器自主着陆等情况下是非常重要的<sup>[4-6]</sup>。

目前,机载自主惯性导航系统(INS)的速度参数是由加速度计积分测量的,但加速度计积分测速存在两个方面的缺点:一方面加速度计测量的是载体的视加速度而不是绝对加速度,需要计算出引力场产生的加速度才能得到载体的绝对加速度值,计算复杂;另一方面,由于是通过质量体进行测量的,存在受过载影响的误差项<sup>[7-8]</sup>。而全光纤三光束激光多普勒测速系统可实现实时高精度的三维速度测量,适用于机载自主惯性导航系统。机载激光多普勒测速精度受多方面因素的影响,其中,姿态测量误差对测量精度的影响显著<sup>[9]</sup>。

收稿日期:2013-11-25;收到修改稿日期:2013-11-30;网络出版日期:2014-03-25

基金项目:国家自然科学基金(61101007)

作者简介:张月新(1990—),女,硕士研究生,主要从事激光雷达技术方面的研究。E-mail: smileyuexin@163.com

导师简介:牛燕雄(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事光电探测方面的研究。E-mail: niuyx@buaa.edu.cn

本文设计并搭建了全光纤三光束激光多普勒测速系统,建立了运动平台三维速度测量的数学物理模型,对系统测速相对误差进行了数值模拟研究,分析了姿态测量误差对测速精度的影响。研究结果可为激光多普勒测速系统的设计以及速度修正提供理论依据。

## 2 工作原理与结构

激光多普勒测速是利用运动物体对信号光的多普勒效应,将频率已经发生变化的信号光进行收集,与本振光在探测器表面进行拍频,由探测器得到两者的差频信息<sup>[10]</sup>。多普勒频移与相对运动速度的关系式为

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \gamma, \quad (1)$$

式中  $f_d$  为多普勒频移,  $v$  为相对运动速度,  $\gamma$  为相对运动速度方向与光束中心线方向的夹角,  $\lambda$  为发射激光的波长。

全光纤激光多普勒三维测速系统如图1所示。激光器输出的光经耦合器1分为信号光和本振光,信号光被掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,由光纤耦合器2按等比例功率分为光束1、光束2和光束3。信号光经过光纤环形器的端口1至端口2,由光纤准直器发射。物体反射回的信号光,经光纤准直器接收,由光纤环形器的端口2至端口3。本振光经声光移频器(AOFS)移频后,被耦合器3按等比例功率分为三束,分别与三束返回信号光进行拍频。三束拍频信号分别进入三个光电探测器后转变为电流信号,中频电信号经前置放大器的放大滤波、模数采集、滤波、快速傅里叶变换等信号处理后解调出三维速度。

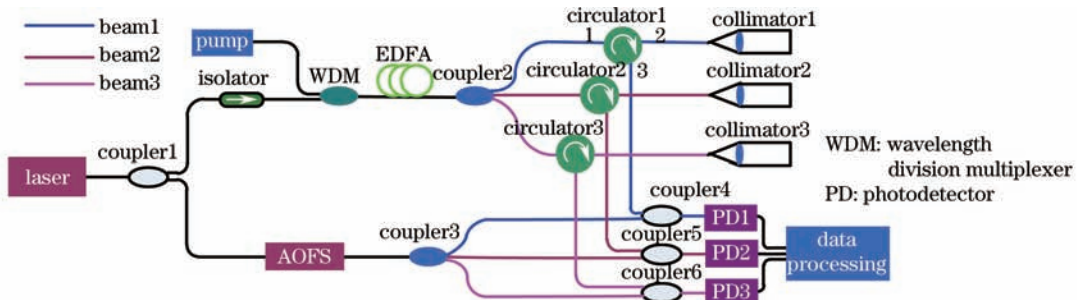


图1 全光纤三光束激光多普勒测速系统原理图

Fig.1 Schematic of an all-fiber triple-beam laser Doppler velocimetry system

光电探测器上输出的电流信号可以表示为

$$i(t) = R[P_s + P_l + 2\sqrt{P_s P_l} \cos(2\pi f_d t + \Delta\varphi)], \quad (2)$$

式中  $R$  为探测器的响应度,  $P_s$  为信号光功率,  $P_l$  为本振光功率,  $\Delta\varphi$  为相位差。

由(1)、(2)式可知,探测器输出的电流信号是被测速度的函数,通过测算谱峰的频移  $f_d$ ,可以解算出相对运动速度  $v$ 。

## 3 三维速度模型的建立

多波束激光测速系统具有测点多、全覆盖等优点<sup>[11]</sup>。机载激光多普勒测速系统的三波束固定天线系统安装原理示意图如图2所示。

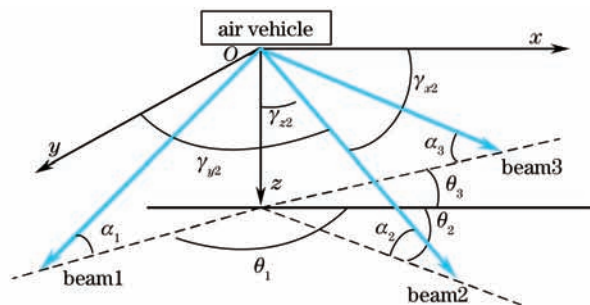


图2 天线系统安装原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of antenna system configuration

以飞行器的中心为原点  $O$ ，机头朝向为  $x$  轴，铅直方向为  $z$  轴建立固定天线右手坐标系  $O-xyz$ ，其中  $\gamma_{xi}$ 、 $\gamma_{yi}$ 、 $\gamma_{zi}$  分别为第  $i$  ( $i=1,2,3$ ) 个波束天线与  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的夹角。第  $i$  个波束天线的任意安装方位可以通过对天线的两次旋转实现，对应于两个角度，一个是与  $z$  轴的夹角余角  $\alpha_i$ ，一个是水平偏转角  $\theta_i$ 。令  $\theta_2 = \pi - \theta_1 = -\theta_3 = \theta$ ， $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$ ，则第  $i$  个波束的单位方向向量为

$$\mathbf{A}_i = \cos \gamma_{xi} \mathbf{i} + \cos \gamma_{yi} \mathbf{j} + \cos \gamma_{zi} \mathbf{k}, \quad (3)$$

式中  $\cos \gamma_{xi} = \cos \alpha_i \cos \theta_i$ ， $\cos \gamma_{yi} = \cos \alpha_i \sin \theta_i$ ， $\cos \gamma_{zi} = \sin \alpha_i$ 。由(1)式可知，三个光束的多普勒频移分别为

$$\begin{cases} f_1 = \frac{2}{\lambda} (-v_x \cos \alpha \cos \theta + v_y \cos \alpha \sin \theta + v_z \sin \alpha) \\ f_2 = \frac{2}{\lambda} (v_x \cos \alpha \cos \theta + v_y \cos \alpha \sin \theta + v_z \sin \alpha) \\ f_3 = \frac{2}{\lambda} (v_x \cos \alpha \cos \theta - v_y \cos \alpha \sin \theta + v_z \sin \alpha) \end{cases}, \quad (4)$$

则可计算出固定天线坐标系  $O-xyz$  下的纵向速度  $v_x$ ，横向速度  $v_y$ ，垂向速度  $v_z$  分别为

$$\begin{cases} v_x = \frac{\lambda(f_2 - f_1)}{4 \cos \alpha \cos \theta} \\ v_y = \frac{\lambda(f_2 - f_3)}{4 \cos \alpha \sin \theta} \\ v_z = \frac{\lambda(f_1 + f_3)}{4 \sin \alpha} \end{cases}. \quad (5)$$

实际飞行过程中，飞行器会出现上下俯仰或左右旋转等情况<sup>[12]</sup>。假设俯仰角  $P$  和左右旋转角  $R$  分别为相对于地面坐标系  $O-x'y'z'$  下  $x'$  轴和  $y'$  轴的夹角，如图3所示。

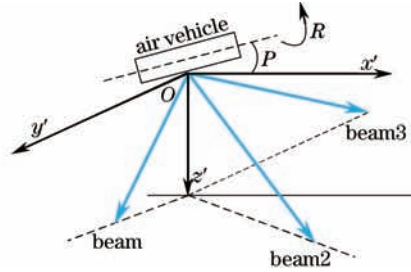


图3 旋转和俯仰情况下的测速示意图

Fig.3 Velocity measurement model at pitch and roll state

当仅考虑俯仰情况时，即光束沿  $y$  轴旋转，不变的矢量是  $y$  分量，矢量变换矩阵为

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} \cos P & 0 & \sin P \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin P & 0 & \cos P \end{bmatrix}. \quad (6)$$

当仅考虑轴向旋转情况时，即光束沿  $x$  轴旋转，不变的矢量是  $x$  分量，矢量变换矩阵为

$$\mathbf{A}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R & -\sin R \\ 0 & \sin R & \cos R \end{bmatrix}. \quad (7)$$

俯仰和轴向旋转同时存在时，转换矩阵可写成

$$\mathbf{A}_{pR} = \mathbf{A}_p \mathbf{A}_R = \begin{bmatrix} \cos P & \sin P \sin R & \sin P \cos R \\ 0 & \cos R & -\sin R \\ -\sin P & \cos P \sin R & \cos P \cos R \end{bmatrix}. \quad (8)$$

由(1)式可得

$$f_i = \frac{2}{\lambda} \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{v} = \frac{2}{\lambda} \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{A}_{pR}^{-1} \mathbf{v}. \quad (9)$$

将(3)式和(8)式代入(9)式得

$$\mathbf{v}' = \mathbf{A}_{pR} \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \cos P & \sin P \sin R & \cos R \sin P \\ 0 & \cos R & -\sin R \\ -\sin P & \cos P \sin R & \cos P \cos R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}. \quad (10)$$

展开后得到存在俯仰角  $P$  和旋转角  $R$  时的地面坐标系  $O-x'y'z'$  下的纵向速度  $v'_x$ 、横向速度  $v'_y$ 、垂向速度  $v'_z$  分别为

$$\begin{cases} v'_x = v_x \cos P + v_y \sin P \sin R + v_z \cos R \sin P \\ v'_y = v_y \cos R - v_z \sin R \\ v'_z = -v_x \sin P + v_y \cos P \sin R + v_z \cos P \cos R \end{cases} \quad (11)$$

#### 4 理论分析及测速误差的计算

实际工程应用中,一方面由陀螺或INS提供的俯仰角  $P$  和旋转角  $R$  存在一定姿态测量误差,另一方面外部气流等振动导致姿态变化,进而产生姿态测量误差。本文忽略了测量过程中的随机误差、装置安装过程中的角度误差等其他因素对测速精度的影响,仅考虑姿态测量误差引起的测速误差。

对(11)式求偏导得

$$\begin{cases} \partial v'_x = (-v_x \sin P + v_y \sin R \cos P + v_z \cos R \cos P) \partial P + (v_y \cos R \sin P - v_z \sin R \sin P) \partial R \\ \partial v'_y = (-v_x \sin R - v_z \cos R) \partial R \\ \partial v'_z = (-v_x \cos P - v_y \sin R \sin P - v_z \cos R \sin P) \partial P + (v_y \cos R \cos P - v_z \sin R \cos P) \partial R \end{cases} \quad (12)$$

式中  $\partial P$  是关于俯仰角  $P$  的角度误差,  $\partial R$  是关于旋转角  $R$  的角度误差。

若将误差表示为地面速度分量  $(v'_x, v'_y, v'_z)$  的函数,将(11)式代入(12)式可得

$$\begin{cases} \partial v'_x = v'_z \partial P + v'_y (\sin P) \partial R \\ \partial v'_y = (-v'_x \sin P - v'_z \cos P) \partial R \\ \partial v'_z = -v'_x \partial P + v'_y (\cos P) \partial R \end{cases} \quad (13)$$

进而得到相对测速误差为

$$\begin{cases} e_x = \frac{\partial v'_x}{v'_x} = \frac{v'_z \partial P + v'_y (\sin P) \partial R}{v'_x} \\ e_y = \frac{\partial v'_y}{v'_y} = \frac{(v'_x \sin P + v'_z \cos P) \partial R}{v'_y} \\ e_z = \frac{\partial v'_z}{v'_z} = \frac{v'_x \partial P - v'_y (\cos P) \partial R}{v'_z} \end{cases} \quad (14)$$

由(14)式知,相对测速误差与旋转角度  $R$  无关,与俯仰角度  $P$ 、俯仰角度误差  $\partial P$ 、旋转角度误差  $\partial R$  均有关。当三维速度分别为  $v'_x = 60 \text{ m/s}$ ,  $v'_y = 20 \text{ m/s}$ ,  $v'_z = 10 \text{ m/s}$ , 俯仰角  $P$  为  $-15^\circ \sim 15^\circ$ , 旋转角度误差  $\partial R$  为  $0.5^\circ$ , 俯仰角度误差  $\partial P$  分别为  $-1^\circ$ 、 $-0.5^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 、 $1^\circ$  时,三维速度测量的相对误差  $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$  的变化如图4所示。

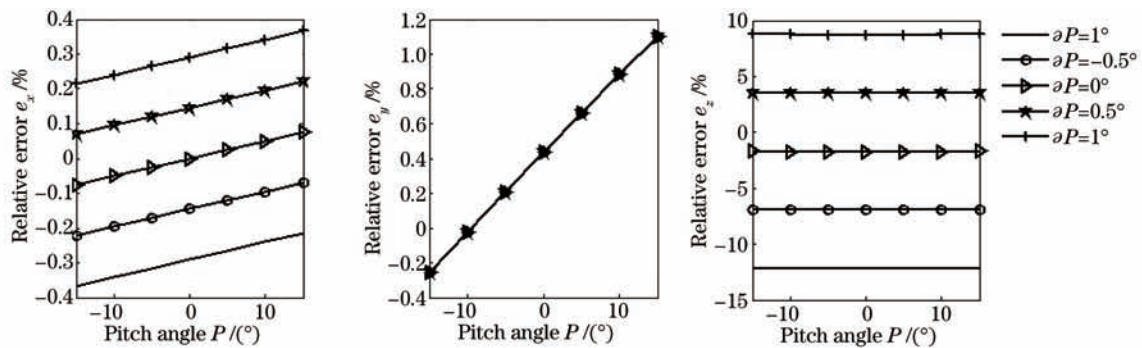
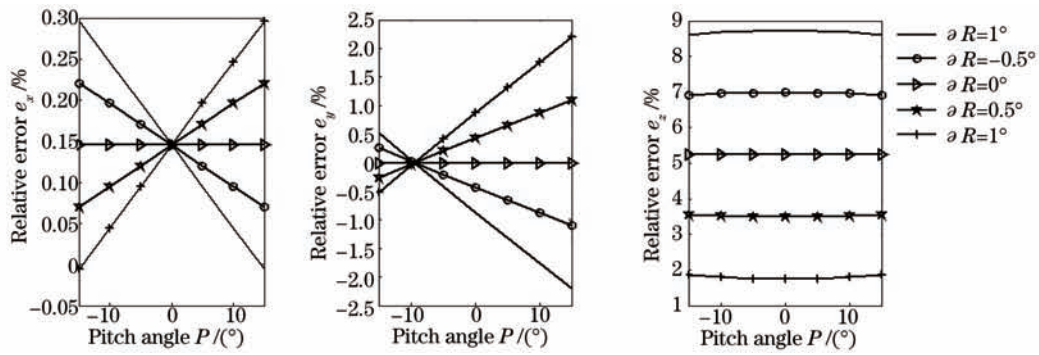


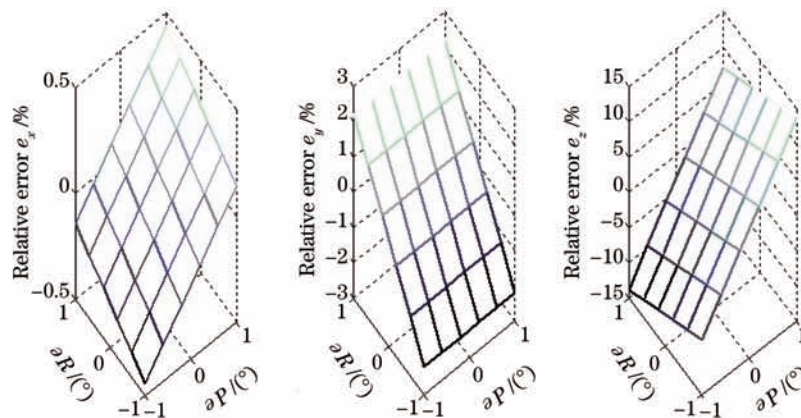
图4 不同俯仰角度误差  $\partial P$  时的测速相对误差

Fig.4 Variation of measurement relative errors with different pitch angle errors  $\partial P$

当三维速度分别为  $v'_x = 60 \text{ m/s}$ ,  $v'_y = 20 \text{ m/s}$ ,  $v'_z = 10 \text{ m/s}$ , 俯仰角  $P$  为  $-15^\circ \sim 15^\circ$ , 俯仰角度误差  $\partial P$  为  $0.5^\circ$ , 旋转角度误差  $\partial R$  分别为  $-1^\circ$ 、 $-0.5^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 、 $1^\circ$  时,三维速度测量的相对误差  $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$  的变化如图5所示。

图5 不同旋转角度误差  $\delta R$  的测速相对误差Fig.5 Variation of measurement relative errors with different roll angle errors  $\delta R$ 

当三维速度分别为  $v_x = 60$  m/s,  $v_y = 20$  m/s,  $v_z = 10$  m/s, 俯仰角  $P$  为  $15^\circ$ , 旋转角度误差  $\delta R$  及俯仰角度误差  $\delta P$  分别为  $-1^\circ \sim 1^\circ$  时, 三维速度测量的相对误差  $e_x, e_y, e_z$  的变化如图6所示。

图6 测速相对误差随俯仰误差  $\delta P$  及旋转误差  $\delta R$  的变化Fig.6 Variation of measurement relative errors with pitch angle error  $\delta P$  and roll angle error  $\delta R$ 

由图4~6可见,  $P, \delta R$  一定时, 纵向、垂向相对测速误差  $e_x, e_z$  与  $\delta P$  成正比, 横向相对测速误差  $e_y$  为常数;  $\delta P$  一定时, 若  $\delta R$  为正值, 相对测速误差  $e_x$  和  $e_y$  随俯仰角  $P$  的增大而增大, 若  $\delta R$  为负值, 相对测速误差  $e_x$  和  $e_y$  随俯仰角  $P$  的增大而减小, 而相对测速误差  $e_z$  只有  $\delta R$  和  $P$  符号相同时才随俯仰角度的增大而增大; 姿态测量误差对垂向测速误差  $e_z$  的影响较大,  $e_z$  的最大值为 13.8437%, 对横向测速误差  $e_y$  的影响次之,  $e_y$  的最大值为 2.1981%, 对纵向测速误差  $e_x$  的影响最小,  $e_x$  的最大值为 0.4415%。

## 5 结论

设计并搭建了全光纤三光束激光测速系统, 建立了三维测速数学物理模型, 对姿态误差导致的测速相对误差进行了理论分析, 并推导了表达式, 在三维速度分别为  $v_x = 60$  m/s,  $v_y = 20$  m/s,  $v_z = 10$  m/s, 俯仰角  $P$  为  $-15^\circ \sim 15^\circ$ , 俯仰角度误差  $\delta P$  和旋转角度误差  $\delta R$  分别为  $-1^\circ, -0.5^\circ, 0^\circ, 0.5^\circ, 1^\circ$  的条件下进行了二维数值模拟研究, 同时对俯仰角  $P$  为  $15^\circ$ , 俯仰角度误差  $\delta P$  和旋转角度误差  $\delta R$  分别为  $-1^\circ \sim 1^\circ$  的情形进行了三维数值模拟研究。结果表明, 忽略测量过程中的随机误差、装置安装过程中的角度误差等其他因素对测速精度的影响, 仅考虑姿态测量误差引起的测速误差时, 测速精度与旋转角度  $R$  无关, 与俯仰角度  $P$ 、俯仰角度误差  $\delta P$ 、旋转角度误差  $\delta R$  均有关。若采用一定方法实现姿态测量误差的实时修正, 可有效提高速度测量精度。

## 参考文献

- 1 S Kameyama, T Ando, K Asaka, *et al.*. Compact all fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing[J]. Appl Opt, 2007, 46(11): 1953-1962.
- 2 Fabiny L, Kersey A D. Interferometric fiber-optic Doppler velocimeter with high-dynamic range[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9(1): 79-81.

- 3 Levin L, Tzach D, Shamir J. Fiber optic velocity interferometer with very short coherence length light source[J]. *Rev Sci Instrum*, 1996, 67(4): 1434-1437.
- 4 Fried W R. An FM-CW radar for simultaneous three-dimensional velocity and altitude measurement[J]. *IEEE Trans Aerospace*, 1963, 1(2): 17-37.
- 5 Yang Chunping, Wu Jian, He Yi. Application of laser lidar in space rendezvous and docking[J]. *J University of Electronic Science and Technology of China*, 1999, 28(4): 447-451.  
杨春平, 吴建, 何毅. 激光雷达在空间交会对接中的应用[J]. *电子科技大学学报*, 1999, 28(4): 447-451.
- 6 J de Lafontaine, A Ulitsky, J W Tripp, *et al.*. LAPS: the development of a scanning lidar system with GNC for autonomous hazard avoidance and precision landing[C]. *SPIE*, 2004, 5418: 81-93.
- 7 Mao Ben, Lin Yurong. *Measuring and Modeling of Inertial Instruments*[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2008. 124-128.  
毛奔, 林玉荣. 惯性器件测试与建模[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2008. 124-128.
- 8 Sun Ningsheng. Autonomous navigation based on absolute velocity measuring instrument[J]. *Aerospace Control*, 2006, 24(4): 27-30.  
孙凝生. 基于绝对速度测量计的自主导航探讨[J]. *航天控制*, 2006, 24(4): 27-30.
- 9 Wang Jianjun, Xu Lijun, Li Xiaolu. Impacts of random attitude measurement errors on airborne laser scanning image [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0314001.  
王建军, 徐立军, 李小路. 姿态角随机测量误差对机载激光扫描成像的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0314001.
- 10 Zhang Fangpei, Xue Haizhong, Hu Yongzhao, *et al.*. Coherent Doppler wind lidar[J]. *J Applied Optics*, 2009, 30( 6): 1045- 1050.  
张芳沛, 薛海中, 胡永钊, 等. 相干多普勒测风激光雷达[J]. *应用光学*, 2009, 30(6) : 1045-1050.
- 11 Jack L Bufton, J Bryan Blair. Space laser altimetry: laser engineering for multi-beam application[J]. *Rev Laser Engineering*, 1996, 24(12): 1285-1292.
- 12 Wang Jianjun, Xu Lijun, Li Xiaolu. Impact of attitude deviations on laser point cloud of airborne LiDAR[J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2011, 32(8): 1810-1817.  
王建军, 徐立军, 李小路. 姿态角扰动对机载激光雷达点云数据的影响[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(8): 1810-1817.