

# 全捷联图像导引头视线角速率精度分析

孙婷婷<sup>1,2</sup>, 储海荣<sup>1</sup>, 郭立红<sup>1</sup>, 陈阳<sup>1</sup>, 张百强<sup>1,2</sup>, 张跃<sup>1</sup>, 贾宏光<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院大学 北京 100039)

**摘要:** 为分析全捷联图像导引头视线角速率精度影响因素, 提出了视线角速率精度分析算法。首先, 提出了视线角速率解耦算法; 其次, 根据误差理论详细分析了视线角速率各误差源的误差灵敏度并提出了精度计算方法; 再次, 分析了体视线角、弹体角速率、姿态角与体视线角速率等误差形成机理与精度影响; 最后, 建立了半物理仿真实验系统进行算法验证, 结果表明, 视线高低角速率与方位角速率的估算精度分别为  $0.273^\circ/s$  与  $0.235^\circ/s$ , 实验结果分别为  $0.281^\circ/s$  与  $0.242^\circ/s$ , 相对误差分别为 2.85% 与 2.89%, 验证了视线角速率精度估计算法的正确性与精确性。研究结果可以用于全捷联图像制导控制系统总体设计过程, 并为视线角速率精度估计与指标分配提供理论依据。

**关键词:** 全捷联图像导引头 视线角速率精度 误差灵敏度 半物理仿真实验

中图分类号: TJ765.3 TH74 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.35

## Line-of-sight angular rate accuracy analysis of strapdown imaging seeker

Sun Tingting<sup>1,2</sup>, Chu Hairong<sup>1</sup>, Guo Lihong<sup>1</sup>, Chen Yang<sup>1</sup>, Zhang Baiqiang<sup>1,2</sup>, Zhang Yue<sup>1</sup>, Jia Hongguang<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In order to analyze line-of-sight(LOS) angular rate accuracy factors of the strapdown imaging seeker, LOS angular rate accuracy calculations algorithm is proposed. LOS angular rate estimation algorithm is derived, and “differential + Steady state Kalman” algorithm is used to estimate body LOS angular rate. The error sensitivity of each error source is analyzed in detail using the error theory, and LOS angular rate accuracy calculation algorithm is presented. The error characteristic and causes of body LOS angle, body angular rate, attitude and body LOS angular rate are investigated. The verification system of the LOS angular rate accuracy calculation algorithm is established and experiment is carried out. Results show that estimation accuracies of the LOS elevation angular rate and the azimuth angular rate are  $0.273^\circ/s$  and  $0.235^\circ/s$ , experimental results are  $0.281^\circ/s$  and  $0.242^\circ/s$ , and relative errors are 2.85% and 2.89%, respectively. Experimental results also verify the correctness and accuracy of the algorithm. The results can be used to the whole strapdown imaging guidance and control system design process, and it provides a theoretical basis for the accuracy of the LOS angular rate estimation and indicator allocation.

**Keywords:** strapdown imaging seeker; line-of-sight angle rate; error-sensitivity; hardware in loop simulation experiment

## 1 引言

随着大面阵高分辨率 CMOS 探测器、自动目标识别与跟踪技术及高性能图像跟踪器的迅速发展, 全捷联图像导引头在制导系统中应用问题成为研究热点。全捷联图像导引头在结构复杂性、可靠性及成本方面有诸多优

势, 但由于捷联特性不能直接测量视线角速率信息, 因此, 对视线角速率及其精度的估计是捷联图像制导技术及其工程应用的关键技术。

近年来, 在全捷联图像导引头视线角速率估计方面已有相关研究。Waldmann J<sup>[1]</sup>, 袁亦方等人<sup>[2]</sup>利用扩展卡尔曼滤波技术估计视线角速率; 李璟璟<sup>[3]</sup>忽略弹目相对运动关系, 分别利用扩展 Kalman 滤波、无迹 Kalman 滤

收稿日期: 2015-01 Received Date: 2015-01

波与粒子滤波等算法估计视线角速率并对 3 种算法性能进行对比; Sadhu S 等人<sup>[4]</sup>利用扰动观测器估计视线角速率; 焦迎杰等人<sup>[5]</sup>、孙宝彩等人<sup>[6]</sup>、王佩等人<sup>[7]</sup>等分别采用非线性跟踪微分器与无迹 Kalman 滤波估计视线角速率; Fan J. F. 等人<sup>[8]</sup>设计了线性与非线性混合微分器估计视线角速率, 并表示此方法难以工程应用; LI F. G. 等人<sup>[9]</sup>利用  $\alpha$ - $\beta$  滤波器估计视线角速率; 贾鑫等人<sup>[10]</sup>系统地附加速率补偿法、抖动自适应法、相控阵雷达前馈补偿法和 Kalman 滤波法等多种具有代表性的解耦方案和视线角速率重构方案进行分析对比, 并对其工程实现进行探讨; 姚郁等人<sup>[11]</sup>对重构的惯性视线角精度进行分析。

现有国内外研究多数集中于视线角速率估计和视线角精度分析, 对于视线角速率精度的影响因素与形成机理研究较少。本文根据视线角速率解耦算法, 详细分析视线角速率误差形成机理与误差源特性, 并通过半物理实验验证视线角速率精度估计算法的正确性与准确性, 为全捷联导引头指标体系建立与工程应用提供理论依据。

## 2 视线角速率估计及误差灵敏度计算

制导系统中所需要视线角速率信息可根据导引头测量的体视线角信息结合捷联惯性导航系统( strapdown inertial navigation system, SINS) 提供的弹体角速率与姿态角信息进行估计。

### 2.1 坐标系及角度关系

为研究视线角速率估计算法, 涉及的坐标系有: 地理坐标系  $Ox_c y_c z_c$  (文中视为与惯性坐标系一致)、弹体坐标系  $Ox_b y_b z_b$ 、视线坐标系  $Ox_s y_s z_s$  和体视线坐标系  $Ox_l y_l z_l$ , 其转换关系如图 1 所示, 其中  $q_\gamma$  与  $q_\lambda$  分别为视线高低角与视线方位角,  $q_\alpha$  与  $q_\beta$  分别为体视线高低角与体视线方位角,  $q_c$  为视线变换角,  $\vartheta$ 、 $\psi$ 、 $\gamma$  分别为俯仰角、偏航角与滚转角。

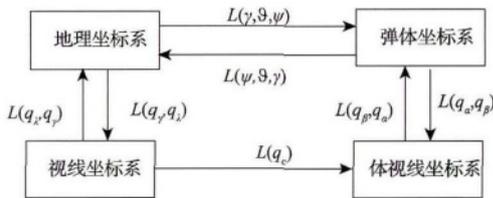


图 1 坐标系间的转换关系

Fig. 1 Rotation relationship among coordinates

### 2.2 视线角速率解耦算法

由于全捷联导引头本身的特点, 体视线角的测量信息中除了惯性视线角信息外, 还包含弹体姿态信息, 视线角速率解耦算法可以通过弹目运动学结合坐标系旋转关

系来推导, 从而去除弹体姿态信息。

假设目标在视线系中的坐标  $X^s$  为  $[R \ 0 \ 0]^T$ , 根据坐标定义及几何关系, 可知目标在体视线系中的坐标  $X^l$  也为  $[R \ 0 \ 0]^T$ 。由坐标间转换关系可得弹体系与地理系中目标坐标  $X^b$  与  $X^c$  分别为:

$$X^b = C_l^b X^l \tag{1}$$

$$X^c = C_s^c X^s \tag{2}$$

且有:

$$X^c = C_b^c X^b \tag{3}$$

则:

$$C_s^c = C_b^c C_l^b \tag{4}$$

式中:  $C_i^j$  表示从  $i$  坐标系到  $j$  坐标系的方向余弦矩阵。求解式(4) 可得视线高低角  $q_\gamma$  与视线方位角  $q_\lambda$ 。

$$\begin{cases} q_\gamma = \arcsin(R_{21} \cos q_\alpha \cos q_\beta + R_{22} \sin q_\alpha - R_{23} \cos q_\alpha \sin q_\beta) \\ q_\lambda = -\arctan \frac{R_{31} \cos q_\beta + R_{32} \tan q_\alpha - R_{33} \sin q_\beta}{R_{11} \cos q_\beta + R_{12} \tan q_\alpha - R_{13} \sin q_\beta} \end{cases} \tag{5}$$

由图 1 可知, 地理系到视线系有两种方式进行转换。第一种由地理系到弹体系、弹体系到体视线系、体视线系到视线系。

$$\Omega_{es}^c = C_b^c (\Omega_{eb}^b + \Omega_{bl}^b) + C_s^c \Omega_{ls}^s \tag{6}$$

式中:  $\Omega_{ij}^k$  为  $j$  坐标系相对于  $i$  坐标系旋转角速度在  $k$  坐标系中的表示。

$$\Omega_{ls}^s = [-\dot{q}_c \ 0 \ 0]^T \tag{7}$$

$$\Omega_{bl}^b = [\dot{q}_\alpha \sin q_\beta \ \dot{q}_\beta \ \dot{q}_\alpha \cos q_\beta]^T \tag{8}$$

$$\Omega_{eb}^b = [\omega_{x1} \ \omega_{y1} \ \omega_{z1}]^T \tag{9}$$

第二种方式根据坐标系转换关系, 直接从视线系到地理系:

$$\Omega_{es}^c = [\dot{q}_\gamma \sin q_\lambda \ \dot{q}_\lambda \ \dot{q}_\gamma \cos q_\lambda]^T \tag{10}$$

由式(5) ~ (10) 可得到视线角速率<sup>[12]</sup>  $\dot{q}_\gamma$  与  $\dot{q}_\lambda$  的计算公式为:

$$\dot{q}_\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \Theta^2}} M Q N \tag{11}$$

$$\dot{q}_\lambda = \frac{1}{\sqrt{1 - \Theta^2}} (\xi R + \xi^T) N \tag{12}$$

式中:

$$\Theta = R_{21} \cos q_\alpha \cos q_\beta + R_{22} \sin q_\alpha - R_{23} \cos q_\alpha \sin q_\beta,$$

$$M = [\cos q_\alpha \cos q_\beta \ \sin q_\alpha \ \cos q_\alpha \sin q_\beta],$$

$$Q =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & R_{12} R_{31} - R_{11} R_{32} & R_{11} R_{33} - R_{13} R_{31} \\ R_{11} R_{32} - R_{12} R_{31} & 0 & R_{12} R_{33} - R_{13} R_{32} \\ R_{11} R_{33} - R_{13} R_{31} & R_{12} R_{33} - R_{13} R_{32} & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$N = [\omega_{x1} + \dot{q}_\alpha \sin q_\beta \quad \omega_{y1} + \dot{q}_\beta \quad \omega_{z1} + \dot{q}_\alpha \cos q_\beta]^T$$

$$R = \begin{bmatrix} -\cos q_\alpha^2 \cos q_\beta^2 & -\sin q_\alpha \cos q_\alpha \cos q_\beta & \cos q_\alpha^2 \sin q_\beta \cos q_\beta \\ -\sin q_\alpha \cos q_\alpha \cos q_\beta & -\sin q_\alpha^2 & \sin q_\alpha \cos q_\alpha \sin q_\beta \\ \cos q_\alpha^2 \sin q_\beta \cos q_\beta & \sin q_\alpha \cos q_\alpha \sin q_\beta & -\cos q_\alpha^2 \sin q_\beta^2 \end{bmatrix}^T$$

$$\xi = [R_{21} \quad R_{22} \quad R_{23}]^T$$

$R_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$  为姿态方向余弦矩阵中第  $i$  行第  $j$  列元素; 弹体角速率  $\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}$ , 姿态角  $\vartheta, \psi, \gamma$  由 SINS 直接测量或解算得到; 体视线角  $q_\alpha, q_\beta$  由导引头通过目标跟踪算法测量得到; 体视线角速率  $\dot{q}_\alpha, \dot{q}_\beta$  可通过构建如图 2 所示的“微分 + 稳态 Kalman 滤波算法”进行估计。

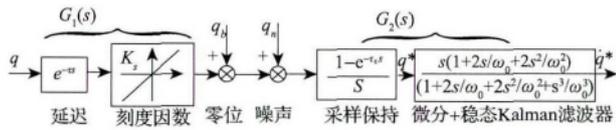


图 2 体视线角速率估计原理图  
Fig. 2 Schematic of BLOS rate estimation

由图 2, 体视线角速率可表示为:

$$\dot{q}^*(s) = G_2(s) (G_1(s)q + q_b + q_n) \quad (13)$$

式中:  $q$  为实际体视线角,  $K_s$  为刻度因数,  $q_b$  为零位误差,  $q_n$  为由图像处理误差  $\sigma$  为相机和图像处理的延迟时间,  $\tau_0$  为采样时间,  $q^*$  为体视线角量测值。

### 2.3 视线角速率误差灵敏度

根据式 (11) ~ (12), 视线角速率可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{q}_\gamma = f_1(q_\alpha, q_\beta, \dot{q}_\alpha, \dot{q}_\beta, \omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}, \vartheta, \psi, \gamma) \\ \dot{q}_\lambda = f_2(q_\alpha, q_\beta, \dot{q}_\alpha, \dot{q}_\beta, \omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}, \vartheta, \psi, \gamma) \end{cases} \quad (14)$$

假设体视线角、体视线角速率、弹体角速率及姿态角的输出精度分别为  $\sigma_q, \sigma_{\dot{q}}, \sigma_\omega$  及  $\sigma_\Phi$ , 根据误差分析与精度分配理论可得视线角速率精度为:

$$\begin{cases} \sigma_{\dot{q}_\gamma}^2 = k_{\gamma q} \sigma_q^2 + k_{\gamma \dot{q}} \sigma_{\dot{q}}^2 + k_{\gamma \omega} \sigma_\omega^2 + k_{\gamma \Phi} \sigma_\Phi^2 \\ \sigma_{\dot{q}_\lambda}^2 = k_{\lambda q} \sigma_q^2 + k_{\lambda \dot{q}} \sigma_{\dot{q}}^2 + k_{\lambda \omega} \sigma_\omega^2 + k_{\lambda \Phi} \sigma_\Phi^2 \end{cases} \quad (15)$$

式中:

$$k_{xq} = \left( \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial q_\alpha} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial q_\beta} \right)^2 \quad (16)$$

$$k_{x\dot{q}} = \left( \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial \dot{q}_\alpha} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial \dot{q}_\beta} \right)^2 \quad (17)$$

$$k_{x\omega} = \left( \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial \omega_{x1}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial \omega_{y1}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial \omega_{z1}} \right)^2 \quad (18)$$

$$k_{x\Phi} = \left( \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial \vartheta} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial \psi} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial \gamma} \right)^2 \quad (19)$$

$$x = \gamma, \lambda$$

以上各项误差灵敏度可以通过分别求取偏导数或误差雅可比矩阵得到。以视线高低角为例分别计

算体视线角误差、体视线角速率误差、弹体角速率误差及姿态角误差对其影响的误差灵敏度。体视线角误差对视线高低角速率的误差灵敏度可利用式 (20) 可得。

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial q_\alpha} = \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial \Theta} \frac{\partial \Theta}{\partial q_\alpha} + \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial M} \frac{\partial M}{\partial q_\alpha} + \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial N} \frac{\partial N}{\partial q_\alpha} \\ \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial q_\beta} = \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial \Theta} \frac{\partial \Theta}{\partial q_\beta} + \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial M} \frac{\partial M}{\partial q_\beta} + \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial N} \frac{\partial N}{\partial q_\beta} \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{式中: } \frac{\partial \Theta}{\partial q_\alpha} = [R_{21} \quad R_{22} \quad -R_{23}]^T \frac{\partial M^T}{\partial q_\alpha}$$

$$\frac{\partial M}{\partial q_\alpha} = [-\sin q_\alpha \cos q_\beta \quad \cos q_\alpha \quad -\sin q_\alpha \sin q_\beta]$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial q_\beta} = [R_{21} \quad R_{22} \quad -R_{23}]^T \frac{\partial M^T}{\partial q_\beta}$$

$$\frac{\partial M}{\partial q_\beta} = [-\cos q_\alpha \sin q_\beta \quad 0 \quad \cos q_\alpha \cos q_\beta]$$

$$\frac{\partial N}{\partial q_\beta} = [\dot{q}_\alpha \cos q_\beta \quad 0 \quad \dot{q}_\alpha - \sin q_\beta]^T$$

$$\frac{\partial N}{\partial q_\alpha} = [0 \quad 0 \quad 0]^T, \quad \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial \Theta} = \frac{\Theta}{\sqrt{(1-\Theta^2)^3}} MQN$$

$$\frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial M} = \frac{1}{\sqrt{1-\Theta^2}} QN, \quad \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial N} = \frac{1}{\sqrt{1-\Theta^2}} MQ$$

体视线角速率误差对视线高低角速率的误差灵敏度如式 (21) 所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial q_\alpha} = (R_{11} \sin q_\lambda + R_{31} \cos q_\lambda) \sin q_\beta + \\ (R_{13} \sin q_\lambda + R_{33} \cos q_\lambda) \cos q_\beta \\ \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial q_\beta} = R_{12} \sin q_\lambda + R_{32} \cos q_\lambda \end{cases} \quad (21)$$

弹体角速率误差对视线高低角速率的误差灵敏度如式 (22) 所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial \omega_{x1}} = R_{11} \sin q_\lambda + R_{31} \cos q_\lambda \\ \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial \omega_{y1}} = R_{12} \sin q_\lambda + R_{32} \cos q_\lambda \\ \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial \omega_{z1}} = R_{13} \sin q_\lambda + R_{33} \cos q_\lambda \end{cases} \quad (22)$$

将式 (21) 与式 (22) 分别带入式 (16) 与式 (18), 计算得到  $k_{xq} = 1^\circ/s/^\circ/s, k_{x\omega} = 1^\circ/s/^\circ/s$ , 由此可见, 体视线角速率与弹体角速率的误差直接传递到视线角速率, 与弹体状态无关。

姿态角误差对视线高低角速率的误差灵敏度可用式 (23) 求得:

$$\frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial \Phi} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \dot{q}_\gamma}{\partial R_{ij}} \cdot \frac{\partial R_{ij}}{\partial \Phi} \quad (23)$$

$$\text{式中: } \Phi = \vartheta, \psi, \gamma$$

体视线角误差、体视线角速率误差、弹体角速率误差及姿态角误差对视线方位角速率的误差灵敏度也可通过类似方法求出。

### 3 误差形成机理分析

本节分别对体视线角误差、陀螺误差、姿态角误差及体视线角速率误差的形成机理进行分析。

#### 3.1 体视线角误差特性分析

全捷联图像导引头体视线角精度取决于从目标到最终信号处理的各中间环节,下面从大气传输、光学系统、机械系统、成像系统、信号处理等方面进行误差分析。

##### 3.1.1 大气传输

大气传输过程中的主要误差为大气抖动,一般经验地选取大气抖动所造成随机误差均方根值  $\sigma_1 = 2''$  服从正态分布。

##### 3.1.2 光学系统

光学系统的误差主要为焦距误差与像差。

###### 1) 焦距误差

导引头体视线角的计算公式为:

$$q_\alpha = \arctan \frac{y}{f} \quad (24)$$

式中:  $q_\alpha$  为体视线角  $y$  为脱靶量  $f$  为焦距。

光学系统参数中只有焦距与体视线角相关,对式(24)的焦距项求偏导,得:

$$dq_\alpha = \frac{1}{1 + (y/f)^2} \frac{ydf}{f^2} \quad (25)$$

假设光学系统焦距  $f = 20 \text{ mm}$ , 相对误差一般在  $1\% \sim 2\%$ , 则  $df = 0.4 \text{ mm}$ 。  $y$  为探测器靶面半宽度,  $y = 3.8 \text{ mm}$ , 则焦距误差引起的最大角度误差为  $\delta_{21} = dq_\alpha = 12.6'$ , 此项误差服从均匀分布, 均方根误差  $\sigma_{21} = 7.3'$ 。

###### 2) 光学系统像差

光学系统的畸变像差<sup>[13]</sup>造成像上的两点之间距离与对应实际空间的位置距离发生变化。对应于光学系统最大畸变量的角误差为:

$$\delta_{22} = k\varepsilon \quad (26)$$

式中: 导引头半视场角  $\varepsilon = 9^\circ$ , 畸变因子  $k = 2\%$ , 则  $\delta_{22} = 10.8'$ , 服从正态分布, 均方根误差为  $\sigma_{22} = 3.6'$ 。

##### 3.1.3 机械系统

导引头的结构框图如图3所示,主要由导引头壳体A、镜筒基座B、镜筒C及相机D等部分组成,导引头输出基准为壳体A的基准。由于加工、装配等原因,导引头结构部分存在加工同轴度误差、镜筒安装误差及焦面安装误差等。

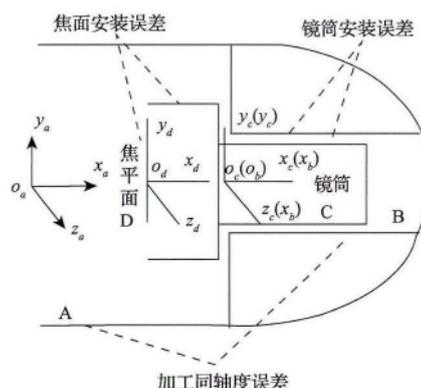


图3 全捷联图像导引头结构框图及坐标系  
Fig. 3 Strapdown seeker structure diagram and coordinates

加工同轴度误差指壳体轴线  $O_a x_a$  与镜筒基座轴线  $O_b x_b$  之间的同轴度误差,服从均匀分布,误差角  $\delta_{31} = 0.43'$ , 均方根误差为  $\sigma_{31} = 0.25'$ , 属于系统误差。

镜筒安装误差主要指镜筒轴线  $O_c x_c$  与镜筒基座轴线  $O_b x_b$  的同轴度误差,服从均匀分布,误差角  $\delta_{32} = 3.9'$ , 均方根误差为  $\sigma_{32} = 2.5'$ , 属于系统误差。

焦面安装误差主要为相机焦面轴线  $O_d x_d$  与镜筒轴线  $O_c x_c$  之间的同轴度误差,属系统误差,可以通过安装与相机配置方式保证清晰成像。

相机焦面圆周方向误差主要是指壳体坐标系  $O_a y_a$  轴与焦面坐标系  $O_d y_d$  轴之间的夹角  $\gamma$ , 如图4所示。此误差是由于装配造成的系统误差,可以通过标定进行修正,残差约为2个像素,服从均匀分布,则由此造成的角误差  $\delta_{33} = 2.2'$ , 均方根误差为  $\sigma_{33} = 1.3'$ 。

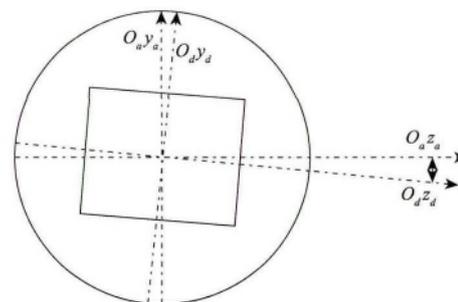


图4 相机焦面圆周误差  
Fig. 4 Camera focal plane circumference error

##### 3.1.4 成像系统误差

成像系统误差主要为分辨率误差、帧延迟误差与拖尾误差等。

###### 1) 分辨率误差

分辨率误差为服从均匀分布的随机误差, 导引头分辨率为  $1024 \times 768$ , 视场角为  $18^\circ \times 12^\circ$ , 则  $\delta_{41} = 1.1'$ ,  $\sigma_{41} = 0.6'$ 。

2) 帧延迟误差

目标图像是相机在曝光阶段所形成, 而相机数据输出是在曝光之后, 两者之间存在不同步的时间差  $\tau$ , 如图 5 所示, 最大时间差为帧间隔  $T_f$ , 即  $\tau_{\max} = T_f$ 。在帧时间内, 弹目相对运动造成相机数据输出后的目标位置与曝光时刻目标位置之间存在一个角误差。假设弹目相对距离为  $R$ , 导弹与目标在帧时间内均近似匀速直线运动, 则帧时间  $T_f$  内最大角误差  $\delta_{42}$  为:

$$\delta_{42} = s/R = V_c T_f / R \quad (27)$$

式中:  $s$  是帧时间内弹目相对运动造成的最大位移,  $V_c$  是弹目相对运动速度。

此项误差属于系统误差, 服从均匀分布, 对于帧频为 50 Hz 的相机可以通过曲线插值校正方法将延迟时间减小到 5 ms<sup>[14]</sup>, 假设目标运动速度为 16.67 m/s, 弹体速度为 300 m/s, 弹目相对距离为 1 500 m, 则  $\delta_{42} = 3.3'$ ,  $\sigma_{42} = 1.9'$ 。

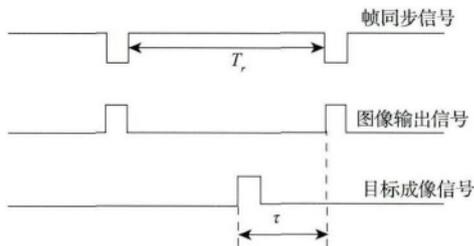


图 5 帧间延迟示意图

Fig. 5 Inter-frame delay schematic

3) 拖尾误差

对于运动目标的测量, 增大曝光时间, 会产生拖尾误差, 其计算公式为:

$$\delta_{43} = L\delta_{41}/2 \quad (28)$$

式中:  $L$  为弹目相对运动与静止时成像误差的行数。

此项误差服从均匀分布, 假设由于相机曝光时间增加造成拖尾行数为 2 行, 则  $\delta_{43} = 1.1'$ ,  $\sigma_{43} = 0.6'$ 。

3.1.5 信号处理误差

从相机输出的图像数据需要经过一系列的信号传输与图像处理, 才能输出目标脱靶量, 其主要误差为计算延时误差与图像算法误差。

1) 计算延迟误差

与帧延迟误差分析相似, 计算延迟误差带来的最大角误差  $\delta_{51}$  为:

$$\delta_{51} = s/R = V_c T_f / R \quad (29)$$

此项误差为系统误差, 服从均匀分布。按前述弹目运动参数计算得  $\delta_{51} = 3.3'$ ,  $\sigma_{51} = 1.9'$ 。

2) 图像算法误差

针对地面复杂背景下的坦克目标, 图像处理算法会

产生  $n$  个像素的算法误差<sup>[15-16]</sup>, 其产生的角误差为:

$$\delta_{52} = n\delta_{41} \quad (30)$$

此项误差为随机误差, 服从正态分布。假设图像算法产生 2 个像素的判读误差, 则  $\delta_{52} = 2.2'$ ,  $\sigma_{52} = 0.7'$ 。

3.1.6 体视线角误差综合

综合以上分析可知, 光学误差与结构误差均属于系统误差, 可通过标定补偿方法进行修正, 但补偿后仍剩余未定系统误差(残差), 分别约为  $1.1'$  与  $2.2'$ ; 而帧延迟误差与计算延时误差也同样为系统误差, 可以通过曲线插值校正方法将延迟时间减小到 5 ms; 其余成像系统误差与信号处理误差均为随机误差, 误差统计如表 1 所示。

表 1 体视线角误差统计表

Table 1 Body LOS angle errors statistical table

误差项名称	误差类型	分布类型	$\delta$	$\sigma$	
大气传输误差	随机误差	正态分布	6"	2"	
光学误差	未定系统误差	均匀分布	1.1'	0.6'	
结构误差	未定系统误差	均匀分布	2.2'	1.3'	
成像系 统误差	分辨率误差	随机误差	均匀分布	1.1'	0.6'
	帧延迟误差	未定系统误差	均匀分布	3.3'	1.9'
	拖尾误差	随机误差	均匀分布	1.1'	0.6'
信号处 理误差	计算延时 误差	未定系统误差	均匀分布	3.3'	1.9'
	算法误差	随机误差	正态分布	2.2'	0.7'
总误差				3.3'	

对以上未定系统误差与随机误差按随机误差综合方法进行合成<sup>[17]</sup>, 得到导引头体视线角误差总均方根值约为  $3.3'$ 。

3.2 陀螺误差特性

MEMS 陀螺用于测量导弹相对于惯性空间的角速率。由于生产工艺、外界使用环境、安装偏差等因素都会带来误差。陀螺的数学模型<sup>[18]</sup>为:

$$\tilde{\omega}_{ib}^b = \omega_{ib}^b + b_g + S_g \omega_{ib}^b + N_g \omega_{ib}^b + \varepsilon_g \quad (31)$$

式中:  $\tilde{\omega}_{ib}^b$  为陀螺量测角速度矢量,  $\omega_{ib}^b$  为实际角速度矢量,  $b_g$  为陀螺零偏,  $S_g$  为刻度因数误差矩阵,  $N_g$  为交叉耦合误差矩阵,  $\varepsilon_g$  为随机误差。

陀螺随机误差  $\varepsilon_g$  可表示为:

$$\varepsilon_g(t) = \varepsilon_{gb}(t) + \varepsilon_{gr}(t) + w_g(t) \quad (32)$$

式中:  $\varepsilon_{gb}$  为逐次启动漂移;  $\varepsilon_{gr}$  为慢变漂移, 等效为一阶马尔科夫随机过程;  $w_g$  是快变漂移, 等效为白噪声。

陀螺数学模型中的零偏、刻度因数及交叉耦合等误差项可以通过精密转台标定与补偿, 但随机误差只能通过滤波方式进行适当减小。

3.3 姿态误差

影响短时间捷联惯导姿态误差主要为初始对准误

差、陀螺误差及算法误差。初始对准误差作为姿态微分方程的初始值,直接影响最终姿态精度。姿态角误差方程近似为<sup>[11]</sup>:

$$\delta\Phi_{k+1} \approx (I + K_1) \delta\Phi_k + K_2 \delta\vec{\omega}_k \quad (33)$$

式中:

$$K_1 = T \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sin\vartheta_k}{\cos^2\vartheta_k} W & -\frac{1}{\cos\vartheta_k} P \\ 0 & 0 & \cos\gamma_k \omega_y - \sin\gamma_k \omega_z \\ 0 & -(1 + \tan^2\vartheta_k) W & \tan\vartheta_k P \end{bmatrix}$$

$$W = \cos\gamma_k \omega_y - \sin\gamma_k \omega_z, P = \sin\gamma_k \omega_y + \cos\gamma_k \omega_z$$

$$K_2 = \frac{1}{\cos\vartheta_k} \begin{bmatrix} 0 & \cos\gamma_k & -\sin\gamma_k \\ 0 & \sin\gamma_k \cos\vartheta_k & \cos\gamma_k \cos\vartheta_k \\ \cos\vartheta_k & -\cos\gamma_k \sin\vartheta_k & \sin\gamma_k \sin\vartheta_k \end{bmatrix}$$

$T$ 为惯导解算周期,一般为5ms; $\delta\Phi_k$ 为 $k$ 时刻姿态解算误差, $\delta\vec{\omega}_k$ 为 $k$ 时刻陀螺测量误差。

在已知陀螺测量误差方差阵 $P_\omega$ 情况下,可以估算得到弹体姿态误差方差为:

$$P_{\Phi_{k+1}} \approx (I + K_1) P_{\Phi_k} (I + K_1)^T + K_2 P_\omega K_2^T \quad (34)$$

### 3.4 体视线角速率误差

体视线角速率精度由体视线角测量精度、导引头零位误差及图像处理精度决定,由图2体视线角速率精度可表示为:

$$\sigma_{q_i} = \sqrt{\|G_2\|^2 (\|G_1\|^2 K_q^2 + K_{q_0}^2 + K_{q_n}^2)} \quad (35)$$

式中: $K_q$   $K_{q_0}$   $K_{q_n}$ 分别为体视线角误差、零位误差、图像处理误差的单边功率谱密度。

## 4 实验与分析

### 4.1 角速率估计半物理仿真实验

为验证视线角速率精度估计算法的正确性,依据图6

所示的视线角速率精度对比实验原理框图,建立如图7所示的半物理仿真系统。仿真系统由三轴飞行仿真转台、实时仿真计算机、全捷联图像导引头、MEMS惯导系统、图形工作站、投影仪及投影幕等组成。仿真计算机实时计算弹目相对运动六自由度数学模型,并向图形工作站发送弹目相对运动信息 $[\vec{\omega}_m^i, \vec{\Phi}_m, \vec{V}_i, \vec{P}_i, \vec{V}_m, \vec{P}_m]$ ,三轴仿真转台根据仿真机姿态角指令 $[\vartheta, \varphi, \gamma]$ 模拟弹体姿态运动,全捷联图像导引头与MEMS惯导系统均安装于转台的内框,MEMS惯导系统敏感转台角速度 $\vec{\omega}_m^i$ 并解算姿态信息 $[\vartheta, \varphi, \gamma]$ ;导引头实时跟踪投影幕上的目标,输出体视线角 $\tilde{q}_\alpha$ 与 $\tilde{q}_\beta$ ,仿真计算机利用以上信息计算视线角速率 $\tilde{q}_\gamma$ 与 $\tilde{q}_\lambda$ 并对比其理论计算,可得到视线角速率精度 $\sigma_{cq_\gamma}$ 与 $\sigma_{cq_\lambda}$ ;同时根据各误差源特性与误差灵敏度计算估计精度 $\sigma_{eq_\gamma}$ 与 $\sigma_{eq_\lambda}$ ,与实测视线角速率精度对比即可验证。

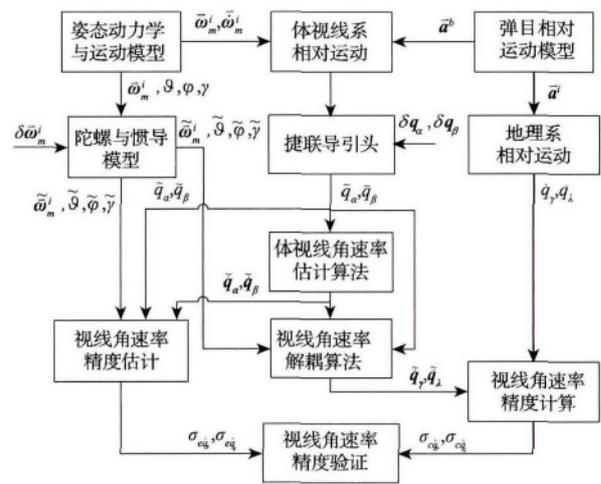


图6 半物理仿真实验原理图

Fig. 6 Hardware in loop simulation experiment diagram

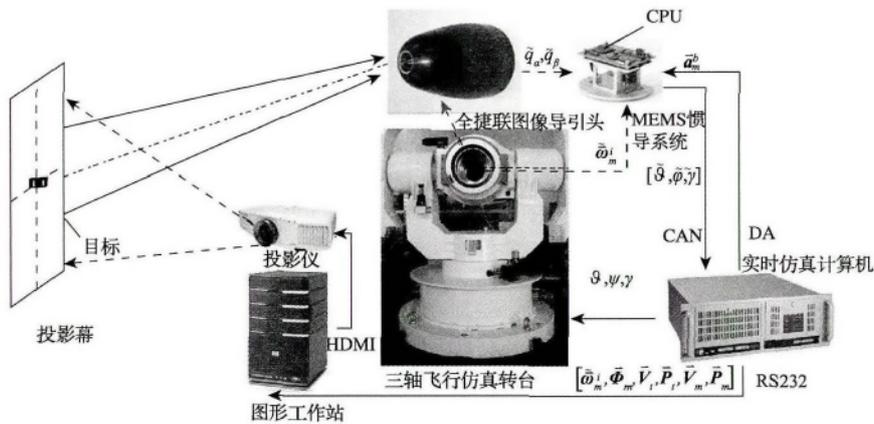


图7 半物理仿真实验平台

Fig. 7 Hardware in loop simulation experiment platform

仿真中使用的全捷联导引头与 MEMS 陀螺的参数分别如表 2 与表 3 所示。在估计体视线角速率时,考虑滤波精度与动态特性,设定稳态 Kalman 滤波器  $\omega_0$  为  $19.2\text{rad/s}$ ,则体视线角速率估计精度约为  $0.27^\circ/\text{s}$ 。

表 2 全捷联导引头参数表

Table 2 Strapdown seeker parameters table

指标项	参数
相机延时/s	0.02
分辨率/ $^\circ/\text{pix}$	0.028
零阶保持/s	0.02
零位误差	均匀分布 $U(0, 0.028^\circ)$
图像处理不确定性	正态分布 $N(0, 0.028^\circ)$
线性度 $K_s$	均匀分布 $U(0.66, 1.33)$

表 3 MEMS 陀螺参数

Table 3 MEMS gyro parameters table

指标项	参数
零偏/ $^\circ/\text{h}$	60
零偏稳定性/ $^\circ/\text{h}$	60
交叉耦合/ $10^{-6}$	500
角度随机游走系数/ $^\circ/\sqrt{\text{h}}$	0.2
比例因子误差/ $10^{-6}$	2 000

### 4.2 角速率估实验结果分析

利用式 (20) 与 (21) 计算体视线角与姿态角对视线角速率的误差灵敏度,结果如图 8 和 9 所示。体视线角对视线角速率的误差灵敏度随着体视线高低角增大而减小,随着体视线方位角增大而增大,最大值为  $0.367^\circ/\text{s}/^\circ$ ,在体视线角为  $0^\circ$  时的误差灵敏度为  $0.345^\circ/\text{s}/^\circ$ ;姿态角对视线角速率的误差灵敏度随着俯仰角与偏航角增大而减小,最大值  $1.747^\circ/\text{s}/^\circ$  出现在俯仰角  $-45^\circ$ ,偏航角  $-10^\circ$  时,在姿态角为  $0^\circ$  时,误差灵敏度为  $0.991^\circ/\text{s}/^\circ$ 。由上可以看出,姿态角误差对体视线角速率精度影响最大,需要严格控制弹体姿态角误差,在实际应用过程中,可通过提高初始对准精度与惯性器件精度,或与 GNSS 进行组合导航等方法提高姿态精度;体视线角速率误差与弹体角速率误差对视线角速率精度影响次之,可以分别通过选用高精度全捷联导引头与 MEMS 陀螺等硬件方法,也可以通过利用稳态 Kalman 滤波、UKF 非线性滤波等算法提高体视线角速率与弹体角速率;最后体视线角对视线角速率精度的影响最小,可通过提高全捷联导引头视线角精度减少其影响。

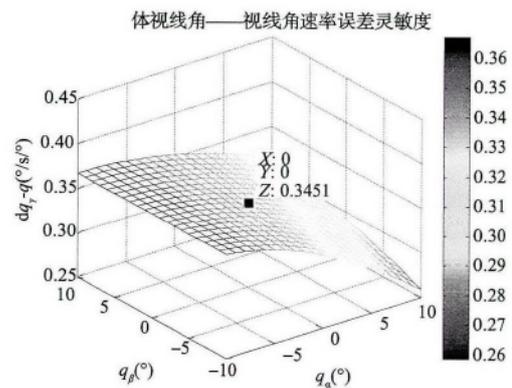


图 8 体视线角—视线角速率误差灵敏度

Fig. 8 Body LOS angle – LOS angular rate error-sensitivity

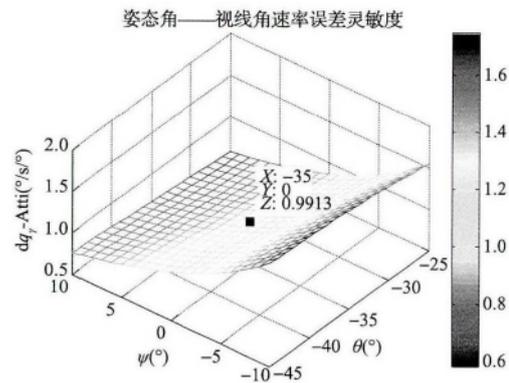


图 9 姿态角—视线角速率误差灵敏度

Fig. 9 Attitude – LOS angular rate error-sensitivity

根据式 (16) 计算视线角速率精度,并与半物理仿真实验数据进行对比,实验结果分别如图 10 和 11 所示。

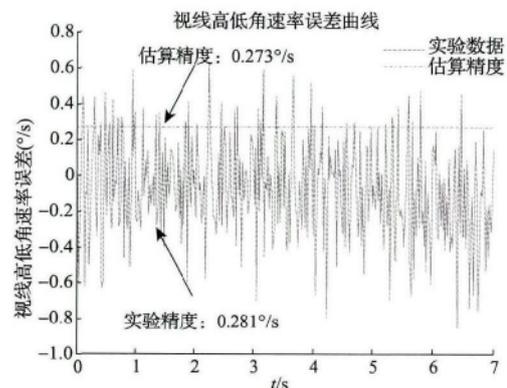


图 10 视线高低角速率误差

Fig. 10 LOS elevation angular rate error

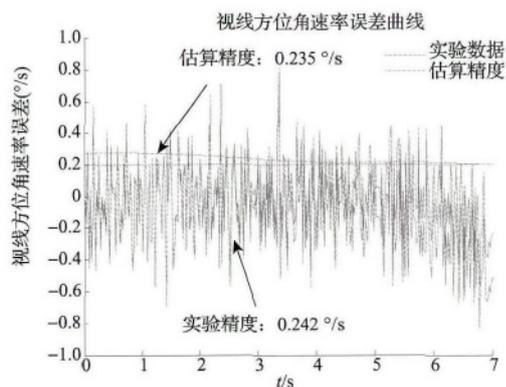


图 11 视线方位角速率误差

Fig. 11 LOS azimuth angular rate error

从图 10 与图 11 中可以看出, 视线高低角速率估算精度为  $0.273^{\circ}/s$ , 实验结果为  $0.281^{\circ}/s$ ; 视线方位角速率估算精度为  $0.235^{\circ}/s$ , 实验结果为  $0.242^{\circ}/s$ ; 经过计算, 视线角速率相对估计误差分别为 2.85% 与 2.89%, 理论计算与实验结果相近, 验证了视线角速率精度估计算法的正确性与精确性。

## 5 结 论

全捷联图像导引头在工程中逐渐得到应用, 其精度问题的研究越来越重要。本文推导了视线角速率估计及精度计算算法, 详细分析了视线角速率各误差源的误差灵敏度与误差特性, 并通过半物理进行验证, 实验表明, 视线高低角速率与方位角速率的估算精度分别为  $0.273^{\circ}/s$  与  $0.235^{\circ}/s$ , 实验结果分别为  $0.281^{\circ}/s$  与  $0.242^{\circ}/s$ , 视线角速率精度相对估计误差分别为 2.85% 与 2.89%, 验证了视线角速率精度估计算法的正确性与精确性。本文提出的视线角速率精度估计算法可以用于基于全捷联图像导引头制导控制系统总体设计过程中视线角速率精度估计与指标分配, 为全捷联导引头指标体系建立提供理论依据。

## 参考文献

- [1] WALDMANN J. Line-of-sight rate estimation and linearizing control of an imaging seeker in a tactical missile guided by proportional navigation [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(4): 556-567.
- [2] 袁亦方, 林德福, 祁载康, 等. 单兵全捷联图像制导弹药制导信息估计技术 [J]. 红外与激光工程, 2015(1): 370-376.
- YUAN Y F, LIN D F, QI Z K, et al. Techniques on estimating guidance information for strapdown image guided man portable munitions [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015(1): 370-376.

- [3] 李璟璟. 捷联成像导引头视线角速率估计方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- LI J J. Research of LOS rate estimation method for strap-down imaging seeker [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [4] SADHU S, GHOSHAL T K. Sight line rate estimation in missile seeker using disturbance observer-based technique [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(2): 449-454.
- [5] 焦迎杰, 王潇, 陈志坚. 捷联寻的制导技术在近程制导火箭中的应用 [J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(1): 13-17.
- JIAO Y J, WANG X, CHEN ZH J. Application of strap-down homing guidance technology in short-range guided rocket [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(1): 13-17.
- [6] 孙宝彩, 范军芳. 全捷联小型弹药制导系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2014(6): 1960-1965.
- SUN B C, FAN J F. Guidance system design for deeply strapdown miniature munitions [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014(6): 1960-1965.
- [7] 王佩, 张科, 吕梅柏. 跟踪-微分器在全捷联制导中的应用分析 [J]. 西北工业大学学报, 2014(5): 817-821.
- WANG P, ZHANG K, LV M B. Application and analysis of tracking differentiator in strapdown guidance [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014(5): 817-821.
- [8] FAN J F, SU ZH, LI Q, et al. A hybrid differentiator for strapdown guidance system [C]. The 12th International Conference on Control, Automation and Systems. Jeju Island Korea, 2012: 1960-1964.
- [9] LI F G, XIA Q L, XIONG L Q, et al. Study on air-to-ground missile with strapdown imaging infrared seeker against moving target [C]. Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, 2013: 5149-5152.
- [10] 贾鑫, 罗艳伟, 罗丽. 全捷联导引头解耦技术方法 [J]. 战术导弹技术, 2013(1): 77-81.
- JIA X, LUO Y W, LUO L. Research on decoupling methods of strapdown seeker [J]. Tactical Missile Technology, 2013(1): 77-81.
- [11] 姚郁, 林喆, 逄晓光. 捷联成像寻的器惯性视线重构精度分析 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 1-4 31.
- YAO Y, LIN ZH, DI X G. Accuracy analysis of inertial line of sight reconstruction with strapdown imaging homing seeker [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1): 1-4 31.
- [12] 孙婷婷, 储海荣, 贾宏光, 等. 捷联式光学导引头视线

- 角速率解耦与估计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1587-1593.
- SUN T T, CHU H R, JIA H G, et al. Line-of-sight angular rate decoupling and estimation of strapdown optical seeker[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1587-1593.
- [13] 董明利, 庄炜, 孙鹏, 等. 随对焦状态与物距变化的畸变模型及标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 2653-2659.
- DONG M L, ZHUANG W, SUN P, et al. Study on distortion model and calibration method varying due to focus setting and object distance variation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(12): 2653-2659.
- [14] RAVIV D, DJAJA E W. Technique for enhancing the performance of discretized controllers[J]. IEEE Control Systems, 1999, 19(3): 52-57.
- [15] 邱男, 李桂菊, 陈春宁, 等. 结合归一化差分高斯特征的图像匹配技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6): 585-590.
- DI N, LI G J, CHEN CH N, et al. Image matching technology research based on normalized DOG features[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(6): 585-590.
- [16] 李红岩, 毛征, 袁建建, 等. 一种基于算法融合的运动目标跟踪算法[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(12): 36-40.
- LI H Y, MAO ZH, YUAN J J, et al. Moving targets tracking algorithm based on algorithm-fusion[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(12): 36-40.
- [17] 苏灏庆, 何玉珠. 某型导引头测试系统的测量不确定度研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(2): 31-33, 58.
- SU H Q, HE Y ZH. Uncertainty research of automatic test system[J]. Electronic measurement technology, 2013, 36(2): 31-33, 58.
- [18] 吕品, 刘建业. 光纤陀螺的随机误差性能评价方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 412-418.
- LV P, LIU J Y. Research on the performance evaluation methods of fiber optical gyro stochastic errors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(2): 412-418.

### 作者简介



孙婷婷 2011 年于吉林大学获得学士学位, 现于中国科学院大学就读博士研究生, 主要从事导航、制导与控制技术研究。

E-mail: joystt@163.com

**Sun Tingting** received B. Sc. degree from Jilin University in 2011. Now she is a Ph. D. candidate in University of Chinese Academy of Sciences, her main research includes navigation, guidance and control technology.



贾宏光 2000 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位。现为长春光机所研究员、博士生导师, 主要从事精确制导与控制技术研究。

E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn

**Jia Hongguang** received Ph. D. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. Now he is a research fellow and doctoral supervisor in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His main research includes precision guided and control.