

## 带漂移补偿的 HRG 平台四位置自对准方法

陈伟, 刘洁瑜, 田颖, 李灿

(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

**摘要:** 为有效抑制半球谐振陀螺的随机漂移和零偏, 提高半球谐振陀螺平台方位自对准精度, 设计了一种带漂移补偿的半球谐振陀螺平台四位置自对准方案。通过对陀螺随机漂移信号进行 ARMA 建模补偿, 对陀螺输出信号进行滤波处理, 减少随机漂移和噪声干扰给对准精度带来的影响, 并分别对二位置及四位置方案进行试验验证。试验结果表明, 该方案的对准时间与传统的四位置对准相当, 对准精度为  $15.78'$ , 优于忽略随机漂移的二位置及四位置的对准精度。

**关键词:** 自回归滑动平均模型; 惯导平台; 陀螺漂移; 自对准; 四位置

**中图分类号:** V241.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2016)01-0039-05

## A Four-Position Self-Alignment Method with Drift Compensation for HRG Inertial Navigation Platform

CHEN Wei, LIU Jie-yu, TIAN Ying, LI Can

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In order to suppress the random drift and zero bias of the Hemispherical Resonator Gyro (HRG), and improve the azimuth self-alignment accuracy of the HRG inertial navigation platform, a four-position self-alignment method with drift compensation was designed for the HRG inertial navigation platform. An ARMA model of the HRG random drift was constructed for filtering the signal output from the gyro, thus to decrease the influence of the random drift and noise to the azimuth self-alignment accuracy. Experiments were made to the two-position and four-position schemes separately. The experiment result shows that, the alignment time of our four-position drift detecting scheme is equivalent to that of the traditional four-position scheme, but the accuracy of this scheme is  $15.78'$ , which is better than that of the traditional two/four-position scheme ignoring the gyroscope drift.

**Key words:** ARMA; inertial navigation platform; gyroscope drift; self alignment; four-position

### 0 引言

半球谐振陀螺(Hemispherical Resonator Gyro, HRG)具有精度高、体积小、功率低、启动快、可靠性高、寿命长等特点。在国外,HRG已作为成品广泛应用于飞机导航设备及卫星<sup>[1]</sup>;在国内,对其研究主要还集中在器件上<sup>[2]</sup>,在惯性平台上的应用研究则较少。目前,研究惯性平台自对准的文献较多<sup>[3-5]</sup>,按平台转动方式的不同,可以分为二位置方案<sup>[6]</sup>、四位置方案及多位置方案<sup>[7]</sup>

等。其中:二位置方案对准时间短,但精度较差;多位置方案对准精度较高,但对准时间长,且大部分方案将陀螺的随机漂移忽略掉<sup>[8]</sup>,给对准精度带来一定影响。综合考虑对准时间和精度因素,本文提出一种带漂移补偿<sup>[9]</sup>的HRG平台四位置自对准方案。该方案不受陀螺刻度因子变化的影响,也不用知道当地的纬度值,通过对陀螺随机漂移信号进行ARMA建模,并对输出信号进行滤波处理,只需4个位置陀螺的输出信号就可以解算出参考轴向与北向的初始方位角。

### 1 HRG 平台自对准原理

#### 1.1 HRG 平台误差模型

本文采用文献[10]中的误差方程来建立HRG平台自对准模型,即

收稿日期:2015-02-05

修回日期:2015-11-25

基金项目:总装探索研究基金(2010TC4303)

作者简介:陈伟(1990—),男,四川遂宁人,硕士生,研究方向为半球谐振陀螺平台自对准技术。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{U_x}{k_x} &= \omega_{ie} \cos L \sin \theta + \eta_{yx} \omega_{ie} \cos L \cos \theta + \\ &\quad \eta_{zx} \omega_{ie} \sin L + \dot{D}_{x0} + h_{xb}^\theta \\ \frac{U_y}{k_y} &= \omega_{ie} \cos L \cos \theta + \eta_{xy} \omega_{ie} \cos L \sin \theta + \\ &\quad \eta_{zy} \omega_{ie} \sin L + \dot{D}_{y0} + h_{yb}^\theta \\ \frac{U_z}{k_z} &= \omega_{ie} \sin L + \eta_{xz} \omega_{ie} \cos L \sin \theta + \\ &\quad \eta_{yz} \omega_{ie} \cos L \cos \theta + \dot{D}_{z0} + h_{zb}^\theta \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中:  $U_x, k_x, \theta, \eta_{i,j}, h_{ib}^\theta$  ( $i=x, y, z$ ) 分别为半球谐振陀螺的输出电压值、标度因数、平台初始方位角和安装误差角、平台各轴的航向效应;  $\omega_{ie}$  为地球自转角速度;  $L$  为当地纬度;  $\dot{D}_{i0}$  ( $i=x, y, z$ ) 为陀螺的漂移。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{N_x}{K_{1x}} &= K_{x0} + A_x + K_{yx} A_y + K_{zx} A_z \\ \frac{N_y}{K_{1y}} &= K_{y0} + A_y + K_{xy} A_x + K_{zy} A_z \\ \frac{N_z}{K_{1z}} &= K_{z0} + A_z + K_{yz} A_y + K_{xz} A_x \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中:  $K_{ij}$  为主平台的安装误差;  $A_i$  ( $i=x, y, z$ ) 为相应轴上的加速度分量;  $N_i$  ( $i=x, y, z$ ) 为加速度计脉冲输出;  $k_{i0}$  ( $i=x, y, z$ ) 为加速度计零偏。在转台试验和自对准解算过程中, 将以上述模型为基础进行相关计算。

### 1.2 HRG 平台自对准选点原则

在 HRG 平台自对准过程中, 确定两个相差  $90^\circ$  的点, 根据北向陀螺的规律性漂移历次标定结果曲线的重复性, 选择相位差为  $90^\circ$ 、且规律性漂移基本相当的点对, 一般情况下, 满足该条件的点对有多组, 此时, 可以按照以下原则选择最佳点对: 当存在两个或两个以上相位差,  $\theta \in [90^\circ - \delta, 90^\circ + \delta]$  且规律性漂移基本相当的点对, 满足如下条件的  $x_i$  为最优点对

$$\sigma_{x1} \leq \sigma_{x2} \leq \sigma_{x3} \leq \dots \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{xi}$  为各点对在其所处相位邻域  $[-\delta, \delta]$  的标准方差, 利用概率论的相关定义可以得到证明;  $\delta$  由转动定位精度确定, 一般情况下满足  $\delta < 6'$ 。

### 1.3 HRG 平台自对准过程分析

在确定好最优点对后, 进行平台的水平对准, 当平台粗调平后满足一定精度 (如  $|\theta_E| \leq 10'$ ) 时, 对方位轴 HRG 施加指令电压, 使 HRG 平台方位轴始终跟踪地速, 从而达到方位轴稳定。而后, 将平台台体转动到第一个位置, 在平台完成第一个位置的测试后, 在方位 HRG 上施加指令电压, 使平台转到选点其余位置, 并进行数据采集和解算。HRG 平台自对准结构如图 1 所示。

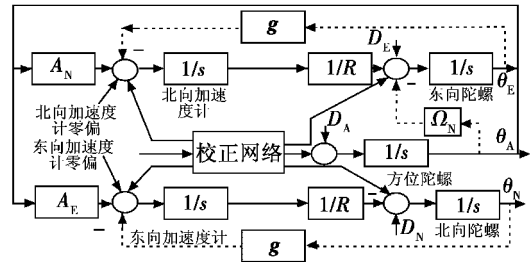


图1 HRG 平台自对准结构图

Fig. 1 Block diagram of HRG platform self-alignment

### 1.4 二位置自对准方案

二位置自对准方案采用在相差  $180^\circ$  的两点上采样, 相互抵消陀螺常值漂移的方法, 是实际应用中常用的方法。如图 2 所示, HRG 平台位于地球上经度  $\lambda$ 、纬度  $L$  的一点  $O$  处, 其参考方向与载体坐标  $Ox_b Y_b Z_b$  的  $Y_b$  轴向相重合 (平行)。在方位自对准开始时, HRG 处于第一位置, 陀螺坐标系  $Ox_g Y_g Z_g$  的  $Y_g$  轴与载体坐标  $Ox_b Y_b Z_b$  的  $Y_b$  轴向相重合。

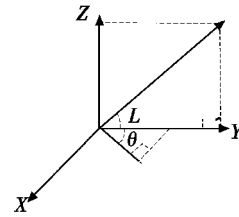


图2 方位对准示意图

Fig. 2 Diagram of azimuth alignment schematic

当平台输出采样完成后, 对方位陀螺施加指令电压, HRG 平台带动陀螺组件顺时针旋转  $180^\circ$ , 此时, 陀螺坐标系相对载体系有绕方位轴向的夹角  $\theta = \pi$ , 则地球自转角速率在陀螺坐标系  $Ox_g Y_g Z_g$  中的分量为

$$\omega_{ie}^g = \begin{pmatrix} \omega_{ie} \cos L \sin(n\pi + \theta_x) \\ \omega_{ie} \cos L \cos(n\pi + \theta_y) \\ \omega_{ie} \sin L \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中:  $n$  代表 HRG 分别在  $0^\circ$  位置和  $180^\circ$  位置;  $\theta_x$  和  $\theta_y$  分别为平台  $X$  轴和  $Y$  轴的初始方位角。由式 (1) 忽略 HRG 在平台上的安装误差  $\eta_{i,j}$  和平台的航向效应  $h_{ib}^\theta$  ( $i=x, y, z$ ), 可得 HRG 敏感轴上的输出应为

$$\begin{cases} U(0)_x = K_x \omega_{ie} \cos L \sin \theta_x + \varepsilon_{x0} + \varepsilon(0)_x \\ U(180)_x = -K_x \omega_{ie} \cos L \sin \theta_x + \varepsilon_{x0} + \varepsilon(180)_x \\ U(0)_y = K_y \omega_{ie} \cos L \sin \theta_y + \varepsilon_{y0} + \varepsilon(0)_y \\ U(180)_y = -K_y \omega_{ie} \cos L \sin \theta_y + \varepsilon_{y0} + \varepsilon(180)_y \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $U(0)_x, U(180)_x, U(0)_y, U(180)_y$  分别为  $X$  轴和  $Y$  轴的 HRG 在  $0^\circ$  位置和  $180^\circ$  位置的输出;  $K_x, K_y$  为  $X$  轴和  $Y$  轴陀螺的刻度因子;  $\varepsilon_{x0}, \varepsilon_{y0}$  分别为 HRG 的常值漂移;  $\varepsilon(0)_x, \varepsilon(0)_y, \varepsilon(180)_x, \varepsilon(180)_y$  分别为陀螺  $X$  轴和

Y 轴在 0° 位置和 180° 位置的随机漂移。若忽略随机漂移的影响,可以得到 X 轴和 Y 轴与北向的夹角(初始方位角),即

$$\begin{cases} \theta_x = \arcsin \frac{U(0)_x - U(180)_x}{2K_x \omega_{ie} \cos L} \\ \theta_y = \arccos \frac{U(0)_y - U(180)_y}{2K_y \omega_{ie} \cos L} \end{cases} \quad (6)$$

二位置自对准方案要用到陀螺标度因数 and 当地纬度两个参数,其误差会影响对准精度,针对二位置自对准存在的不足,提出一种基于 ARMA 模型带漂移补偿的 HRG 平台四位置自对准方案。

## 2 带漂移补偿的 HRG 平台四位置自对准方案

### 2.1 忽略随机漂移的四位置自对准方案

HRG 平台四位置方位自对准是利用陀螺敏感地球自转角速率在平台上 4 个不同方位的分量,并由此计算出平台参考轴向与真北方向的夹角(初始方位角)。根据式(5),以 X 轴为例,如果分别在 0°, 90°, 180°, 270° 各测量一次陀螺的输出电压,则有

$$\begin{cases} U(0)_x = K_x \omega_{ie} \cos L \sin \theta_x + \varepsilon_{x0} + \varepsilon(0)_x \\ U(90)_x = K_x \omega_{ie} \cos L \cos \theta_x + \varepsilon_{x0} + \varepsilon(90)_x \\ U(180)_x = -K_x \omega_{ie} \cos L \sin \theta_x + \varepsilon_{x0} + \varepsilon(180)_x \\ U(270)_x = -K_x \omega_{ie} \cos L \cos \theta_x + \varepsilon_{x0} + \varepsilon(270)_x \end{cases} \quad (7)$$

若忽略随机漂移的影响,对于 X 轴有

$$\theta_x = \arctan \frac{U(0)_x - U(180)_x}{U(90)_x - U(270)_x} \quad (8)$$

同样,对于 Y 轴有

$$\theta_y = \arctan \frac{U(0)_y - U(180)_y}{U(90)_y - U(270)_y} \quad (9)$$

由式(8)、式(9)可以看出,采用四位置自对准方案,不需要知道陀螺的刻度因子、地球的自转角速率以及当地的地理纬度,只通过测量 4 个位置陀螺的输出信号就可以解算出两轴的初始方位角,但它的转动时间比二位置方案多一倍,因此受陀螺随机漂移的影响相对较大。图 3 所示为陀螺 0.5 h 实际输出电压,从图 3 可以看出,陀螺的输出信号含有大量噪声。

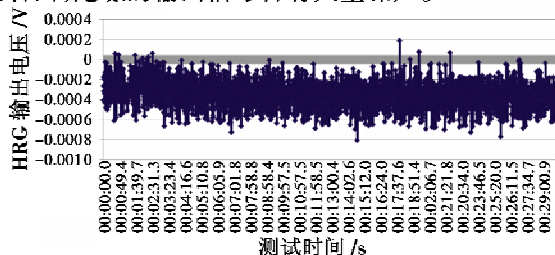


图 3 HRG 零位输出

Fig. 3 The zero output of the HRG

大多数固定位置<sup>[11]</sup>自对准方案忽略了陀螺的随机漂移,但是,由于加工工艺、外界噪声等影响,HRG 实际输出信号与理想输出会产生偏差,若不进行补偿,将对自对准精度产生一定影响。基于此,本文接下来将利用 HRG 的零偏输出数据建立 HRG 随机漂移的 ARMA 模型,并对其进行补偿,得到带漂移补偿的四位置自对准方案。

### 2.2 HRG 随机漂移 ARMA 模型的建立

在建立 HRG 随机漂移信号的 ARMA 模型前,首先应保证该信号为零均值、平稳、正态时间序列。HRG 的零偏输出信号中往往包含常值分量和随机分量,可通过求取均值来提取常值分量,去掉均值后即 HRG 的随机漂移信号,图 4 为原始输出信号与去均值后的输出信号的对比结果。

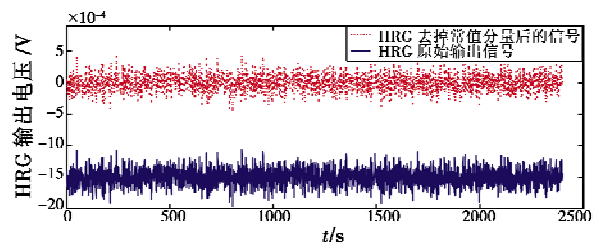


图 4 HRG 原始输出信号与去均值后的输出信号对比图

Fig. 4 The raw output signal and the output signal after mean removal

经数据检验可知,预处理后所得的陀螺仪随机漂移数据为平稳、正态、零均值的随机时间序列,可以采用时间序列分析方法对其建模。考虑到难以获得陀螺仪随机漂移误差的准确数学模型,本文采用试探方法建模,对陀螺仪随机漂移误差分别建立不同阶次的 AR 模型和 ARMA 模型,依据模型残差越小误差模型准确性越高的原则,选取 HRG 的随机漂移误差模型。

设 HRG 随机误差模型为自回归模型——滑动平均 ARMA(n, m),其定义式为

$$x(k) = \sum_{i=1}^n a_i x(k-i) + n(k) - \sum_{j=1}^m b_j n(k-j) \quad (10)$$

式中: n 为 AR 模型阶数; m 为 MA 模型阶数; x(k) 为时间序列信号; n(k) 为白噪声序列; a 为自回归系数; b 为滑动参数。

当 m=0 时,式(10)退化为 n 阶 AR 模型,即

$$x(k) = \sum_{i=1}^n a_i x(k-i) + n(k) \quad (11)$$

当 n=0 时,式(10)退化为 m 阶 MA 模型,即

$$x(k) = - \sum_{j=1}^m b_j n(k-j) \quad (12)$$

对于不同系统产生的随机序列,可采用不同的模型来描述,应用时,误差模型通常在 AR(1), AR(2), AR(3), ARMA(1,1) 和 ARMA(2,1) 中进行选择。利

用建模与参数识别方法,以经过数据预处理的 HRG 随机漂移信号作为模型的时间序列输入信号,分别确定出 AR(1),AR(2),AR(3)模型的自回归系数以及 ARMA(1,1)和 ARMA(2,1)模型的自回归滑动系数。根

据模型残差值越小模型准确度越高的原则(即模型对信号的拟合效果越好),从所建立的 5 种误差模型中选取残差最小的模型(见表 1),作为该陀螺仪随机漂移误差的最终模型。

表 1 各误差模型输出的均值和残差

Table 1 The mean and residual error model

模型	AR(1)	AR(2)	AR(3)	ARMA(1,1)	ARMA(2,1)
均值	1.49913E-4	1.49913E-4	1.49913E-4	1.49913E-4	1.49913E-4
残差	3.74098E-7	3.34034E-7	3.54055E-7	2.31482E-8	1.74168E-8

从表 1 中可以看出,ARMA(2,1)模型的残差值最小,因此,可以将其作为该陀螺的随机漂移误差模型,最终可以得到其数学表达式为

$$x(k) = 1.011x(k-1) - 0.044x(k-2) + n(k) - 0.884n(k-1) \quad (13)$$

式中: $x(k)$ 为 ARMA(2,1)模型的输出,即估计模型的时间序列; $n(k)$ 为白噪声序列。

### 2.3 带随机漂移补偿的四位置自对准方案

实际应用中,陀螺往往存在零位偏差(零偏),而零偏重复性是衡量 HRG 的零偏受环境因素变化的影响大小的重要指标,其计算式为

$$\bar{D}_r = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\hat{D}_{0i} - \bar{D}_0)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

式中: $\hat{D}_{0i}$ 为第  $i$  次测试的零偏; $\bar{D}_0$ 为  $n$  次零偏测试均值。

表 2 HRG 零偏及其重复性测试结果

Table 2 The test results of HRG zero bias and repeatability

指标	1	2	3	4	5	6
零偏( $^{\circ} \cdot s^{-1}$ )	1.46475E-04	1.45125E-04	1.47284E-04	11.47526E-04	1.49037E-04	1.41178E-04
零偏重复性	2.73417E-06					

由表 2 可知,HRG 零偏重复性为 2.73417E-06,说明 HRG 的常值漂移较稳定(达十万分之一的精度),因此,在实际应用中可以忽略常值漂移的变化,通过零位补偿或利用对称相消的方法,提高陀螺的使用精度。利用 2.2 节中建立的 HRG 随机误差模型,对 HRG 输出信号进行滤波,得到带随机漂移补偿的四位置自对准算式为

$$\theta_x = \arctan \frac{U_{e(0)_x} - U_{e(180)_x}}{U_{e(90)_x} - U_{e(270)_x}} \quad (15)$$

式中, $U_{e(n)_x}$ ( $n=0,90,180,270$ )为  $X$  轴 HRG 在平台 4 个位置的带随机漂移补偿的输出信号。

同样,对于  $Y$  轴有

$$\theta_y = \arctan \frac{U_{e(0)_y} - U_{e(180)_y}}{U_{e(90)_y} - U_{e(270)_y}} \quad (16)$$

## 3 试验验证

受实验条件所限,本实验中 HRG 精度较低,用转台试验进行分析,以论证该自对准方案的正确性和有效性。实验室所在的地理纬度为  $34.2511^{\circ}$ ,试验使用的 HRG 零偏稳定性为  $0.1 (^{\circ})/h$ ,标度因数为  $19.3683(V/(\text{rad} \cdot s^{-1}))$ 。

将 HRG 放置在角位置分辨率为  $0.36''$  的双轴转台上,HRG 敏感轴与水平轴平行,以敏感地速在水平面

内的分量,初始位置固定在转台的  $0^{\circ}$  位置(此位置实际初始方位角为  $9.89625^{\circ}$ )。设置采样频率为  $2 \text{ Hz}$ ,每个位置采样时间为  $1 \text{ min}$ ,采样结束后,沿垂直于陀螺输入轴方向以角速率  $10 (^{\circ})/s$ (转台在该角速率下的锁定精度优于  $3''$ )使转台旋转至其余位置,采集陀螺的输出数据。利用陀螺一次通电漂移小于逐次通电漂移的特点,每次在相同条件下连续进行 6 组测试,取经过滤波补偿后各位置的输出电压均值作为解算条件,得到最终自对准结果,与实际初始方位角进行比较,得到各方案的对准精度,结果如表 3 所示。

表 3 HRG 单次通电方位角解算值

Table 3 The azimuth calculating values of

HRG single power

( $^{\circ}$ )

次数	二位置	四位置	四位置(带漂移补偿)
1	10.4412	10.0238	10.7211
2	11.3541	11.1193	10.7955
3	10.2790	10.1706	9.59304
4	10.1908	10.4082	10.0576
5	9.62624	9.95132	9.82444
6	10.4680	10.2221	9.96334
均值	10.3932	10.3159	10.15917

由表 3 可知,带漂移补偿的四位置自对准方案的对准精度(各位置的估计均值减去实际初始方位角)明显优于忽略随机漂移的二位置及四位置自对准方案。

## 4 结束语

本文从分析传统的二位置自对准方案出发,设计了带漂移补偿的HRG平台四位置自对准方案,对HRG随机漂移建立ARMA(2,1)模型,并进行滤波处理。实验结果表明,该方案的对准时间与忽略随机漂移的四位置自对准方案相当,而对准精度明显优于传统的二位置及四位置自对准方案,由此可见,该自对准方法的对准精度相对传统的二位置和四位置方案有较大提高,具有很好的工程价值和应用前景。

### 参考文献

- [1] ROZELLE D M. The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets[J]. *Spaceflight Mechanics*, 2009, 134:1157-1178.
- [2] 任顺清,赵洪波. 半球谐振子密度分布不均匀对输出精度的影响[J]. *中国惯性技术学报*, 2011, 19(3):364-368. (REN S Q, ZHAO H B. Influence of density error of hemispherical resonator on output accuracy of gyro[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(3):364-368.)
- [3] 曹渊,张士峰,杨华波,等. 一种新的惯性平台快速连续旋转自对准方法[J]. *兵工学报*, 2011, 32(12):1469-1473. (CAO Y, ZHANG S F, YANG H B, et al. Fast self-alignment method for inertial platform through continuous rotation[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(12):1469-1473.)
- [4] 王荣颖,许江宁,卞鸿巍. 基于可观性分析的方位旋转式惯导初始对准仿真研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2009, 17(1):15-19. (WANG R Y, XU J N, BIAN H W. Initial alignment of azimuth rotating GINS based on observability analysis[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2009, 17(1):15-19.)
- [5] 宫海涛. 惯性导航系统的初始对准方法及实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012. (GONG H T. Initial alignment methods of inertial navigation system and experiment[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [6] 蒋庆仙,马小辉,陈晓璧,等. 光纤陀螺寻北仪的二位置寻北方案[J]. *中国惯性技术学报*, 2006, 14(3):1-5. (JIANG Q X, MA X H, CHEN X B, et al. North determining scheme by two-position for a FOG north seeker[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2006, 14(3):1-5.)
- [7] EDUARDO S R, VLADIMIR A N. Comparison between two basic schemes in function of the true earth's north detection [C]//Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 2006:315-318.
- [8] 郝燕玲,张义,孙枫,等. 单轴旋转式捷联惯导方位对准研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 32(2):309-315. (HAO Y L, ZHANG Y, SUN F, et al. Analysis of single-axial rotation SINS azimuth alignment[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 32(2):309-315.)
- [9] ULRICH M. Estimation of useful and disturbing signals in inertial systems alignment [C]//Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Germany, 2000:205-228.
- [10] 汪立新. 半球谐振陀螺惯性系统[M]. 西安:西北工业大学出版社,2012. (WANG L X. The inertial system of HRG [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2012.)
- [11] 曲从善,夏克寒,许化龙,等. 导弹快速自瞄准方法及仿真研究[J]. *兵工学报*, 2009, 30(4):467-470. (QU C S, XIA K H, XU H L, et al. Research on auto-collimation method and simulation for ballistic missile[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(4):467-470.)
- (上接第18页)
- [11] 孟艳,汪晋宽,宋昕,等. 基于子空间跟踪和卡尔曼滤波的半盲多用户检测[J]. *信号处理*, 2008, 24(3):464-466. (MENG Y, WANG J K, SONG X, et al. Semi-blind multiuser detection based on subspace tracking and Kalman filter[J]. *Signal Processing*, 2008, 24(3):464-466.)
- (上接第28页)
- [3] 于海南,赵保军. 低信噪比红外图像小目标的检测[J]. *激光与红外*, 2004, 34(1):40-42. (YU H N, ZHAO B J. Detection of small targets of low SNR infrared images[J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(1):40-42.)
- [4] 徐建军,高山,毕笃彦,等. 一种新的图像分割算法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2011, 38(1):8-15. (XU J J, GAO S, BI D Y, et al. Novel image segmentation algorithm [J]. *Journal of Xidian University*, 2011, 38(1):8-15.)
- [5] 杜峰,施文康,邓勇,等. 一种快速红外图像分割方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, 24(3):370-372. (DU F, SHI W K, DENG Y, et al. Fast infrared image segmentation method [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 24(3):370-372.)
- [6] 王润生. 图像理解[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1995. (WANG R S. Image understanding [M]. Changsha: Publishing House of National University of Defense Technology, 1995.)