

# 基于 UPF 的半球谐振陀螺平台自对准技术研究

陈伟,刘洁瑜,田颖,李灿

(第二炮兵工程大学 控制工程系,陕西 西安 710025)

**摘要:**针对静基座条件下大方位失调角时,平台自对准回路存在严重非线性问题,设计了一种基于无迹粒子滤波技术的半球谐振陀螺平台自对准方案,并进行了数值仿真和转台试验验证。结果表明,此方法可缩短对准时间,具有算法简单,实用性强,对准精度高等特点,为半球谐振陀螺在平台中的应用进行了探索。

**关键词:**半球谐振陀螺(HRG)惯性平台;静基座;无迹粒子滤波;自对准技术;大方位失调角

中图分类号:V241.5

文献标识码:A

## Research of Self-alignment Technique for the HRG Initial Platform Based on Unscented Particle Filter

CHEN Wei, LIU Jieyu, TIAN Ying, LI Can

(Dept. of Control Engineering, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In order to address the problem of the severe non-linearity in the self-alignment loop of the platform when the large angle misalignment exists on the stationary base, a new large angle self-alignment algorithm of HRG is designed based on the unscented particle filter (UPF), and the numerical simulation and rotating platform simulation have been carried out. The results show that the superiority of this algorithm which made a contribution to the application of the HRG to the initial platform will be demonstrated through theoretical analysis, digital simulation and experimental results.

**Key words:** HRG initial platform; stationary base; unscented particle filter; self-alignment technique; large angle misalignment

### 0 引言

半球谐振陀螺(HRG)是一种基于哥氏效应的无转动部件的陀螺仪,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已作为成品在飞机导航设备、宇宙飞船和卫星上得到较广泛应用<sup>[1]</sup>,显示出广阔的应用前景。在国内,对HRG的研究主要集中在提高器件性能<sup>[2]</sup>,对HRG在惯性平台上的应用方面研究则相对较少,其中,HRG平台自对准的研究报道较少。

目前,研究惯性导航平台自对准实现方法较多<sup>[3-5]</sup>,但大多是在假定方位失调角为小角度条件下,基于线性的误差方程推导出来的。当方位失调角较大时,非线性因素对误差模型有较大影响<sup>[6]</sup>,造

成较大的对准误差<sup>[7]</sup>。本文提出了一种基于无迹粒子滤波(UPF)的HRG平台两位置自对准方法,根据平台在2个位置稳定时加速度计和HRG的输出信号,建立HRG平台自对准误差模型,运用UPF滤波方法解决了大方位失调角时自对准方位角的估算问题,得到2个水平失调角和大方位失调角的最优估计值,并与扩展卡尔曼滤波器滤波方法进行比较。

### 1 HRG平台两位置自对准方案设计

#### 1.1 HRG平台惯导系统误差模型

设计平台的自对准方案时,应首先建立平台的输出误差模型,本文采用文献[8]中给出的HRG平台误差模型:

收稿日期:2015-01-04

基金项目:总装探索研究基金资助项目(2010TC4303)

作者简介:陈伟(1990-),男,四川遂宁人,硕士生,主要从事半球谐振陀螺平台自对准技术研究。刘洁瑜(1970-),女,广东增城人,教授,博士生导师,主要从事惯性制导技术与惯性测试系统的研究。

$$\begin{cases} U_x/k_x = \omega_{ie} \cos L \sin A + \eta_{yx} \omega_{ie} \cos L \cos A + \eta_{zx} \omega_{ie} \sin L + \dot{D}_{x0} + h_{x0}^A(A) \\ U_y/k_y = \omega_{ie} \cos L \cos A + \eta_{xy} \omega_{ie} \cos L \sin A + \eta_{zy} \omega_{ie} \sin L + \dot{D}_{y0} + h_{y0}^A(A) \\ U_z/k_z = \omega_{ie} \sin L + \eta_{xz} \omega_{ie} \cos L \sin A + \eta_{yz} \omega_{ie} \cos L \cos A + \dot{D}_{z0} + h_{z0}^A(A) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $U_x, k_x, A, \eta_{ij}, h_{i0}^A (i=x, y, z)$  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。

$$\begin{cases} N_x/K_{1x} = K_{x0} + A_x + K_{yx}A_y + K_{zx}A_z \\ N_y/K_{1y} = K_{y0} + A_y + K_{xy}A_x + K_{zy}A_z \\ N_z/K_{1z} = K_{z0} + A_z + K_{zx}A_x + K_{yx}A_y \end{cases} \quad (2)$$

式中： $K_{ij} (i, j=x, y, z)$  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。在转台试验和失调角解算过程中，HRG 及加速度计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 惯导平台自对准过程中，确定两个相差  $90^\circ$  的点位<sup>[9]</sup>，根据北向陀螺的规律性漂移历次标定结果曲线的重复性，选择两个相位差为  $90^\circ$ ，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，可按照以下原则选择最佳点对：当存在 2 个或 2 个以上相位差，即  $\theta \in [90^\circ - \delta, 90^\circ + \delta]$ ，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  $\delta$  由转动定位精度确定，一般情况下满足  $\delta < 6'$ ， $\sigma_{x_i}$  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得到证明。

### 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，断开东向和北向 2 个水平轴的控制，使 2 个水平轴稳定于惯性空间，只对方位轴 HRG 施加指令电压，使 HRG 惯导平台方位轴始终跟踪地速，从而达到方位轴稳定。而后，将平台台体转动到选定点的第一个位置。在平台完成第一个位置的测试后，不对东向和北向 HRG 通道施加指令电压，只在方位 HRG 上施加指令电压，使平台转到选点的第二个位置，并进行相关数据的采集。HRG 惯导平台自对准结构如图 1 所示。

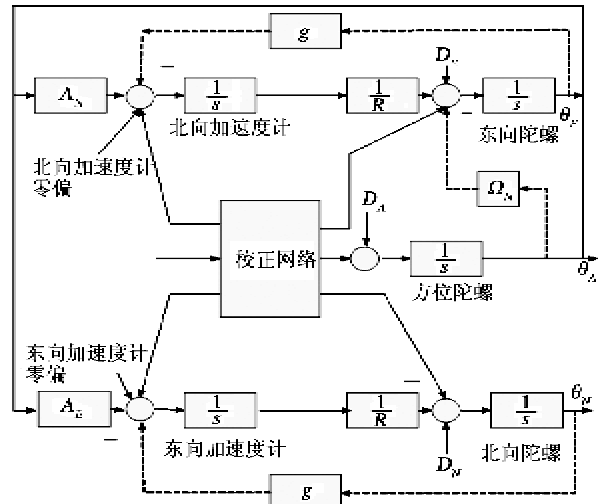


图 1 HRG 平台自对准结构框图

假定完成水平对准后，平台坐标系与地理坐标系之间的水平误差角为小角度，方位误差角未知（不一定为小角度），此时，平台坐标系与地理坐标系的坐标转换矩阵为

$$T_{ep} = \begin{bmatrix} 1 & \theta_E & -\theta_A \\ -\theta_E & 1 & \theta_N \\ \theta_A & -\theta_N & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中下标 E、N、A 分别代表东向、北向和天向。方位失调角  $\theta_A$  与估算方位角  $\theta_C$  的关系如图 2 所示。图中  $\theta_{AP}$  为平台方位角。

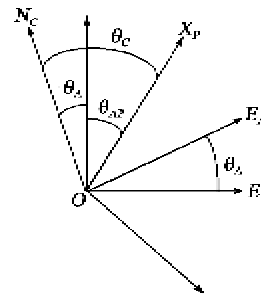


图 2  $\theta_A$  与  $\theta_C$  关系

为简化描述，假定  $\theta_C = 0$ ，此时，平台坐标系与地理坐标系间的失调角变化率为

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_N \\ \dot{\theta}_E \\ \dot{\theta}_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_N \\ D_E \\ D_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (1 + \delta k_z) \omega_{ie} \sin L \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_{ie} \cos L \\ \omega_{ie} \sin L \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \theta_E & -\theta_A \\ -\theta_E & 1 & \theta_N \\ \theta_A & -\theta_N & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $D_N, D_E, D_A$  分别为平台上北向、东向和方位 HRG 的随机漂移;  $\theta_N, \theta_E, \theta_A$  分别为北向、东向和方位轴的失调角。

在平台测漂期间, 可将  $\theta_k (k = E, N, A)$  视为常数, 并分别记为  $D'_k (k = E, N, A)$ , 则有

$$\begin{bmatrix} D'_N \\ D'_E \\ D'_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_N \\ D_E \\ D_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (1 + \delta k_z) \omega_{ie} \sin L \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_{ie} \cos L \\ \omega_{ie} \sin L \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \theta_E & -\theta_A \\ -\theta_E & 1 & \theta_N \\ \theta_A & -\theta_N & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(5)、(6)可得水平轴失调角及方位失调角的解析值:

$$\begin{cases} \theta_N = D_N + D_E \Omega \sin L \\ \theta_E = D_E - D_N \Omega \cos L \\ \theta_A = \frac{D'_E - D_E}{\omega_{ie} \cos L} + \theta_N \tan L \end{cases} \quad (7)$$

式中  $L$  为发射点纬度。只需求出  $\theta_N, D'_E, D_E, D_N$  就可算出水平失调角和方位失调角。

#### 1.4 失调角的解算

由  $\dot{\theta}_k (k = E, N, A)$  与  $D'_k (k = E, N, A)$  的关系可得

$$\begin{cases} D'_N = D_N - \omega_{ie} \cos L + \omega_{ie} \sin L (\theta_{E0} + \int_0^t D'_E d\tau) \\ D'_E = D_E + \theta_A \omega_{ie} \cos L - \omega_{ie} \sin L (\theta_{N0} + \int_0^t D'_N d\tau) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_E(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -gt & \frac{-(\omega_{ie} t \sin L)^3}{6} & \frac{-gt^2}{2} \\ gt & 0 & \frac{gt^2}{2} & \frac{-(\omega_{ie} t \sin L)^3}{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{N0} \\ \theta_{E0} \\ D'_{N0} \\ D'_{E0} \end{bmatrix} \quad (13)$$

利用加速度输出, 可解算出初始失调角  $\theta_{N0}, \theta_{E0}$  和  $D'_{N0}, D'_{E0}$ 。此时, 北向 HRG 的漂移可以精确求出:

$$D_N = D'_{N0} + \omega_{ie} \cos L - \theta_{E0} \sin L \quad (14)$$

然而, 东向 HRG 的漂移:

$$D_E = D'_{E0} - \theta_A \omega_{ie} \cos L + \theta_{N0} \sin L \quad (15)$$

由于  $\theta_A$  未知, 因此无法求出。由此可见, 一个位置是不能实现自对准的, 此时, 如果利用 HRG 平台绕其方位轴逆时针转动  $90^\circ$  到所选择的第二个位置, 使得原来的东向 HRG 指向变为北向, 而原来的北向 HRG 指向变为东向, 则可采用同样的方法来标定原来的东向 HRG 的漂移。利用式(7)可求得第二位置的方位失调角为

$$(\theta_A)_2 = \frac{(D'_{N0})_2 - (D_N)_2}{\omega_{ie} \cos L} + (\theta_{N0})_2 \tan L \quad (16)$$

式中  $\theta_{E0}$  和  $\theta_{N0}$  为平台水平轴初始失调角。令  $D'_{N0} = D_N - \omega_{ie} \cos L + \theta_{E0} \omega_{ie} \sin L, D'_{E0} = D_E + \theta_A \omega_{ie} \cos L - \theta_{N0} \omega_{ie} \sin L$ , 代入式(8)可得

$$\begin{cases} D'_N(t) = D'_{N0} + D'_{E0} \omega_{ie} t \sin L - D'_{N0} (\omega_{ie} t \sin L)^2 / 2 \\ D'_E(t) = D'_{E0} + D'_{N0} \omega_{ie} t \sin L - D'_{E0} (\omega_{ie} t \sin L)^2 / 2 \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可得平台失调角在时域的解析式为

$$\begin{cases} \theta_N(t) = \theta_{N0} + D'_{N0} t - D'_{E0} (\omega_{ie} t \sin L)^2 / 2 \\ \theta_E(t) = \theta_{E0} + D'_{E0} t + D'_{N0} (\omega_{ie} t \sin L)^2 / 2 \end{cases} \quad (10)$$

此时, HRG 平台上的加速度计敏感到的重力分量为

$$\begin{cases} A_N = -g \sin \theta_E \cong g \theta_E \\ A_E = -g \sin \theta_N \cong g \theta_N \end{cases} \quad (11)$$

将式(10)代入式(11), 并对加速度积分得到北向和东向速度分量:

$$\begin{cases} v_N(t) = -g \theta_{E0} t - D'_{E0} t^2 g / 2 - D'_{N0} (\omega_{ie} t \sin L)^3 g / 6 \\ v_E(t) = -g \theta_{N0} t + D'_{N0} t^2 g / 2 - D'_{E0} (\omega_{ie} t \sin L)^3 g / 6 \end{cases} \quad (12)$$

令  $v = [v_N, v_E]^T$  为状态观测量, 其矩阵形式为

此时, 估算出的第二位置的初始方位角为

$$(\theta_{AP})_2 = (\theta_C)_2 - (\theta_A)_2 + \pi / 2 \quad (17)$$

式中  $\theta_C$  为平台方位角的初略估算值(不一定为小角度)。

第一位置的方位失调角为

$$(\theta_A)_1 = \frac{(D'_{E0})_1 - (D_E)_1}{\omega_{ie} \cos L} + (\theta_{N0})_1 \tan L \quad (18)$$

则第一位置平台的初始方位角为

$$(\theta_{AP})_1 = (\theta_C)_1 - (\theta_A)_1 \quad (19)$$

由式(17)、(19)可得初始方位角更为精确结果:

$$(\theta_{AP})_{\text{均值}} = \frac{(\theta_{AP})_1 + (\theta_{AP})_2}{2} \quad (20)$$

此时, 利用式(15)东向 HRG 的漂移可精确求出。另外, 由式(7)知, 东向 HRG 的漂移对方位角的估算影响较大, 如果利用 2 个位置测得东向 HRG

的漂移结果,则可求得东向 HRG 的规律性漂移:

$$H_{Ez} = (D_E)_z - (D_E)_1 \quad (21)$$

将该值与东向 HRG 漂移标定的历次值进行比较,还可达到对东向 HRG 漂移历次标定值进行检验的目的。

## 2 UPF 滤波器的设计

在实验室条件下,平台自对准外部环境相对理想,而实际情况是加速度计和 HRG 的输出中含有较大的噪声和干扰,此外,振动等因素也会对其产生影响,在这种情况下需进行滤波处理。运用 UPF 滤波算法,并与常用的 EKF 滤波进行对比。UPF 滤波具体方法如下:对于粒子滤波算法,粒子数匮乏是其主要缺陷。

Doucet 从理论上证明了粒子滤波算法出现粒

$$\begin{bmatrix} v_N(k) \\ v_E(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -g\tau k & -(\omega_z \tau k \sin L)^3/6 \\ g\tau k & 0 & g(\tau k)^2/2 \end{bmatrix}$$

采用 UPF 滤波算法时,非线性系统的模型为

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, u_k, v_k) \\ y_k = h(x_k, n_k) \end{cases} \quad (24)$$

式中,该非线性系统状态的马尔科夫过程概率密度分布  $P(x_k | x_{k-1})$  由  $f(\cdot)$  和观测噪声分布  $P(v_k)$  决定;观测向量的概率密度分布  $P(y_k | x_k)$  由  $h(\cdot)$  和观测噪声分布  $P(n_k)$  决定。

假设初始状态变量  $x_0 \sim P(x_0)$ ,对式(24)的非

$$\begin{cases} \xi_{k,k-1}^{(i)} = f(\xi_{k-1}^{(i)x}, \xi_{k-1}^{(i)v}) \\ \bar{x}_{k,k-1}^{(i)} = \sum_{j=0}^{2N} \omega_j^{(m)} \xi_{j,k-1}^{(i)x} \\ P_{k,k-1}^{(i)} = \sum_{j=0}^{2N} \omega_j^{(m)} [\xi_{j,(k,k-1)}^{(i)x} - \bar{x}_{k,k-1}^{(i)x}] \cdot [\xi_{j,(k,k-1)}^{(i)x} - \bar{x}_{k,k-1}^{(i)x}]^T \\ x_{k,k-1}^{(i)} = h(\xi_{k,k-1}^{(i)x}, \xi_{k,k-1}^{(i)n}) \\ \bar{y}_{k,k-1}^{(i)} = \sum_{j=0}^{2N} \omega_j^{(m)} \chi_{j,(k,k-1)}^{(i)} \end{cases} \quad (25)$$

量测更新为

$$\begin{cases} P_{yy} = \sum_{j=0}^{2N} \omega_j^{(c)} [\chi_{j,(k,k-1)}^{(i)} - \bar{y}_{k,k-1}^{(i)}] \cdot [\chi_{j,(k,k-1)}^{(i)} - \bar{y}_{k,k-1}^{(i)}]^T \\ P_{xy} = \sum_{j=0}^{2N} \omega_j^{(c)} [\xi_{j,(k,k-1)}^{(i)} - \bar{x}_{k,k-1}^{(i)}] \cdot [\chi_{j,(k,k-1)}^{(i)} - \bar{y}_{k,k-1}^{(i)}]^T \\ K_k = P_{xy} P_{yy}^{-1} \\ \bar{x}_k^{(i)} = \bar{x}_{k,k-1}^{(i)} + K_k (y_k - \bar{y}_{k,k-1}^{(i)}) \\ P_k^{(i)} = P_{k,k-1}^{(i)} - K_k P_{yy} K_k^T \end{cases} \quad (26)$$

子数匮乏现象的必然性。因此,将粒子数移至高似然函数区域显得尤为重要,采用无迹粒子滤波技术,对每个粒子进行无迹卡拉曼滤波统计估计,具有比扩展卡尔曼(EKF)滤波更好的估计精度。

在此,首先将式(13)进行离散化,以便能利用滤波算法估计平台失调角。令  $t = \tau k (k=1 \sim N)$ ,  $\tau$  为采样时间,式(13)离散化可得

$$\begin{cases} v_N(\tau k) = -g\theta_{E0} \tau k - D'_{E0} (\tau k)^2 g/2 - D'_{N0} (\omega_z \tau k \sin L)^3 g/6 + \eta_N(k) \\ v_E(\tau k) = -g\theta_{N0} \tau k + D'_{N0} (\tau k)^2 g/2 - D'_{E0} (\omega_z \tau k \sin L)^3 g/6 + \eta_E(k) \end{cases} \quad (22)$$

式中  $\eta_N(k)$  和  $\eta_E(k)$  为实际测试中包含的噪声和干扰,将式(22)写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} v_N(\tau k) \\ v_E(\tau k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g(\tau k)^2/2 \\ -(\omega_z \tau k \sin L)^3/6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{N0} \\ \theta_{E0} \\ D'_{N0} \\ D'_{E0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_N(k) \\ \eta_E(k) \end{bmatrix} \quad (23)$$

线性系统运用无迹粒子滤波算法,步骤如下:

1) 初始化:  $k=0$ 。从初始的前验概率分布  $P(x_0)$  中进行  $N$  个粒子  $x_0^{(i)} |_{i=1}^N$  的采样,即  $x_0^{(i)} \sim p(x_0)$ 。

2) 加权粒子的预测、采样:  $k=1, 2, \dots$ 。利用无迹粒子滤波对粒子进行预测更新并计算 Sigma 点,

$x_k^{(i)} = [\bar{x}_k^{(i)}, \bar{x}_k^{(i)} \pm \sqrt{(N+\lambda) P_k^{(i)}}]$  时间更新为

3) 根据粒子权值修正式

$\omega_k^{(i)} = \omega_{k-1}^{(i)} P(y_k | x_k^{(i)}) P(x_k | x_{k-1}) / q(x_k^{(i)} | y_{1:k-1}, x_{1:k-1})$  对  $N$  个粒子进行相应的权值计算,并根据式  $\hat{\omega}_k^{(i)} = \omega_k^{(i)} [\sum_{i=1}^N \omega_k^{(i)}]^{-1}$  对  $N$  个粒子相应的权值进行归一化。

4) 通过重采样算法计算重采样的粒子及其权值,令

$$x_{1:k}^{(i)} = (x_{1:k-1}^{(i)}, \tilde{x}_k^{(i)}) \quad (27)$$

5) 根据  $x_{1:k}^{(i)} = \sum_{i=1}^N x_{1:k}^{(i)} \hat{\omega}_k^{(i)}$  计算状态变量的最优估计值及每个粒子对应的方差矩阵。

6) 将第 4) 阶段重采样后的粒子  $x_{1:k}^{(i)}$  及第 5) 阶段计算的  $\hat{P}_k^{(i)}$  代入第 2) 阶段进行迭代运算。

### 3 数值仿真及转台试验

#### 3.1 数值仿真

假设系统状态的估计值均为 0,取静基座 HRG 惯导平台系统所处位置的地理纬度为  $45^\circ$ ,令  $\theta_N = \theta_E = 3'$ ,  $\theta_A = 100^\circ$ ,  $D_N = 0.2$  ( $^\circ$ )/h,  $D_A = 0.2$  ( $^\circ$ )/h,  $D_E = 0.1$  ( $^\circ$ )/h,加速度计的零偏为  $10^{-5} g$  ( $g = 9.7966 \text{ mm/s}^2$ ),忽略 HRG 的安装误差,初始状态采样的粒子服从  $p(x_0) \sim N(x_0, P_0)$ ,则

$$P_0 = \text{diag}\{(3')^2, (3')^2, (0.2 \text{ } ^\circ/\text{h})^2, (0.2 \text{ } ^\circ/\text{h})^2\} \quad (26)$$

采用 UPF 技术,令从重要函数采样的加权粒子数  $N=200$ ,对 HRG 惯导平台的自对准算法进行仿真和转台试验验证。仿真结果表明,与 EKF 滤波法相比,用 UPF 滤波法估计  $\theta_N$ 、 $\theta_E$  收敛时间和稳态精度差别不大,由图 3、4 可看出,UPF 滤波法对  $\theta_A$  估计值的收敛时间和滤波精度均优于 EKF 滤波法(见图 5),仿真时间为 200 s。由图 5 可看出,EKF 滤波法对  $\theta_A$  的估计收敛时间约为 160 s,稳态估计误差约为  $7'$ ,而 UPF 滤波法对  $\theta_A$  的收敛时间约为 70 s,稳态估计误差约为  $4'$ ,其滤波效果优于 EKF 滤波法。

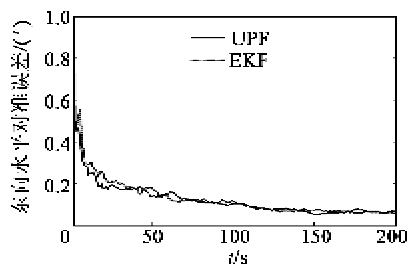


图 3  $\theta_E$  估计曲线

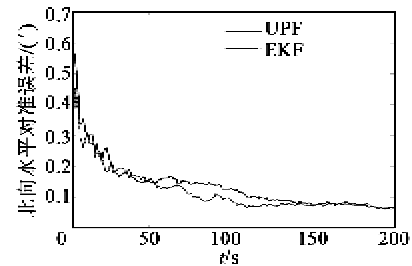


图 4  $\theta_N$  估计曲线

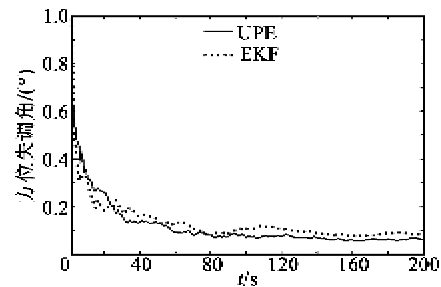


图 5  $\theta_A$  估计曲线

#### 3.2 转台试验仿真

受目前实验条件所限,本实验中 HRG 精度较低,由 HRG 构成的平台精度无法满足自对准要求,这里仅以转台试验仿真为例进行试验分析,以论证该自对准方案的正确性和有效性。结合测试所得数据,利用 UPF 滤波方法和 HRG 平台自对准误差模型,进行转台试验仿真,结果如表 1 所示。由表 1 可看出,当方位失调角为大角度( $\theta_A = 100^\circ$ )时,自对准误差小于  $15'$ ,收敛时间约为 80 s。水平对准误差小于  $1'$ ,收敛时间约为 20 s。由此可见,该自对准方法的自对准精度和收敛速度均满足要求,极大降低了对噪声干扰和地面测试设备的要求,具有一定的工程应用价值。

表 1 基于 UPF 滤波的 HRG 平台自对准仿真结果

测定项目	自对准结果	参考值	误差
$\theta_{Np}/(^\circ)$	100.722	100.545	$\leq 0.25$
$\theta_{E0}/(')$	1.251	1.052	$\leq 1$
$\theta_{N0}/(')$	1.086	1.037	$\leq 1$
$D_N/[^\circ/\text{h}]$	0.136	0.126	$\leq 0.01$
$D_E/[^\circ/\text{h}]$	-0.126	-0.106	$\leq 0.02$

### 4 结束语

本文提出了一种在大方位失调角情况下的基于 UPF 滤波技术的 HRG 平台自对准方法。该方法通过利用 HRG 平台的规律性漂移基本相当的点来消除或减小平台规律性漂移差异引起的自对准误差,既有效减小了 HRG 规律性漂移对平台对准精度的影响,又可利用 HRG 一次通电随机漂移明显

小于逐次通电随机漂移的特性,提高平台自对准精度和 HRG 使用精度。通过仿真和转台试验结果表明,该方法具有较好的动态特性,方位对准时间较传统的 EKF 滤波法降低,且精度更高,其优越性表明将 UPF 滤波技术应用于半球谐振陀螺平台自对准中的有效性和实用性。

#### 参考文献:

- [1] ROZELLE D M. The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets[J]. *Spaceflight Mechanics*, 2009, 134: 1-26.
- [2] 杨勇,胡晓东,谭文跃,等. 基于优化半球陀螺谐振子性能的技术[J]. *压电与声光*, 2014, 36(2): 221-224. YANG Yong, HU Xiaodong, TAN Wenyue, et al. Technology based on optimized HRG resonator performance[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2014, 36(2): 221-224.
- [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 Yuan, ZHANG Shifeng, YANG Huabo, 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. 基于可观测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 Rongying, XU Jiangning, BIAN Hongwei. Initial alignment of azimuth rotating GINS based on observability analysis [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2009, 17(1): 15-19.
- [5] 官海涛. 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.
- [6] JULIER S J, UHLMANN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation [J]. *Proc of the IEEE Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 92(3): 401-422.
- [7] ULRICH M. Estimation of useful and disturbing signals in inertial systems alignment[C]// Stuttgart, Germany: Symposium Gyro Technology Stuttgart, 2000.
- [8] 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, 2011.
- [9] FELKER R L. Seismic simulator for silo constrained missile guidance platform[J]. *The Shock and Vibration Bulletin*, 1975, 11(9): 35-41.

(上接第 1036 页)

#### 参考文献:

- [1] 任伟,李俊红,赵修臣,等. Sol-Gel 法制备 PZT 粉体的工艺研究[J]. *压电与声光*, 2012, 34(3): 446-448. REN Wei, LI Junhong, ZHAO Xiuchen, et al. Study on preparing process of PZT powder by Sol-Gel method[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2012, 34(3): 446-448.
- [2] OISHI K, YONEMARU S, AKAI D, et al. Transient heat transfer analysis of Pb (Zr, Ti) O<sub>3</sub> thin film infrared sensor using finite element model[C]//Ibaraki, Japan: The Irigo Conference 2015, 2015.
- [3] BAGAVATHIAPPAN S, LAHIRI B B, SARAVANAN T, et al. Infrared thermography for condition monitoring-a review [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60: 35-55.
- [4] DONG W, LU X, CUI Y, et al. Fabrication and characterization of microcantilever integrated with PZT thin film sensor and actuator[J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(24): 8544-8548.
- [5] IZHAR L I, PETROU M. Thermal imaging in medicine[J]. *Advances In Imaging and Electron Physics*, 2012, 171: 41-114.
- [6] KHAENAMKAEW P, MUENSIT S, BDIKIN I K, et al. Effect of Zr /Ti ratio on the microstructure and ferroelectric properties of lead zirconate titanate thin films [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2007, 102(2/3): 159-1640.

- [7] JEGATHEESAN P, YADAV H K, GUPTA V, et al. Composition dependent preferential orientation, dielectric and ferroelectric properties of Pb(Zr<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>)O<sub>3</sub> thin films derived by Sol-Gel process [J]. *Materials Letters*, 2011, 65(5): 901-904.
- [8] LAISHRAM R, THAKUR O P. Nanostructured PZT/PT multilayered thin films prepared by Sol-Gel process[J]. *Materials Letters*, 2014, 137: 49-51.
- [9] 王龙海,于军,王耘波,等. PbTiO<sub>3</sub>/PbZr<sub>0.3</sub>Ti<sub>0.7</sub>O<sub>3</sub>/PbTiO<sub>3</sub> 夹心结构铁电薄膜子晶层的优化[J]. *物理学报*, 2008, 57(2): 1207-1213.
- [10] 王宽冒,刘保亭,倪志宏,等. SrRuO<sub>3</sub> 导电层对快速退火制备 Pb(Zr, Ti)O<sub>3</sub> 薄膜结构和性能的影响[J]. *人工晶体学报*, 2010, 39(3): 608-612.
- [11] REN T L, ZHANG L T, LIU L T, et al. Integrated circuits having multilayers comprising silicon dioxide dielectrics, platinum and titanium conductor films, lead titanate and lead zirconate titanate ferroelectrics on semiconductor substrates; high speed capacitors; U. S. Patent, 6507060[P]. 2003-01-14
- [12] REN T L, ZHANG L T, LIU J S, et al. A novel ferroelectric based microphone[J]. *Microelectronic engineering*, 2003, 66(1): 683-687.
- [13] 朱满康,路朋献,侯育冬,等. Raman 散射光谱定量分析铁电陶瓷掺杂诱导相转变现象[J]. *分析测试学报*, 2006, 25(z1): 14-15.