

Initial Alignment of Fiber Optic Gyroscope SINS with Disturbances

Huan Zhang, Xiangyuan Huang, Xuwei Cheng

Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing
Email: lantianyue1999@yahoo.com.cn

Received: Dec. 14th, 2012; revised: Jan. 6th, 2013; accepted: Jan. 14th, 2013

Abstract: The initial alignment of fiber optic gyroscope strap-down inertial navigation system (SINS) for armored vehicles is studied when disturbance are present, for example when the motor is running on or people are walking on the vehicle. First, based on the signal analyses of the SINS inertial instruments, the observation signals were preprocessed by wavelet transform to reduce the interference, and then the adaptive Kalman filter algorithm was improved to increase the stability of alignment. The experimental results show that this technique effectively increases the alignment accuracy with disturbances, and the application value is obvious.

Keywords: Fiber Optic Gyroscope; Wavelet Analysis; Initial Alignment; SINS

光纤陀螺惯导系统扰动条件下的初始对准

张环, 黄湘远, 程旭维

装甲兵工程学院控制系火控室, 北京
Email: lantianyue1999@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012年12月14日; 修回日期: 2013年1月6日; 录用日期: 2013年1月14日

摘要: 针对装甲车辆上在发动机不关闭及有乘员走动、上下车等扰动条件下的光纤陀螺捷联惯导系统(SINS)初始对准技术进行了相关研究。首先通过分析 SINS 惯性元件的信号特征, 基于小波分析理论对观测信号进行降噪预处理, 降低外界干扰的影响; 采用自适应卡尔曼滤波完成精对准过程, 使之具有更好的稳定性。仿真实验表明, 该算法能有效提高扰动基础上的对准稳定性及精度, 具有较大的工程应用价值。

关键词: 光纤陀螺; 小波分析; 初始对准; 捷联惯导系统

1. 引言

初始对准技术是惯性导航系统的关键技术之一, 其目的是得到导航初始姿态矩阵。初始对准的精度直接关系到惯导系统的工作精度, 对准时间直接影响系统的反应时间。目前, 国内外针对 SINS 的静基座对准进行了大量研究, 然而对于扰动情况下的陆用 SINS 高精度对准问题研究得还不够, 这主要与扰动类型繁多、情况复杂有关。文献[1-4]分别针对具体扰动特点研究了对准技术, 解决措施不尽相同且不具有普适性。

随着现代战争对装甲车辆快速反应能力的要求, 力求缩短战斗准备时间, 也即需要在车辆进行装弹、校准等准备工作的同时完成惯导系统的初始对准工作。此时, 车辆上的乘员走动、外界车辆的运动以及车辆发动机启动等情况都不可避免。具体来说, 装甲车辆由于其发动机功率大, 振动剧烈, 会对惯性器件产生严重地高频干扰。同时, 由于乘员活动和装填炮弹等动作也会给惯性器件带来冲击型扰动, 较普通陆用车辆的干扰情况具有其自身的特点。为解决这一问题, 一般的经典滤波器在噪声和有用信号具有不同频

带时,可以使噪声衰减或消除,而当噪声与有用信号频带重叠时,使用频率选择滤波器抑制噪声就遇到困难^[5]。针对这一问题,论文基于小波滤波方法可以由粗到精逐步观察信号以及能够在时、频两域分析信号局部特性的特点,先对惯性器件测量信号进行小波强制降噪,再对降噪信号中的脉冲型噪声采用小波域中值滤波进行处理,降低各种干扰对对准精度的影响;为使对准过程具有更好的稳定性,通过自适应卡尔曼滤波算法完成精对准过程。笔者通过仿真实验对文中所提方案进行了验证。

2. 扰动条件下 SINS 信号特征及预处理

为了研究装甲车辆上捷联惯导系统实际工作环境中的初始对准技术,首先需明确各种干扰的信号特征以便进行数据处理。

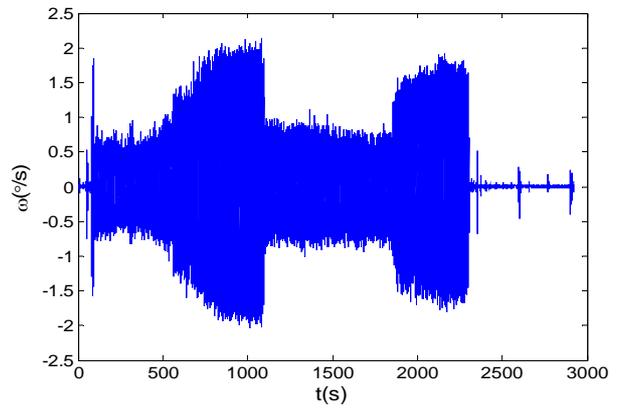
实验采用由光纤陀螺和石英加速度计组成的捷联惯导系统,安装于某型主战坦克炮塔轴线位置,该坦克停在平坦水泥地面。开始时刻,发动机静止,一段时间后启动发动机,保持在不同怠速一段时间,之后关闭发动机继续采集数据。其间,由于人员对车辆进行相关操作,涉及到人员走动及上下车的动作。数据采集频率为 200 Hz,设定车辆转动怠速大小关系为:怠速 2 > 怠速 4 > 怠速 3 > 怠速 1。

2.1. 含噪信号特征分析

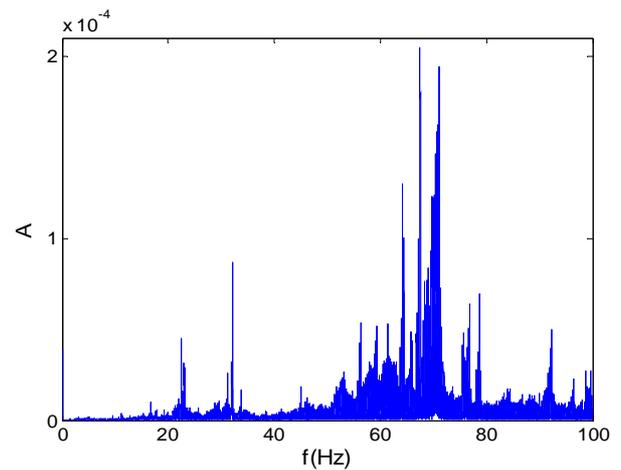
图 1 为 x 轴陀螺测量信号的时频域分析图。图 1(a)表明,发动机转动时陀螺输出信号的幅度明显大于发动机关闭状态下信号的幅值,并且发动机的怠速越高,陀螺输出信号的幅值越大。发动机关闭时,理想情况下陀螺输出信号为低频直流信号,但由于开关车门、人员走动、装填炮弹等影响会产生脉冲扰动,在陀螺输出信号中反映为突变噪声。图 1(b)表明,真实使用条件下,电机、发动机、变速箱工作产生的振动是一种典型的高频基座扰动,振动频率在 20 Hz 以上,高频基座扰动对陀螺输出造成很大的影响。

2.2. 小波降噪

小波分析是上世纪八十年代后期发展起来的一个新的数学分支,它作为一种时频分析工具,具有良好的时域和频域的局部化特性,被誉为数学显微镜。



(a) 输出特性



(b) 频率特性

Figure 1. The time-frequency domain figure of the x gyro signal
图 1. x 陀螺的测量信号时频分析图

真实信号和随机噪声在小波域中有不同的性态表现,它们的小波系数幅值随尺度变化的趋势不同。随着尺度的增加,噪声系数的幅值很快衰减为零,而真实信号系数的幅值基本不变。小波滤波,就是利用具体问题的先验知识,根据信号和噪声的小波系数随尺度变化的特性,构造相应规则,对含噪信号的小波系数进行处理。处理实质在于减小甚至完全剔除由噪声产生的系数,最大限度地保留真实信号的系数,最后进行相应重构,得到真实信号的最优估计。

由于小波变换是线性的,所以含噪信号的小波变换等于信号的小波变换与噪声的小波变换之和。基于这一特点,一维信号的降噪过程可分为以下步骤^[6,7]:

- 1) 选择小波基并确定分解尺度 N,进行信号的 N 尺度小波分解;
- 2) 选择适当的阈值对各尺度高频系数进行阈值

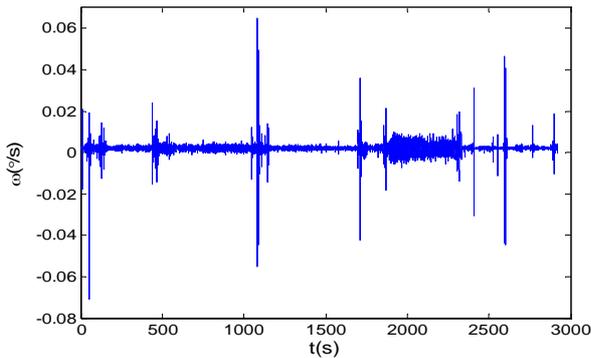
量化处理;

3) 根据小波分解的低频系数和经过量化处理后高频系数进行小波重构。

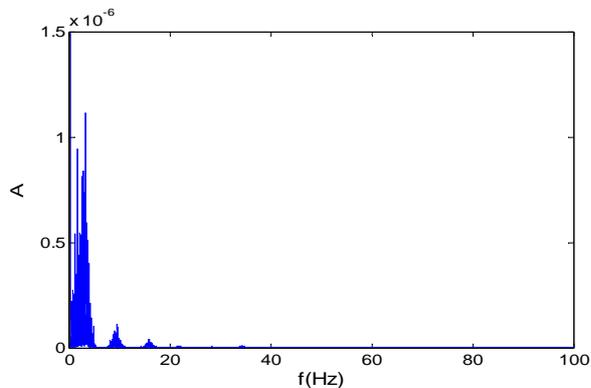
小波基和尺度的选取方法^[8]: 初步选定几个备选小波基, 进行不同尺度分解和滤波, 通过计算重构信号与原始信号的均方差来确定小波基和分解尺度。通过比较, 本文选用 sym4 小波基, 分解尺度选为 5。

小波降噪过程中, 关键问题的是如何进行阈值的选取和阈值量化处理, 它直接关系到滤波结果的好坏。通过前面对实际信号的特征分析可知, 理想情况下陀螺输出为低频直流信号。由于高频成分影响的是小波分解的细节信号, 因此可以认为高频扰动下的小波系数是由噪声产生的, 把小波系数全部置零, 然后与低频分量一起重构原信号, 相当于对信号进行逐级低通滤波, 可以很好地达到去噪目的, 这种方法称为强制滤波。

图 2 为小波强制降噪后信号的时频分析图, 可以看出, 对由车辆发动引入的高频动态扰动采用小波强



(a) 降噪信号



(b) 频率特性

Figure 2. The time-frequency domain figure of the signal by wavelet compulsory de-noising
图 2. 小波强制降噪后信号时频分析图

制滤波可以取得很好的降噪效果。然而小波强制降噪后信号仍含有脉冲噪声, 结合数据采集过程可知, 这些脉冲信号是改变发动机状态或怠速、或人员上下车等人为操作造成的冲击脉冲, 针对此类噪声可在小波强制降噪后再经小波域中值滤波的方法解决。

2.3. 小波中值滤波

中值滤波是一种非线性的噪声处理方法, 由图基在 1971 年提出。基本原理是把数字序列中一点的值用该点的一个邻域内各点值的中值来代替。中值的定义如下:

$$y = \begin{cases} x_{i((n+1)/2)}, & n \text{ 为奇数} \\ \frac{x_{i(n/2)} + x_{i(n/2+1)}}{2}, & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (1)$$

中值滤波器是基于次序统计完成信号恢复的一种典型的非线性滤波器, 它可以有效地去除脉冲型噪声, 而且对信号的边缘有较好的保留。但它也有其固有的缺陷, 尤其对一些细节多的信号不易采用中值滤波法, 否则会损失许多细节。因陀螺输出信号为低频直流分量并不含有细节分量, 此时应用中值滤波器是恰当的^[9,10]。

将中值滤波器应用到小波域, 对低频的尺度系数采用中值滤波器。由于小波域中值滤波利用了正交小波变换下的采样特性, 可以解决陀螺输出信号中的脉冲窗口较大, 一般中值滤波器不会取得较好效果这一问题。文中滤波器的窗口大小 n 选为 11。图 3 所示为经强制滤波和小波中值滤波后的信号输出及其频谱, 可见, 脉冲噪声进一步减小。

3. 自适应卡尔曼滤波初始对准

实现捷联惯导系统初始对准的一种有效方法是采用卡尔曼滤波技术, 而传统卡尔曼滤波存在的一个不足是需要已知被研究对象的数学模型和噪声统计特性。在实际扰动条件下的对准应用中, 惯性仪表输出信号中包含多种噪声, 除仪表自身漂移外, 还包含各种与使用环境密切相关的干扰信号, 很难建立系统噪声和量测噪声的理想模型, 为此可以采用自适应卡尔曼滤波算法, 用于解决由系统模型线性化误差、干扰噪声、噪声统计误差和计算舍入误差等造成滤波器容易发散的问题, 使对准过程更加稳定。自适应卡尔

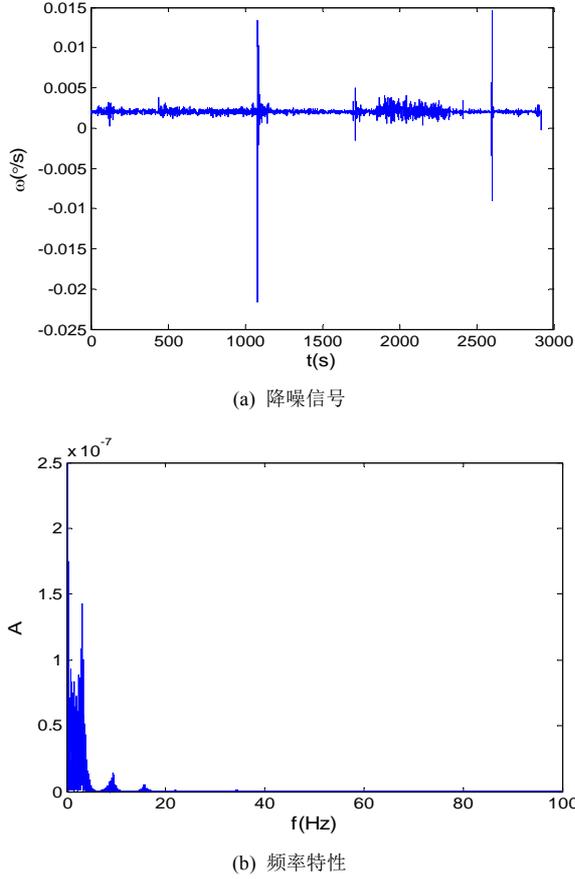


Figure 3. The time-frequency domain figure of the signal by wavelet domain median filter ($n = 11$)
图 3. 小波中值滤波后信号的时频分析图($n = 11$)

曼滤波方程为^[11-13]:

$$\begin{aligned}
 \hat{\mathbf{X}}_{k+1} &= \Phi_{k+1,k} \hat{\mathbf{X}}_k + \mathbf{K}_{k+1} \tilde{\mathbf{Z}}_{k+1} \\
 \tilde{\mathbf{Z}}_{k+1} &= \mathbf{Z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \Phi_{k+1,k} \hat{\mathbf{X}}_k \\
 \mathbf{P}_{k+1,k} &= \Phi_{k+1,k} \mathbf{P}_k \Phi_{k+1,k}^T + \hat{\mathbf{Q}}_k \\
 \mathbf{K}_{k+1} &= \mathbf{P}_{k+1,k} \mathbf{H}_{k+1}^T \left[\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1,k} \mathbf{H}_{k+1}^T + \hat{\mathbf{R}}_k \right]^{-1} \\
 \mathbf{P}_{k+1} &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}] \mathbf{P}_{k+1,k} \\
 \hat{\mathbf{R}}_{k+1} &= (1-d) \hat{\mathbf{R}}_k + d \left[\tilde{\mathbf{Z}}_{k+1} \tilde{\mathbf{Z}}_{k+1}^T - \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1,k} \mathbf{H}_{k+1}^T \right] \\
 d &= (1-b) / (1-b^{k+1})
 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, b 为遗忘因子, $0 < b < 1$ 。采用遗忘因子可以限制滤波器的记忆长度, 增加新息的利用率, 加重新测数据对当前估计的作用。该滤波器能够对量测噪声的统计值 $\hat{\mathbf{R}}$ 进行适应更新, 其选择必须在对时变参数的跟踪性能与噪声的不敏感性之间进行考虑。

4. 仿真实验

为对比小波降噪及自适应卡尔曼滤波在扰动基座下初始对准过程的作用, 截取图 1 中发动机以固定怠速运转时的一段数据, 基于原始数据采用卡尔曼滤波、自适应卡尔曼滤波以及基于小波滤波数据的自适应卡尔曼滤波方法进行离线对准仿真。

导航坐标系采用东北天地理坐标系, 系统状态设置为:

$$\mathbf{X} = (\delta V_E, \delta V_N, \Phi_E, \Phi_N, \Phi_U, \nabla_x, \nabla_y, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)^T$$

由于坦克停止, 其理想线速度为零, 故系统观测量可取为水平速度误差, 即: $\mathbf{Z}_k = [\delta V_E, \delta V_N]^T$ 。

离散化的系统方程和量测方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1} = \Phi_{k+1,k} \mathbf{X}_k + \mathbf{W}_k \\ \mathbf{Z}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \end{cases} \quad (3)$$

其中, \mathbf{W}_k 为系统噪声阵, \mathbf{V}_k 为量测噪声阵, 二者是相互独立的白噪声序列, 且

$$\text{Var}[\mathbf{W}_k, \mathbf{W}_k] = \mathbf{Q}, \text{Var}[\mathbf{V}_k, \mathbf{V}_k] = \mathbf{R}$$

滤波方程的初始条件如下式所示。

自适应滤波器中遗忘因子 b 取 0.95。对准过程中, 车辆所处的纬度为 39.8040° (由 GPS 提供)。基于原始数据采用常规卡尔曼滤波(KF)、自适应卡尔曼滤波(AKF)以及基于小波滤波之后的数据采用自适应卡尔曼滤波(Wave-AKF)方法进行离线对准仿真, 结果如图 4 和图 5。

由图 4 可以看出, 三种方案对水平姿态角的估计

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X}(0) &= [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T \\
 \mathbf{P}(0) &= \text{diag} \left\{ (0.1 \text{ m/s})^2, (0.1 \text{ m/s})^2, (1^\circ)^2, (1^\circ)^2, (1^\circ)^2, (0.1 \text{ mg})^2, (0.1 \text{ mg})^2, (0.1^\circ/\text{h})^2, (0.1^\circ/\text{h})^2, (0.1^\circ/\text{h})^2 \right\} \\
 \mathbf{Q}(0) &= \text{diag} \left\{ (0.05^\circ/\text{h})^2, (0.05^\circ/\text{h})^2, (0.05^\circ/\text{h})^2, (50 \mu\text{g})^2, (50 \mu\text{g})^2, 0, 0, 0, 0, 0 \right\} \\
 \mathbf{R}(0) &= \text{diag} \left\{ (0.01 \text{ m/s})^2, (0.01 \text{ m/s})^2 \right\}
 \end{aligned}$$

过程都能收敛,但当使用未经预处理的惯性仪表输出数据对准时,水平角的估计过程振荡幅度较大。如若恰在较大振荡处结束对准,则不能保证对准结果的可信度。对惯性仪表输出数据进行小波降噪处理后,基于自适应卡尔曼滤波的对准方法的水平姿态角的估计过程收敛较快,振荡较小。

由图5可以看出,当采用常规卡尔曼滤波器对准时,方位角的估计振荡剧烈,幅度较大,而采用自适应卡尔曼滤波器后,则有效提高了对方位角估计的收敛速度。从方位角估计曲线的细节放大图可以进一步观察,对惯性器件输出数据进行降噪预处理,可以减小方位角估计过程的振荡,估计过程更稳定。

5. 结论

文中基于小波分析理论应用小波强制降噪及小

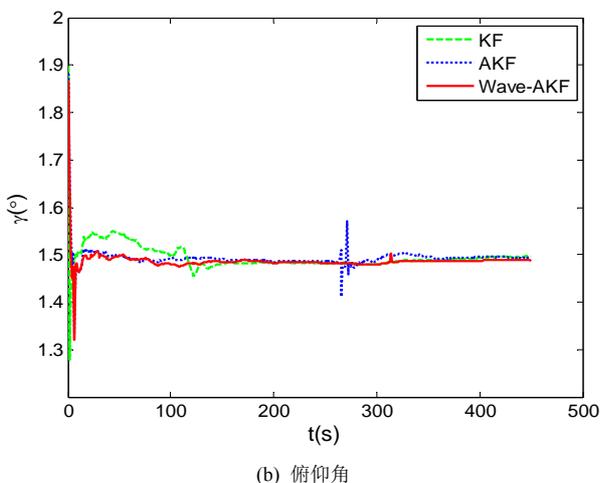
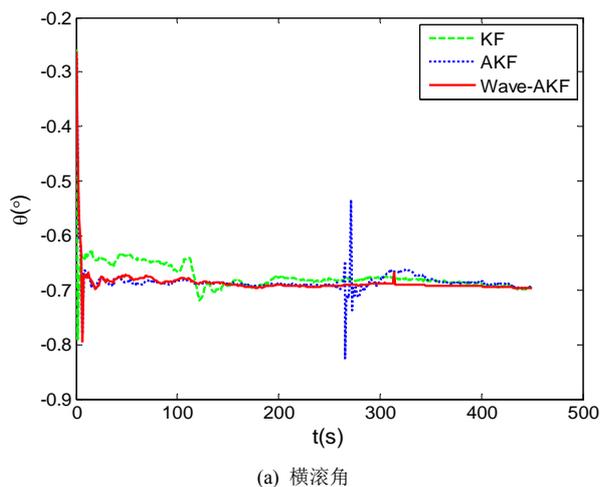


Figure 4. The estimate of roll and pitch angle
图4. 水平姿态角估计曲线

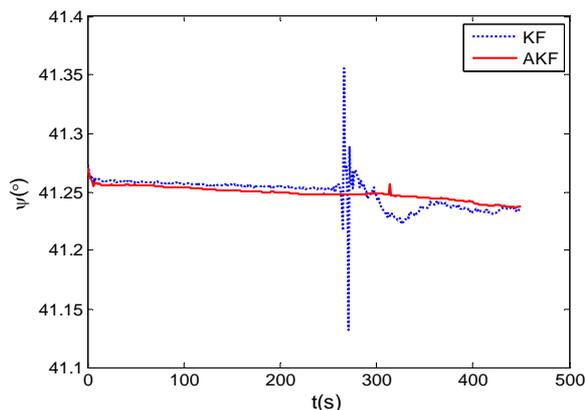
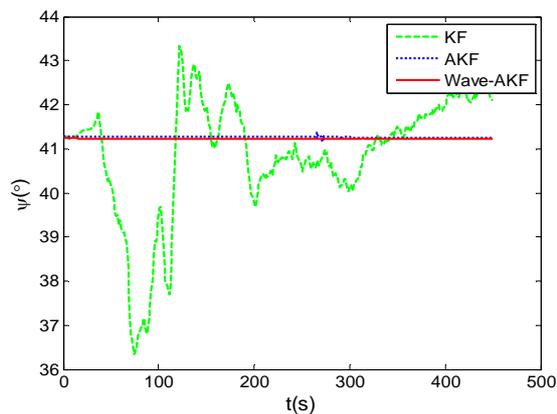


Figure 5. The estimate of azimuth angle and details of the plan
图5. 方位角估计曲线及细节放大图

波中值滤波技术对惯性仪器输出数据进行前期处理,并采用自适应卡尔曼滤波算法完成系统的初始对准。根据仿真结果,可以得到以下结论:1) 自适应卡尔曼算法有效地改善了姿态角估计过程,特别是对方位角估计的收敛速度;2) 经小波域降噪后,对准过程稳定性得到提高。文中采用惯性器件输出数据小波域降噪预处理、基于自适应卡尔曼滤波器的对准方案,收敛速度快、稳定性高,具有一定的应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 郭美凤, 杨海军, 滕云鹤等. 激光陀螺惯导系统扰动基础上的初始对准[J]. 清华大学学报, 2002, 42(2): 179-181.
- [2] 吕少麟, 谢玲, 陈家斌. 晃动基座下激光陀螺捷联导航系统初始对准的预滤波[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2520-2527.
- [3] 黄宗升. 旋转式激光陀螺寻北仪的研究[D]. 国防科学技术大学, 2007.
- [4] 时伟, 薛祖瑞, 吴美平. 基于小波检测的捷联惯导系统初始对准抗干扰新方法[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 613(3): 14-16.
- [5] 汤霞清, 黄湘远, 张环等. 晃动基座下捷联惯导的初始对准研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2012, 26(1): 50-54.

- [6] N. El-Sheimy, S. Nassar and A. Noureldin. Wavelet de-noising for IMU alignment. *IEEE A&E Systems Magazine*, 2004, 19: 32-39.
- [7] S. Mallat. *A wavelet tour of signal processing*. Cambridge: Academic Press, 1998.
- [8] 霍炬, 王石静, 杨明等. 基于小波变换阈值法处理光纤陀螺信号噪声[J]. *中国惯性技术学报*, 2008, 16(3): 343-347.
- [9] 陈刚, 张朝霞, 庄良杰. 小波域中值滤波器在陀螺寻北仪中的应用[J]. *天津大学学报*, 2006, 39(7): 797-800.
- [10] 彭云辉, 刘云峰, 杨小冈等. 小波域中值滤波器在激光陀螺信号处理中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 143-146.
- [11] 王新龙, 申功勋, 何乃刚. 带模型误差系统的卡尔曼滤波在捷联惯导系统初始对准中的应用研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2001, 9(3): 9-13.
- [12] 苏宛新, 黄春梅, 刘培伟等. 自适应 Kalman 滤波在 SINS 初始对准中的应用[J]. *中国惯性技术学报*, 2010, 18(1): 44-47.
- [13] 郑佳华, 王宏力, 段小庆, 等. 自适应卡尔曼滤波在 SINS 静基座初始对准中的应用[J]. *光电与控制*, 2008, 15(6): 87-89.