

文章编号 1004-924X(2009)10-2520-08

# 晃动基座下激光陀螺捷联导航 系统初始对准的预滤波

吕少麟, 谢 玲, 陈家斌

(北京理工大学 自动化学院, 北京 100081)

**摘要:**针对激光陀螺捷联惯性导航系统在晃动基座下进行初始对准时激光陀螺和加速度计噪声过大,而采用低通滤波或小波方法不能有效实时地实现噪声抑制的问题,提出一种采用 IIR 低通滤波器和基于隐式马尔可夫模型的稳态卡尔曼滤波相结合的新的预滤波方法。首先,将传感器输出通过低通滤波,然后再通过一个基于隐式马尔可夫模型的稳态卡尔曼滤波,从而有效地降低基座晃动带来的噪声,而不降低对准精度。实验结果表明,本文提出的预滤波方法计算复杂度低,滤波效果明显,在发动机开动的情况下,可以把导航系统激光陀螺的噪声标准差由  $300^{\circ}/\text{h}$  降至  $1^{\circ}/\text{h}$ ,加速度计的噪声标准差由  $11 \text{ mg}$  降至  $40 \mu\text{g}$ 。结果表明,提出的预滤波器能够很好地辅助激光陀螺捷联导航系统在晃动基座下完成精对准。

**关键词:**激光陀螺;捷联导航系统;初始对准;隐式马尔可夫模型;卡尔曼滤波

**中图分类号:**U666.12 **文献标识码:**A

## Prefiltering for initial alignment of ring laser gyroscope SINS on rocking base

LÜ Shao-lin, XIE Ling, CHEN Jia-bin

(Automation School, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** As the laser gyroscopes and accelerometers in a ring laser gyroscope Strapdown Inertial Navigation System(SINS) generate high noises by the dither motion of a base and a low pass filtering and a wavelet method can not suppress the noises in real time effectively, this paper presents a prefiltering method combining a low pass filtering and a Kalman filtering based on a hidden Markov model. Firstly, the output of a sensor is filtered by the lowpass filter, then it is filtered by the steady-state Kalman filter based on the hidden Markov model. By this way, the large sensor noise brought by the dither motion of the base can be lowed down to a very low level. Experiment results show that this prefiltering method can work efficiently with a low computational complexity. When the vehicle engine is on, the standard variances of the ring laser gyroscope and accelerometer are suppressed from  $300^{\circ}/\text{h}$  to  $1^{\circ}/\text{h}$  and from  $11 \text{ mg}$  to  $40 \mu\text{g}$ , respectively. It is concluded that the proposed prefiltering can help SINS accomplish the initial alignment on a rocking base.

收稿日期:2008-11-21;修订日期:2008-12-23.

基金项目:装备预先研究资助项目(No. 51309010601)

**Key words:** ring laser gyroscope; strapdown inertial navigation system; initial alignment; hidden Markov model; Kalman filter

### 1 引言

激光陀螺<sup>[1-5]</sup>是目前精度最高、最可靠的陀螺之一,与传统的机械陀螺相比,具有结构简单、启动快、测量范围宽、精度高、抗冲击震动能力强、工作稳定可靠、寿命长、消耗功率低、易于维护等诸多优点。激光陀螺捷联导航系统是我国武器装备的重要组成部分。

捷联导航系统在晃动基座下进行初始对准,由于受到基座晃动的影响,激光陀螺和加速度计的随机噪声会增大。在随机噪声很高的情况下,完成初始对准需要很长的时间。为了解决这个问题,一般需对传感器的输出做低通滤波,滤除高频噪声,降低噪声的方差。但是,采用低通滤波具有一定的局限性,滤波的截止频率过低会滤除有用的信息,改变输出信号的均值,致使对准精度降低;频率过高则噪声方差依然很大,对准速度无法满足要求<sup>[3]</sup>。采用小波<sup>[4-5]</sup>可以抑制传感器的噪声,但这种方法的计算复杂度很高,很难在线实现。针对这个问题,本文提出一种新的滤波方法,在低通滤波之后加一个基于隐式马尔可夫模型的稳态卡尔曼滤波,这样既可以降低系统的随机噪声,又能够满足实时滤波的需要。

### 2 初始方位对准

初始方位精对准过程采用闭环卡尔曼滤波,此时系统工作框图如图 1 所示。由 3 个二频机抖激光陀螺和 3 个加速度计组成的惯性测量单元(Inertial Measurement Unit)输出的数据先经过 IIR 低通滤波器,将高频干扰滤除,然后通过 2 维稳态卡尔曼滤波器,进一步降低噪声的方差,完成对原始输出信号的预滤波。得到的角增量和速度增量通过导航算法的计算得到速度输出,将此速度输出作为卡尔曼滤波器的观测量,驱动卡尔曼滤波器进行计算。卡尔曼滤波器估计出误差角和速度误差,连续反馈回导航计算模块,完成对系统的镇定。

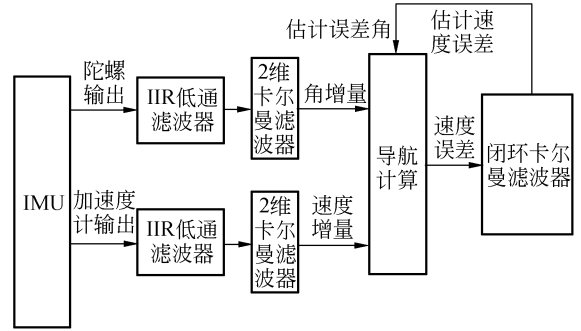


图 1 采用闭环卡尔曼滤波的捷联导航系统初始对准  
Fig. 1 SINS initial alignment using a closed-loop Kalman filter

### 3 预滤波算法

#### 3.1 IIR 低通滤波器

激光陀螺捷联导航系统由于机械抖动的注入,传感器的输出噪声会增大,在基座晃动的情况下,传感器噪声会进一步增大。采用低通滤波对系统输出进行滤波,会滤除一部分高频噪声,白化传感器的输出,同时降低噪声的方差。低通滤波采用的是 4 阶 IIR 低通滤波器,在车体没有线运动的情况下,选取截止频率为 10 Hz,频率太低会滤除过多的有用信息,频率太高则滤波效果不明显。4 阶 IIR 滤波公式如下:

$$y(k) = b_0 r(k) + b_1 r(k-1) + b_2 r(k-2) + b_3 r(k-3) + b_4 r(k-4) - a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - a_3 y(k-3) - a_4 y(k-4) \tag{1}$$

其中,  $r_k, k \in \mathbb{N}$  为惯性传感器信号序列,  $y_k, k \in \mathbb{N}$  为低通滤波器的输出序列。具体的低通滤波器系数计算方法参见文献[6],在 Matlab 下采用 butter 函数即可计算出滤波器系数如下:

$$\begin{aligned} b_0 &= 0.004\ 824\ 3, b_1 = 0.019\ 297\ 4, b_2 = 0.028\ 946\ 1, b_3 = 0.019\ 297\ 4, b_4 = 0.004\ 824\ 3, \\ a_0 &= 1.0, a_1 = -2.369\ 513\ 0, a_2 = 2.313\ 988\ 4, \\ a_3 &= -1.054\ 665\ 4, a_4 = 0.187\ 379\ 5. \end{aligned} \tag{2}$$

滤波器的幅频特性如下图所示,由图 2 可知,滤波器可以把 35 Hz 以上的高频段干扰(包括机械抖动引起的误差和外界的高频干扰)滤除掉。开发

动机时,载体在做低频振动,10~35 Hz 的低频运动反映了载体的真实运动情况。因此不能简单的将所有振动全部滤除,而应该设法降低其幅值。

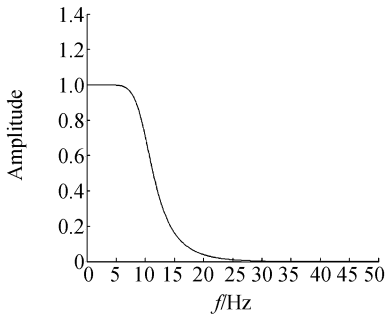


图 2 IIR 低通滤波器幅频特性

Fig. 2 Amplitude frequency characteristic of low passfilter

### 3.2 基于隐式马尔可夫模型的稳态卡尔曼滤波

初始对准时,惯性传感器输出信号  $X_k, k \in \mathbf{N}$  可视为有限状态齐次离散马尔可夫链<sup>[7]</sup>。当前系统的状态转移概率依赖于以前时刻的系统状态,转移概率独立于时间,因此马尔可夫链是齐次的。马尔可夫链并不能直接观测,但是可以通过有限状态观测过程  $Y_k, k \in \mathbf{N}$  进行估计,其中  $Y_k$  是被噪声污染的马尔可夫链。因此,这样的马尔可夫链被称为隐藏在观测中的马尔可夫链,即隐式马尔可夫链。

视低通滤波器输出为被噪声污染的马尔可夫链,则可建立离散隐式马尔可夫模型如下:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \boldsymbol{\eta}_k, \quad (3)$$

$$\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \boldsymbol{\nu}_k, \quad (4)$$

其中  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{C}$  为转移概率密度矩阵,矩阵元素满足关系

$$\sum_{j=1}^N a_{ji} = 1, a_{ji} \geq 0, \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^N c_{ji} = 1, c_{ji} \geq 0. \quad (6)$$

当输出信号可视为常值,模型建为二阶时,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

当汽车发动机开动时,载体基座会受到振动的干扰,这时仅仅采用低通滤波的方法对陀螺和加速度计输出进行滤波,得到的数据方差依然会很大,不能满足对准的需要。因此,在频域的低通滤波之后,必须进一步地对信号进行降噪处理。

否则,对准时间会延长,甚至无法完成对准。

初始对准时,陀螺和加速度计在低通滤波后的输出可视为随机游走,采用隐式马尔可夫模型对其输出序列建立状态方程如下

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1} \\ \mathbf{x}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k \\ \mathbf{x}_{k-1} \end{bmatrix} + \boldsymbol{\eta}_k, \quad (8)$$

即:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A}\mathbf{X}_{k-1} + \boldsymbol{\eta}_k. \quad (9)$$

观测方程可列为

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_{k+1} \\ \tilde{\mathbf{x}}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1} \\ \mathbf{x}_k \end{bmatrix} + \boldsymbol{\nu}_k, \quad (10)$$

即:

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{C}\mathbf{X}_k + \boldsymbol{\nu}_k. \quad (11)$$

其中这一时刻的第 2 个观测量取为上一个时刻第一个状态的卡尔曼滤波估计值。 $\boldsymbol{\eta}_k$  和  $\boldsymbol{\nu}_k$  分别表示过程噪声和测量噪声,且  $\boldsymbol{\eta}_k \sim \mathbf{N}(0, \mathbf{Q}_k)$   $\boldsymbol{\nu}_k \sim \mathbf{N}(0, \mathbf{R}_k)$ 。采用卡尔曼滤波对此二阶系统进行滤波,即可进一步降低信号的噪声。

利用先验的测量值离线计算出稳态增益,实际工作时用稳态增益对数据进行滤波,不必在线计算里卡提方程,这样就减小了计算量,满足了实时滤波的需要。采用的稳态卡尔曼滤波器如下

先验预测

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_k \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

测量更新

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k+1} \\ \hat{\mathbf{x}}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} \end{bmatrix} + \mathbf{K} \left( \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_{k+1} \\ \tilde{\mathbf{x}}_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} \end{bmatrix} \right), \quad (13)$$

其中  $\mathbf{K}$  是离线计算得到的卡尔曼滤波经验增益值。

公式(1)、(12)和(13)描述的滤波算法总计算量只有 30 个 flops,计算复杂度远低于小波,完全可以满足在线实现的要求。

### 3.3 稳态卡尔曼滤波的 IIR 形式

式(12)、(13)描述的固定增益卡尔曼滤波器可写成如下形式:

$$\mathbf{X}_k = (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{A})\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{K}\mathbf{Y}_k,$$

$$\mathbf{X}_k = (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{A})\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{K} \begin{bmatrix} u_k \\ \mathbf{X}_{k-1}(1) \end{bmatrix} =$$

$$\left\{ \mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{A} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{12} & 0 \\ \mathbf{K}_{22} & 0 \end{bmatrix} \right\} \mathbf{X}_{k-1} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} \\ \mathbf{K}_{21} \end{bmatrix} u_k, \quad (14)$$

其中  $u_k$  为外部输入序列。设

$$\Gamma = \mathbf{A} - \mathbf{KA} + \begin{bmatrix} K_{12} & 0 \\ K_{22} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

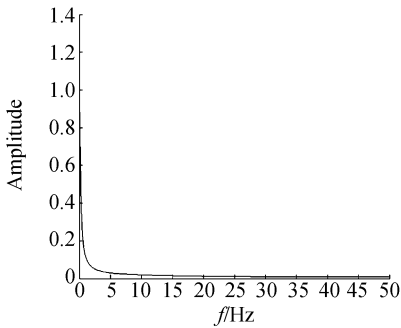
那么由输入到输出的 Z 变换传递函数可写作

$$H_{kal}(z) = \frac{\mathbf{X}^k}{u_k} = z(z\mathbf{I} - \Gamma)^{-1} \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{21} \end{bmatrix} = \frac{1}{1 - (\Gamma_{11} + \Gamma_{22})z^{-1} + (\Gamma_{11}\Gamma_{22} - \Gamma_{12}\Gamma_{21})z^{-2}} \cdot \begin{bmatrix} K_{11} + (K_{21}\Gamma_{12} - K_{11}\Gamma_{22})z^{-1} \\ K_{21} + (K_{11}\Gamma_{21} - K_{21}\Gamma_{11})z^{-1} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

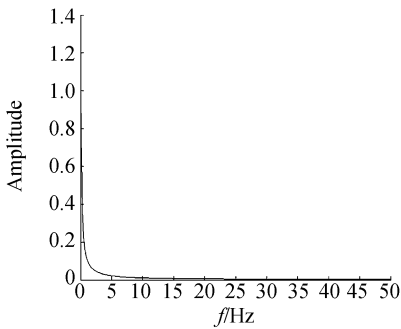
由上面的 IIR 滤波器形式可知,当一个输入序列值到来的时候,滤波器对其进行滤波的同时,利用这个值对上一个输出序列进行了平滑,也就是说滤波器在一边滤波一边平滑。这就是滤波效果明显的原因。

本系统采用的陀螺稳态卡尔曼滤波器对应的两个 IIR 滤波器幅频特性如图 3 所示。

由图可知本文设计的稳态卡尔曼滤波器的通频带很宽,保留了部分高频信号。而平滑滤波器的截止频率很低,带宽很窄,这样就降低了信号的噪声方差。



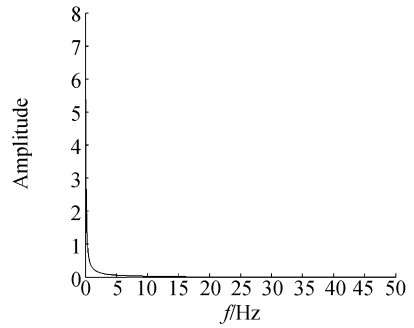
(a) IIR 滤波器 1  
(a) IIR filter 1



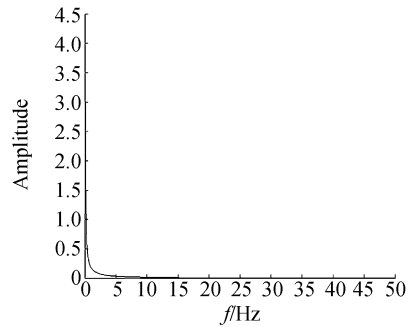
(b) IIR 滤波器 2  
(b) IIR filter 2

图 3 陀螺的卡尔曼滤波器对应的 IIR 滤波器幅频特性  
Fig. 3 IIR filter forms of Kalman filter for gyroscopes

本系统采用的加速度计卡尔曼滤波器对应的两个 IIR 滤波器幅频特性如图 4 所示。



(a) IIR 滤波器 1  
(a) IIR filter 1



(b) IIR 滤波器 2  
(b) IIR filter 2

图 4 加速度计的卡尔曼滤波器对应的 IIR 滤波器幅频特性  
Fig. 4 IIR filter forms of Kalman filter for accelerometers

加速度计本身的输出频率是很低的,只是因为陀螺的抖动和发动机的开动使其有了频率带很宽的噪声,因此加速度计的滤波器和陀螺稍有不同。由图 4 可知,稳态卡尔曼滤波器对加速度计信号的高频分量进行了进一步的抑制,与普通低通滤波器相比,它的过渡带很短。

### 4 闭环卡尔曼滤波初始对准

方位精对准利用速度观测量驱动卡尔曼滤波对姿态航向角误差进行估计<sup>[8-11]</sup>,并将估计量作为状态量对误差进行连续反馈。激光陀螺惯性系统的传感器误差可视为干扰项,导航坐标系取

北(North)东(East)地(Down),采用 Psi 角误差模型,状态方程<sup>[6-7]</sup>如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta v}_N \\ \dot{\delta v}_E \\ \dot{\psi}_N \\ \dot{\psi}_E \\ \dot{\psi}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2\Omega_D & 0 & g & 0 \\ -2\Omega_D & 0 & -g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Omega_D & 0 \\ 0 & 0 & -\Omega_D & 0 & \Omega_N \\ 0 & 0 & 0 & -\Omega_N & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_N \\ \delta v_E \\ \psi_N \\ \psi_E \\ \psi_D \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta \hat{v}_N / \tau \\ \delta \hat{v}_E / \tau \\ \hat{\psi}_N / \tau \\ \hat{\psi}_E / \tau \\ \hat{\psi}_D / \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nabla_N \\ \nabla_E \\ \epsilon_N \\ \epsilon_E \\ \epsilon_D \end{bmatrix} + q, \quad (17)$$

$\delta v_N$  和  $\delta v_E$  分别表示北向和东向速度误差,  $\tau$  为卡尔曼滤波周期,  $\psi_N \psi_E \psi_D$  分别表示横滚、俯仰和方位误差角,  $\nabla$  为加速度计偏移,  $\epsilon$  为陀螺偏移,  $\Omega_N$  和  $\Omega_D$  分别表示北向和垂直方向地球转速,  $g$  表示重力加速度,  $q$  为过程噪声。观测方程如下:

$$\begin{bmatrix} \delta \tilde{v}_N \\ \delta \tilde{v}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + r, \quad (18)$$

其中  $r$  表示观测噪声。这种方法属于状态反馈控制,每次滤波计算之后更新一次状态估计量,然后利用状态估计量在滤波周期内对速度和误差角进行连续的反馈控制。卡尔曼滤波法的优点是无需过多地依赖经验来调整滤波器参数,而且超调量很小。

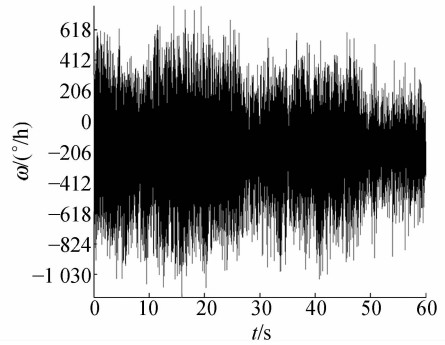
## 5 试验结果

为了验证算法的有效性,在某激光陀螺捷联导航系统上进行了试验。系统输出频率 100 Hz,将激光陀螺捷联导航系统固定于车上,不加减振器,在 4 个不同的方向对准。每个位置在开发动机和不开发动机的情况下各对准 4 次,采用闭环卡尔曼滤波进行对准,对准时间 4 min。保存实验数据,检验预滤波的效果并统计方位角对准的精度。

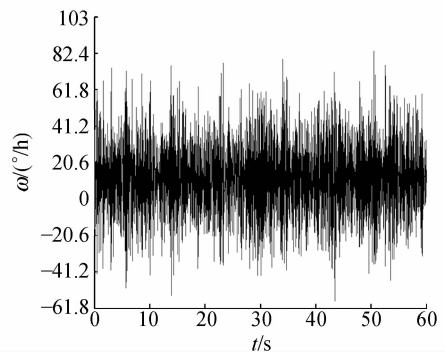
### 5.1 预滤波结果

由图 5 所示,图(a)为开发动机后  $x$  轴陀螺的原始输出信号,其噪声标准差为  $300^\circ/\text{h}$ ,经过低通滤波后,其噪声标准差降为  $20^\circ/\text{h}$ ,再经过 2 维稳态卡尔曼滤波后,噪声标准差可降至  $1^\circ/\text{h}$ 。图 6 中,开发动机后  $x$  轴加速计的原始输出噪声标

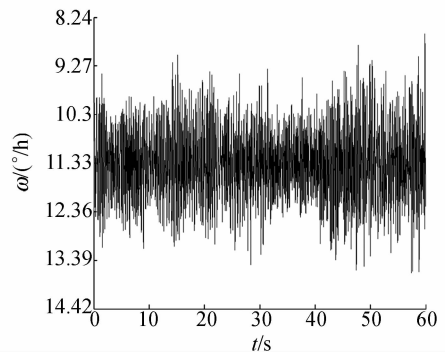
准差为  $11 \text{ mg}$ ,经过低通滤波后,其噪声标准差降为  $2.5 \text{ mg}$ ,再经过 2 维稳态卡尔曼滤波后,其噪声标准差降为  $40 \mu\text{g}$ 。由图 5 和图 6 可知,本文提出的预滤波方法有效地抑制了基座晃动和陀螺机械振动带来的噪声,极大地提高了传感器的信噪比。



(a) 原始输出  
(a) Original output

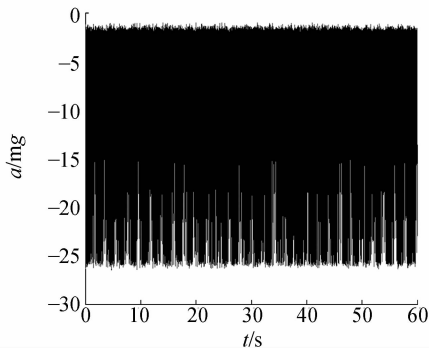


(b) 经过低通滤波后的结果  
(b) Result after low-pass filtering

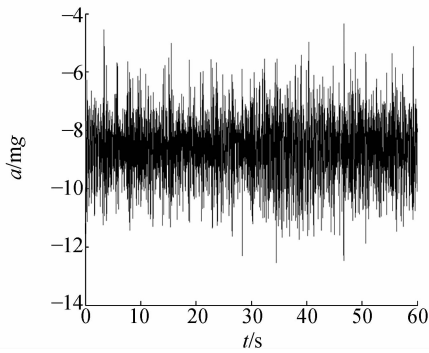


(c) 经过低通滤波和卡尔曼滤波后的结果  
(c) Result after low-pass and Kalman filtering

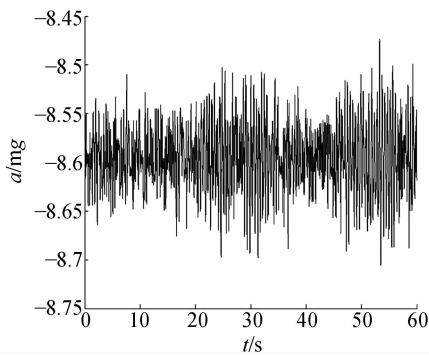
图 5 汽车开发动机时的陀螺输出的滤波结果  
Fig. 5 Filtering results of gyroscope output with vehicle engine on



(a) 原始输出  
(a) Original output

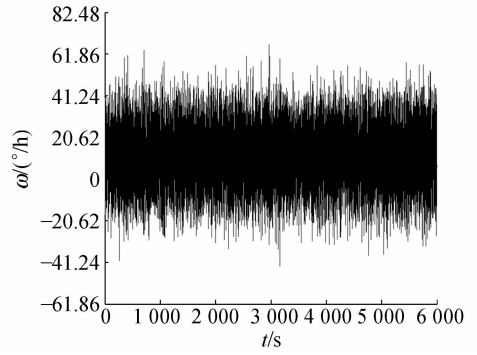


(b) 经过低通滤波后的结果  
(b) Result after low-pass filtering

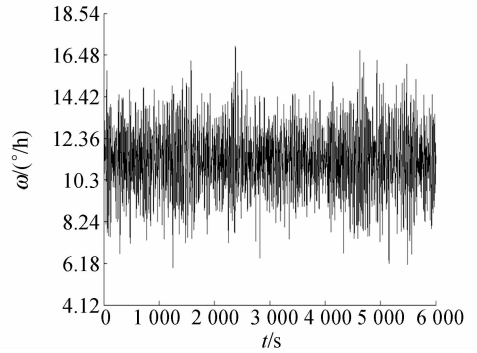


(c) 经过低通滤波和卡尔曼滤波后的结果  
(c) Result after low-pass and Kalman filtering

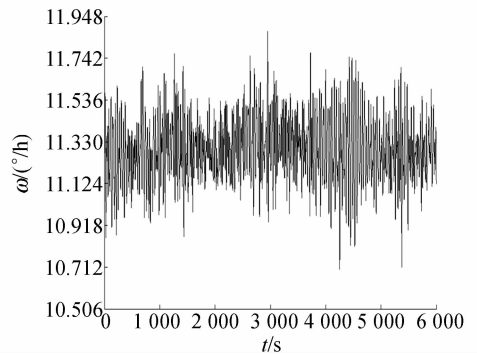
图 6 汽车开发动机时的加速度计输出的滤波结果  
Fig. 6 Filtering results of accelerometer output with vehicle engine on



(a) 原始输出  
(a) Original output



(b) 经过低通滤波后的结果  
(b) Result after low-pass filtering

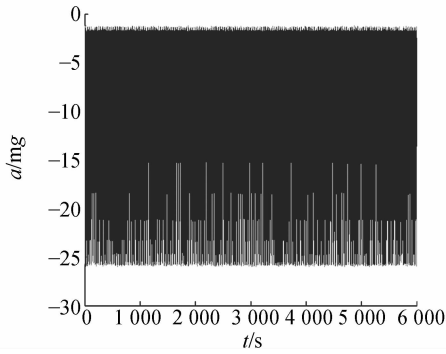


(c) 经过低通滤波和卡尔曼滤波后的结果  
(c) Result after low-pass and Kalman filtering

图 7 静基座下的陀螺输出的滤波结果  
Fig. 7 Filtering results of gyroscope output with vehicle engine off

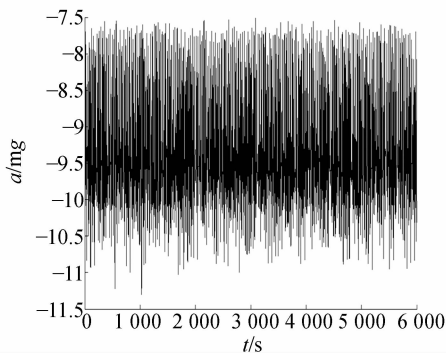
图 7 和图 8 是某次不开发动机对准时 60 s 内传感器输出的滤波结果。图 7 中,不开发动机  $x$  轴陀螺的原始输出信号噪声方差为  $19.54^{\circ}/h$ , 经过低通滤波后,其噪声标准差降为  $1.52^{\circ}/h$ ,再经过 2 维稳态卡尔曼滤波后,噪声标准差可降至

$0.16^{\circ}/h$ 。图 8 中,不开发动机  $x$  轴加速计的原始输出噪声标准差为  $10\text{ mg}$ , 经过低通滤波后,其噪声标准差降为  $0.8\text{ mg}$ ,再经过 2 维稳态卡尔曼滤波后,其噪声标准差降为  $19\text{ }\mu\text{g}$ 。由图 7 和图 8 可知,本文提出的预滤波方法在纯静基座的情况



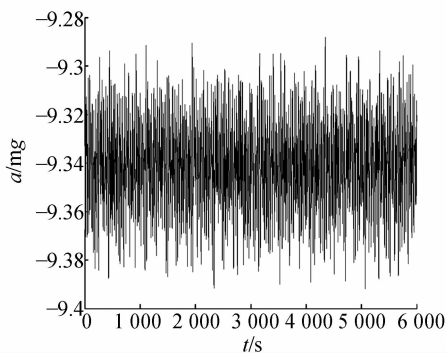
(a) 原始输出

(a) Original output



(b) 经过低通滤波后的结果

(b) Result after low-pass filtering



(c) 经过低通滤波和卡尔曼滤波后的结果

(c) Results after low-pass and Kalman filtering

图 8 静基座下加速度计输出的滤波结果

Fig. 8 Filtering results of accelerometer output with vehicle engine off

下也能极大地提高传感器的信噪比,有效地抑制传感器的噪声。

## 参考文献:

[1] 于旭东,龙兴武,汤建勋.机械抖动激光陀螺的随

## 5.2 对准结果

各个方向对准的结果如表 1 所示。不开发动机对准的重复性精度为  $0.011^\circ$ ,开发动机对准的重复性精度为  $0.016^\circ$ 。由此可知,由于预滤波对噪声的抑制,开发动机引起的车体晃动不会对对准的精度产生太大的影响。因此,本文的预滤波方法是有效的,可以满足实际系统的工作需要。

表 1 激光陀螺捷联导航系统方位角对准结果

Tab. 1 Alignment results of SINS on a vehicle

$n$	方向一	方向二	方向三	方向四	备注
1	$81.394^\circ$	$-25.234^\circ$	$-79.815^\circ$	$79.998^\circ$	不开发动机
2	$81.398^\circ$	$-25.228^\circ$	$-79.804^\circ$	$80.014^\circ$	
3	$81.400^\circ$	$-25.226^\circ$	$-79.795^\circ$	$80.037^\circ$	
4	$81.410^\circ$	$-25.248^\circ$	$-79.782^\circ$	$80.002^\circ$	
5	$81.403^\circ$	$-25.233^\circ$	$-79.792^\circ$	$79.978^\circ$	开发动机
6	$81.407^\circ$	$-25.253^\circ$	$-79.799^\circ$	$79.985^\circ$	
7	$81.406^\circ$	$-25.259^\circ$	$-79.807^\circ$	$80.053^\circ$	
8	$81.410^\circ$	$-25.243^\circ$	$-79.789^\circ$	$79.994^\circ$	
误差	$0.005^\circ$	$0.011^\circ$	$0.009^\circ$	$0.024^\circ$	

## 6 结 论

针对激光陀螺捷联导航系统在晃动基座下传感器噪声过大的问题,提出一种新的预滤波方法。新滤波方法采用 IIR 低通滤波器和基于隐式马尔可夫模型的稳态卡尔曼滤波相结合的方法,先滤除传感器输出的高频噪声,再降低输出噪声的方差。这种预滤波方法实现简单,计算复杂度低。实验结果表明,本文提出的方法效果明显,实际应用中可以有效地抑制陀螺和加速度计的噪声,在发动机开动的情况下可以把导航系统激光陀螺的噪声标准差由  $300^\circ/\text{h}$  降至  $1^\circ/\text{h}$ ,加速度计的噪声标准差由  $11 \text{ mg}$  降至  $40 \mu\text{g}$ 。本文提出的预滤波器可很好地辅助闭环卡尔曼滤波完成捷联导航系统初始对准,具有很高的工程实用价值。

机振动响应分析[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11):1760-1766.

YU X X, LONG X W, TANG J X. Random vibra-

- tion analysis of mechanically dithered ring laser gyroscope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1760-1766. (in Chinese)
- [2] 葛文涛, 陈明刚, 林玉荣, 等. 三轴激光陀螺温度误差动态建模及补偿技术[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10): 1509-1515.  
GE W T, CHEN M G, LIN Y R, *et al.*. Dynamic modeling and compensation for thermal error of three-axis ring laser gyro[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1509-1515. (in Chinese)
- [3] 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.  
GUO M F, YANG H J, TENG Y H, *et al.*. Initial alignment of laser gyroscope inertial navigation system with disturbances [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2002, 42(2): 179-181. (in Chinese)
- [4] SHEIMY N, NASSAR S, NOURELDIN A. Wavelet de-noising for IMU alignment[J]. *IEEE A&E Systems Magazine*, 2004: 32-38.
- [5] 王宇. 机抖激光陀螺捷联惯导系统的初步探索[D]. 北京: 国防科学技术大学, 2005.  
WANG Y. *Research on inertial strapdown system with mechanically dithered ring laser gyroscope* [D]. Beijing: PHD dissertation of University of National Defence Technology, 2005. (in Chinese)
- [6] PROAKIS J G, MANOLAKIS D G. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [7] CAPPE O, MOULINES E, RYDEN T. *Inference in Hidden Markov Models*[M]. New York: Springer, 2005.
- [8] ITZHACK I Y, BERMAN N. Control theoretic approach to inertial navigation systems [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1988, 11(3): 237-245.
- [9] ROGERS R M. *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems* [M]. Reston: AIAA, 2003.
- [10] 张荣辉, 贾宏光, 陈涛, 等. 基于四元数法的捷联式惯性导航系统的姿态解算[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1963-1970.  
ZHANG R H, JIA H G, CHEN T, *et al.*. Attitude solution for strapdown inertial navigation system based on quaternion algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1963-1970. (in Chinese)
- [11] 杨金显, 袁贛南. 基于MIMU/GPS的组合导航设计及实验[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 285-294.  
YANG J X, YUAN G N. Design and experiment for INS based on MIMU/GPS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 285-294. (in Chinese)

## 作者简介:



吕少麟(1981—), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 2002年于北京理工大学获得学士学位, 主要从事非线性滤波、卡尔曼滤波和捷联惯性导航系统方面的研究。E-mail: leo20980@sohu.com

## 导师简介:

谢玲(1962—), 女, 湖北武汉人, 教授, 1991年于北京理工大学获得硕士学位, 主要从事定位定向导航系统理论与实验研究。E-mail: xieling@bit.edu.cn

陈家斌(1964—), 男, 江西武宁人, 教授, 博士生导师, 1992年于上海交通大学获得博士学位, 主要从事定位定向导航系统理论与实验研究。E-mail: chenjiabin@bit.edu.cn

(本栏目编辑: 李树军)