MEMS 陀螺随机漂移在线补偿技术

袁赣南 梁海波 何昆鹏 谢燕军

(哈尔滨工程大学 自动化学院，哈尔滨 150001)

摘 要：为了提高微机电系统(MEMS，Micro Electro Mechanical System)陀螺测量的精度，提出了一种陀螺随机漂移的在线补偿方法. 在静态时在线建立随机漂移的自回归滑动平均(ARMA，Auto Regressive Moving Average)模型，并针对随机漂移模型随时间慢变的特性，引入虚拟噪声补偿技术加以补偿. 针对载体运动状况的未知性，建立机动角速率模型. 在此基础上采用自适应卡尔曼滤波技术对随机漂移和角速率进行实时估计. 通过试验表明：随机漂移模型、角速率模型以及滤波算法能够满足姿态测量系统的动态应用需要，且姿态测量精度较补偿前有了显著的提高.

关 键 词：陀螺仪；随机漂移；时间序列分析；目标跟踪；自适应滤波

中图分类号：V 241.6

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)12-1448-05

On-line compensation technique for micromechanical gyroscope random error

Yuan Gannan Liang Haibo He Kunpeng Xie Yanjun

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To improve the measurement precision of micro electro mechanical system (MEMS) gyroscope, an on-line compensation approach for MEMS gyroscope random error was presented. The autoregressive moving average (ARMA) model of random error was established under static condition, and the fictitious noise compensation technique was introduced to accommodate the time-varying model. Due to the unknown movement of carrier, the technique of maneuvering target tracking was presented to obtain the maneuvering angular rate model. The random error and angular rate were estimated in real-time by using adaptive Kalman filter in the dynamic test. The result of test indicates that the model of random error, the angular rate, and the algorithm of filtering can satisfy the dynamic application of the MEMS-based attitude heading reference system. Furthermore, the precision of system is greatly improved after compensated.

Key words: gyroscopes; random errors; time series analysis; target tracking; adaptive filtering

微机电系统(MEMS，Micro Electro Mechanical System)陀螺的漂移由确定性漂移和随机漂移两部分构成. 确定性漂移可以通过标定和测试，建立其精确的数学模型加以补偿，而随机漂移则表现为随时间缓慢变化、无规律的过程. 由于随机漂移是影响陀螺精度的重要误差源之一，对整个导航系统精度有较大的影响，因而针对随机漂移开展研究具有重要意义[1].

MEMS 陀螺随机漂移的补偿一般采用时间序列分析建模的方法，然后利用 Kalman 滤波对随机漂移进行估计并加以补偿. 然而，实际中的随机漂移的均值和方差都会随时间缓慢地发生变化，这明显不符合经典 Kalman 滤波器的使用条件，无法保证估计的精度. 本文采用一种在线的随

收稿日期：2009-10-27

基金项目：总装预研基金资助项目(9140A09031008CB01)

作者简介：袁赣南(1945—)，男，江西赣州人，教授，yuangannan@163.com.

机漂移补偿方法,以适应随机漂移的时变特性,从而达到提高系统精度的目的.

1　系统状态空间模型的构建

1.1　随机漂移模型的状态空间构建

采用文献[2]的方法,建立陀螺随机漂移的自回归滑动平均(ARMA, Auto Regressive Moving Average)模型.利用 Kalman 滤波器对 MEMS 陀螺随机漂移进行估计,需要将 ARMA 模型转化为状态空间模型.为表述方便起见,这里以 ARMA(2,1)模型为例,其表达式为

$$z_k=\varphi_1 z_{k-1}+\varphi_2 z_{k-2}+a_k+\theta_1 a_{k-1} \tag{1}$$

式中,φ_1 和 φ_2 为模型中自回归部分的参数;θ_1 为模型中滑动平均部分的参数.

设状态变量为 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{I}k}=[x_k \quad x_{k-1}]^{\mathrm{T}}$,系统噪声变量为 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{I}k}=a_k$,满足如下系统方程(定义为系统Ⅰ):

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{I}k}=\boldsymbol{A}_{\mathrm{I}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{I}k-1}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{I}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{I}k} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{I}k}=\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{I}k}+\boldsymbol{V}_{\mathrm{I}k} \tag{3}$$

式中

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{I}}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ \varphi_2 & \varphi_1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{I}}=\begin{bmatrix}G_0\\ G_1\end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}=[1 \quad 0]$$

其中,$\boldsymbol{V}_{\mathrm{I}k}$ 为量测噪声;G_0,G_1 为 ARMA(2,1)模型的格林函数[3-4].根据文献[2]对格林函数的相关阐述,可以推导出 ARMA(2,1)模型的格林函数如下:

$$G_0=1$$

$$G_1=\varphi_1 G_0+\theta_1=\varphi_1+\theta_1$$

1.2　角速率模型的状态空间构建

在载体运动过程中,角速率的变化情况是无法提前预知的,因此角速率模型要能够适应载体运动状态的变化.本文使用机动目标跟踪理论中的"当前"概率密度模型[5],其模型为

$$\begin{bmatrix}\dot{\omega}_{\mathrm{t}}\\ \ddot{\omega}_{\mathrm{t}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & -\alpha\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\omega_{\mathrm{t}}\\ \dot{\omega}_{\mathrm{t}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \alpha\end{bmatrix}\overline{\beta}_{\mathrm{t}}+\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}w_{\mathrm{t}} \tag{4}$$

式中,ω_{t},$\dot{\omega}_{\mathrm{t}}$ 为陀螺敏感的角速率和角加速度;α 为机动加速度时间常数的倒数;$\overline{\beta}_{\mathrm{t}}$ 为当前角加速度均值;w_{t} 是均值为零、方差为 $2\alpha\sigma_{\mathrm{a}}^2$ 的白噪声序列,σ_{a}^2 为角加速度方差.

在满足一定采样周期 T_{s} 下,利用离散化处理方法,得到离散系统状态方程(定义为系统Ⅱ):

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{II}k}=\boldsymbol{A}_{\mathrm{II}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{II}k-1}+\boldsymbol{U}_{\mathrm{II}}\overline{\boldsymbol{\beta}}_k+\boldsymbol{W}_{\mathrm{II}k} \tag{5}$$

式中

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{II}k}=[\omega_k \quad \dot{\omega}_k]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{II}}=\begin{bmatrix}1 & \frac{1}{\alpha}(1-\mathrm{e}^{-\alpha T_{\mathrm{s}}})\\ 0 & \mathrm{e}^{-\alpha T_{\mathrm{s}}}\end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{II}}=\begin{bmatrix}T_{\mathrm{s}}-\frac{1-\mathrm{e}^{-\alpha T_{\mathrm{s}}}}{\alpha} & 1-\mathrm{e}^{-\alpha T_{\mathrm{s}}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

其中,$\boldsymbol{W}_{\mathrm{II}k}$ 是均值为零、方差为 $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{II}k}$ 的高斯系统噪声.

离散系统量测方程为

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{II}k}=\boldsymbol{H}_{\mathrm{II}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{II}k}+\boldsymbol{V}_{\mathrm{II}k} \tag{8}$$

当仅有含噪声的角速率可量测时,有 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{II}}=[1 \quad 0]$.$\boldsymbol{V}_{\mathrm{II}k}$ 是均值为零、方差为 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{II}k}$ 的高斯量测噪声.

式(5)和式(8)就构成了机动角速率状态空间模型.

2　自适应 Kalman 滤波器设计

2.1　随机漂移滤波器

考虑到陀螺随机漂移是一个随时间缓慢变化的近似随机过程,随着时间的推移,前文所建立的 ARMA 模型参数必然发生变化,采用经典 Kalman 滤波显然不能满足实际情况.本文通过引入带未知时变噪声统计的虚拟噪声来补偿模型误差,从而把问题归结为带未知时变噪声统计系统的自适应 Kalman 滤波问题,自适应 Kalman 滤波器方程[6]如下:

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{I}k,k-1}=\boldsymbol{A}_{\mathrm{I}}\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{I}k-1}+\hat{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{I}k-1} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{I}k,k-1}=\boldsymbol{A}_{\mathrm{I}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{I}k-1}\boldsymbol{A}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{T}}+\hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{I}k-1} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{I}k}=\boldsymbol{P}_{\mathrm{I}k,k-1}\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{I}k,k-1}\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{T}}+\hat{\boldsymbol{R}}_{\mathrm{I}k-1})^{-1} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{I}k}=\boldsymbol{Z}_{\mathrm{I}k}-\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{I}k,k-1}-\hat{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{I}k-1} \tag{12}$$

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{I}k}=\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{I}k,k-1}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{I}k}\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{I}k} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{I}k}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_{\mathrm{I}k}\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}})\boldsymbol{P}_{\mathrm{I}k,k-1} \tag{14}$$

并且

$$\boldsymbol{D}_k=\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{I}k,k-1}\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{T}}+\hat{\boldsymbol{R}}_{\mathrm{I}K-1})^{-1} \tag{15}$$

$$\hat{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{I}k}=\hat{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{I}k-1}+\gamma\hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{I}k-1}\boldsymbol{D}_k\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{I}k} \tag{16}$$

$$\hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{I}k}=\hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{I}k-1}+\gamma\hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{I}k-1}\boldsymbol{D}_k(\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{I}k}\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{I}k}^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{I}k,k-1}\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{T}}-\hat{\boldsymbol{R}}_{\mathrm{I}k-1})\boldsymbol{D}_k^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{I}k-1} \tag{17}$$

$$\hat{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{I}k}=(1-\gamma)\hat{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{I}k-1}+\gamma(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{I}k}-\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{I}k}) \tag{18}$$

$$\hat{\boldsymbol{R}}_{\mathrm{I}k}=(1-\gamma)\hat{\boldsymbol{R}}_{\mathrm{I}k-1}+[(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{I}k})\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{I}k}\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{I}k}^{\mathrm{T}}\cdot(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{I}k})^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{I}k}\boldsymbol{H}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{T}}] \tag{19}$$

式中,$\boldsymbol{q}_{\mathrm{I}k}$,$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{I}k}$ 分别为时变系统噪声的均值和方差;$\boldsymbol{r}_{\mathrm{I}k}$,$\boldsymbol{R}_{\mathrm{I}k}$ 分别为时变量测噪声的均值和方差;上标∼表示滤波器变量的一步预测值;$\boldsymbol{I}$ 为单位阵;$\gamma=(1-b)/(1-b^{k+1})$,b 为遗忘因子,$0\leqslant b\leqslant 1$,对于慢时变噪声统计应取较大的接近于 1 的

b[6-7].

交替使用式(9)～式(14)和式(15)～式(19)即可得到随机漂移状态和时变噪声统计的估计值.

2.2 角速率滤波器

针对机动角速率模型式(5)和式(8)的经典Kalman滤波方程为

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{II}k,k-1}=\boldsymbol{A}_{\mathrm{II}}\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{II}k-1}+\boldsymbol{U}_{\mathrm{II}}\overline{\boldsymbol{\beta}}_k \tag{20}$$

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{II}k,k-1}=\boldsymbol{A}_{\mathrm{II}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{II}k-1}\boldsymbol{A}_{\mathrm{II}}^{\mathrm{T}}+\hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{II}k-1} \tag{21}$$

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{II}k}=\boldsymbol{P}_{\mathrm{II}k,k-1}\boldsymbol{H}_{\mathrm{II}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{II}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{II}k,k-1}\boldsymbol{H}_{\mathrm{II}}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R}_{\mathrm{II}})^{-1} \tag{22}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{II}k}=\boldsymbol{Z}_{\mathrm{II}k}-\boldsymbol{H}_{\mathrm{II}}\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{II}k,k-1} \tag{23}$$

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{II}k}=\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{II}k,k-1}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{II}k}\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{II}k} \tag{24}$$

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{II}k}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_{\mathrm{II}k}\boldsymbol{H}_{\mathrm{II}})\boldsymbol{P}_{\mathrm{II}k,k-1} \tag{25}$$

根据机动目标跟踪理论,将状态变量$\dot{\omega}_k$的一步预测值$\hat{\omega}_{k,k-1}$看作在kT_s时刻的$\overline{\boldsymbol{\beta}}_k$,就可得到角加速度的均值自适应算法.因此,设$\overline{\boldsymbol{\beta}}_k=\hat{\dot{\boldsymbol{\omega}}}_{k,k-1}$,联立式(6)、式(7)和式(20),有

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{II}k,k-1}=\boldsymbol{A}'_{\mathrm{II}}\hat{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{II}k-1} \tag{26}$$

其中,$\boldsymbol{A}'_{\mathrm{II}}=\begin{bmatrix}1 & T_s\\ 0 & 1\end{bmatrix}$.此时系统状态方程等效为

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{II}k}=\boldsymbol{A}'_{\mathrm{II}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{II}k-1}+\boldsymbol{W}_{\mathrm{II}k} \tag{27}$$

由于系统噪声$\boldsymbol{W}_{\mathrm{II}k}$是均值为零、方差为$2\alpha\sigma_a^2$的白噪声序列,有

$$\hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{II}k}=E[\boldsymbol{W}_{\mathrm{II}k}\cdot\boldsymbol{W}_{\mathrm{II}k}^{\mathrm{T}}]=2\alpha\sigma_a^2\begin{bmatrix}q_{11} & q_{12}\\ q_{21} & q_{22}\end{bmatrix}$$

式中

$$q_{11}=\frac{1}{2\alpha^3}(4\mathrm{e}^{-\alpha T_s}-3-\mathrm{e}^{-2\alpha T_s}+2\alpha T_s)$$

$$q_{12}=q_{21}=\frac{1}{2\alpha^2}(\mathrm{e}^{-2\alpha T_s}+1-2\mathrm{e}^{-\alpha T_s})$$

$$q_{22}=\frac{1}{2\alpha}(1-\mathrm{e}^{-2\alpha T_s})$$

$$\sigma_a^2=\frac{4-\pi}{\pi}(\beta_{\max}-|\hat{\omega}_{k,k-1}|)^2$$

其中,$\beta_{\max}$为角加速度机动的最大值.

由此,$\hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{II}k}$与"当前"角加速度建立了数学联系,再结合式(21)～式(26)便构成了机动角速率的自适应Kalman滤波算法.

2.3 滤波器改进

前文已经分别设计了基于陀螺随机漂移和机动角速率的自适应Kalman滤波器,二者既有联系又存在差异,因此有必要通过适当的处理,将其结合在一起以便于实用.

系统Ⅰ强调噪声均值和方差的时变特性,在每个滤波周期中,分别对系统噪声和量测噪声的均值、方差进行实时估计;而系统Ⅱ则只强调系统噪声的方差随角加速度的变化,均值恒定为零,且其量测噪声均值为零,方差恒定.

设结合后的系统为系统Ⅲ,取

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{III}k}=[x_k\quad x_{k-1}\quad \omega_k\quad \dot{\omega}_k]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{III}k}=[a_k\quad a_{k-1}\quad w_{1k}\quad w_{2k}]^{\mathrm{T}}$$

满足系统方程:

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{III}k}=\boldsymbol{A}'_{\mathrm{III}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{III}k-1}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{III}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{III}k} \tag{28}$$

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{III}k}=\boldsymbol{H}_{\mathrm{III}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{III}k}+\boldsymbol{V}_{\mathrm{III}k} \tag{29}$$

式中

$$\boldsymbol{A}'_{\mathrm{III}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_{\mathrm{I}} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A}'_{\mathrm{II}}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{III}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_{\mathrm{I}} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{B}_{\mathrm{II}}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{III}}=[1\quad 0\quad 1\quad 0]$$

$$\hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{III}k}=\begin{bmatrix}\hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{I}k} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{II}k}\end{bmatrix}$$

$$\hat{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{III}k}=[\hat{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{I}k}\quad \hat{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{II}k}]^{\mathrm{T}}=[\hat{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{I}k}\quad \boldsymbol{0}]^{\mathrm{T}}$$

$$\hat{\boldsymbol{R}}_{\mathrm{III}k}=\mathrm{var}(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{III}k})$$

$$\hat{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{III}k}=\mathrm{mean}(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{III}k})$$

以系统Ⅰ的滤波器为主体,并加入对$\hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{II}k}$的估计算法,便构成了系统Ⅲ的自适应Kalman滤波器.在每个滤波周期内,分别对$\boldsymbol{X}_{\mathrm{III}k}$,$\hat{\boldsymbol{Q}}_{\mathrm{III}k}$,$\hat{\boldsymbol{R}}_{\mathrm{III}k}$,$\hat{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{III}k}$和$\hat{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{III}k}$中的各分量进行实时估计.

3 随机漂移补偿试验

为了验证自适应Kalman滤波器对随机漂移的实时补偿效果以及对MEMS姿态测量系统的精度改善情况,将该滤波算法装订在某型MEMS姿态测量仪中,在线建立陀螺随机漂移模型,将实时补偿后的数据用于姿态解算,通过对比随机漂移补偿前后的姿态解算结果来获取滤波器的性能信息.具体试验方案如下:

将MEMS姿态测量仪安装于三轴速率转台上,使载体坐标系、转台坐标系与东北天地理坐标系重合.以天轴上的陀螺作为试验对象,控制转台按照如下方式运动:

0～320 s:陀螺静止;

321～660 s:陀螺绕敏感轴以5(°)/s的速率转动;

661～1 000 s:陀螺绕敏感轴以10(°)/s的速率转动;

1 001～1 650 s:陀螺绕敏感轴做幅值为10°,周期为10 s的摇摆运动;

1 651～1 800 s:陀螺静止.

以 50 Hz 的采样频率采集陀螺输出信号,并对陀螺信号进行确定性漂移补偿后的结果如图 1 所示.

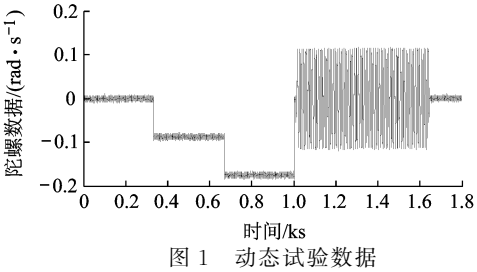

图 1　动态试验数据

在 0～320 s 范围内陀螺处于静止状态,此时的数据可以认为是陀螺的随机漂移.利用前 8 s 的数据(400 个点)在线建立最优模型为 ARMA(2,1),其表达式为

$$z_k = 0.681z_{k-1} - 0.255z_{k-2} + a_k + 0.504a_{k-1} \tag{30}$$

结合机动角速率模型,建立形如式(28)和式(29)的线性系统方程,其参数为

$$\boldsymbol{A}'_{\text{Ⅲ}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.255 & 0.681 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.02 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_{\text{Ⅲ}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1.185 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{H}_{\text{Ⅲ}} = [1 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$$

自适应 Kalman 滤波器选取如下初始参数:

$$\boldsymbol{X}_{\text{Ⅲ}0} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{P}_{\text{Ⅲ}0} = 10\boldsymbol{I}$$

系统噪声方差阵元素分别取自陀螺的 ARMA 在线建模残差方差和 Allan 方差分析结果,具体数值为

$$\boldsymbol{Q}_{\text{Ⅲ}0} = \mathrm{diag}[2.954 \quad 2.954 \quad 11.421 \quad 0.383] \times 10^{-6}$$

$$\boldsymbol{R}_{\text{Ⅲ}0} = \mathrm{var}(\boldsymbol{Z}_{\text{Ⅲ}k}) = 7.699 \times 10^{-6}$$

以 9～1 800 s 的试验数据作为量测值,使用

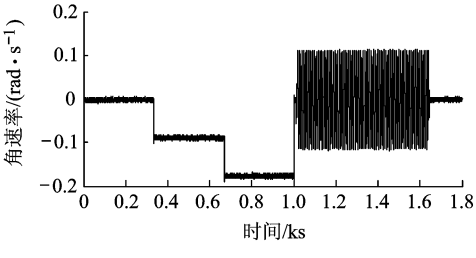

图 2　估计角速率

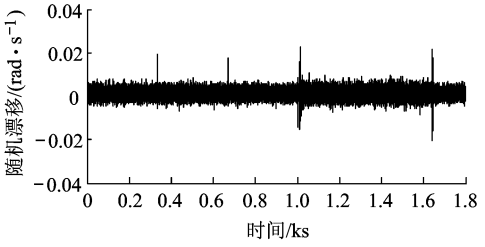

图 3　估计随机漂移

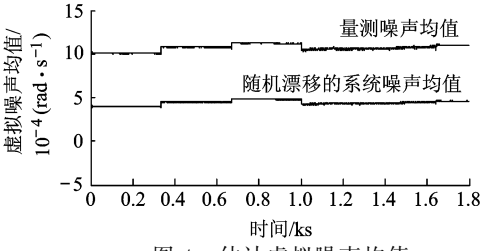

图 4　估计虚拟噪声均值

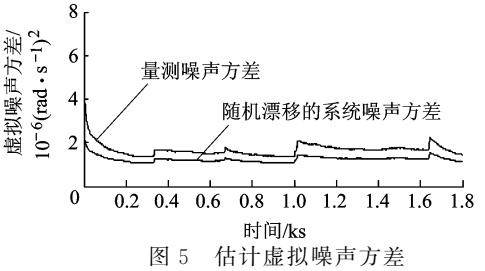

图 5　估计虚拟噪声方差

由图 2～图 5 可知,估计出的角速率对量测值跟踪性能良好,估计出的虚拟噪声均值和方差随着时间的推移,在缓慢地发生变化,与实际情况相符.由此可见,滤波器能够适应 MEMS 姿态测量仪在一定动态条件下的应用.

将角速率估计结果用于实时姿态解算,由于试验对象为天轴陀螺,只需考察解算出的航向角即可.表 1 给出了统计意义下的航向角解算误差值的比较结果.

表 1　航向角解算误差比较　　rad

项目	运动状态		
	静态	匀速转动	摇摆
补偿前的解算误差均值	0.3862	0.2989	1.1946
补偿后的解算误差均值	0.2078	0.0044	0.3465
补偿前的解算误差标准差	0.1991	1.2790	0.3356
补偿后的解算误差标准差	0.0971	0.5532	0.1789

结合图 1、图 2 和表 1,可以得出以下结论:

1) 在静态条件下,补偿后的解算结果优于补偿前的情况,误差均值和标准差均降为补偿前的 50%.

2) 匀速转动条件下,补偿后的解算结果较补偿前的精度有明显提高.误差均值降为补偿前的 1.4%,标准差降为 43%.

3) 摇摆条件下,补偿后的解算结果较补偿前

的性能也有所提高，误差均值降为补偿前的29%，误差标准差降为补偿前的53%.

4 结束语

MEMS陀螺随机漂移是随时间缓慢变化的、无规律的近似随机过程，是影响姿态测量系统精度的主要因素之一，有必要加以补偿. 通过在线建立随机漂移的ARMA模型和机动角速率模型，进行基于虚拟噪声补偿理论的自适应Kalman滤波，对随机漂移和角速率进行实时估计. 试验结果表明，文中采用的系统模型和滤波算法能够适应姿态测量系统动态应用的需要，且使姿态解算精度有了较大程度的提高.

参考文献（References）

[1] 王新龙，马闪. 光纤陀螺随机漂移误差补偿适用性方法[J]. 北京航空航天大学学报，2008，34(6)：681－685
Wang Xinlong，Ma Shan. Applicability compensation method for random drift of fiber optic gyroscopes[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2008，34(6)：681－685(in Chinese)

[2] 杨叔子，吴雅. 时间序列分析的工程应用[M]. 2版. 武汉：华中理工大学出版社，2007：46－138
Yang Shuzi，Wu Ya. Time series analysis in engineering application[M]. The Second Edition. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology Press，2007：46－138 (in Chinese)

[3] Box G E P，Jenkins G M，Reinsel G C. Time series analysis：forecasting and control[M]. Beijing：Post & Telecom Press，2005：287－298

[4] Piet D J，Jeremy P. The ARMA model in state space form [J]. Statistic & Probability Letters，2004，70(8)：119－125

[5] 周洪仁，敬忠良，王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京：国防工业出版社，1991：135－153
Zhou Hongren，Jing Zhongliang，Wang Peide. Maneuvering target tracking [M]. Beijing：National Defense Industry Press，1991：135－153 (in Chinese)

[6] 邓自立. 自校正滤波理论及其应用：现代时间序列分析方法[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2003：179－185
Deng Zili. Adaptive filtering theory and application：method of modern time series analysis[M]. Harbin：Harbin Institute of Technology Press，2003：179－185 (in Chinese)

[7] 邓自立，许燕. 基于Kalman滤波的白噪声估计理论[J]. 自动化学报，2003，29(1)：23－31
Deng Zili，Xu Yan. White noise estimation theory based on Kalman filtering[J]. Acta Automatica Sinica，2003，29(1)：23－31(in Chinese)

（编　辑：赵海容）

（上接第1439页）

5 结　论

1）本文完成B737-800驾驶舱空气流动和传热的数值模拟，得出的数值模拟结果符合大型客机驾驶舱空气设计要求，且与飞行员主观评价结果相一致；

2）根据数值模拟结果求得驾驶舱PMV指标，该客观评价得出B737-800驾驶舱处于舒适区的范围内，与飞行员主观评价结果相一致；

3）根据以上两个结论，得出本文驾驶舱的模型设计、简化与驾驶舱边界条件、计算条件的处理均为合理的，本文的驾驶舱数值模拟方法和客观评价方法可运用于此类机型驾驶舱的初期设计研究中.

参考文献（References）

[1] Aboosaidi F，Warfield M J. Numerical analysis of airflow in aircraft cabins[R]. SAE-91-1441，1991

[2] DeJager A W，Lytle D B. Commercial airplane air distribution system development through the use of computational fluid dynamics[R]. AIAA-1992-0987，1992

[3] Singh A，Hosni M H，Hortsman R H. Numerical simulation of airflow in an aircraft cabin section[J]. ASHRAE Transactions，2002，108(1)：1005－1013

[4] 寿荣中，何慧珊. 飞行器环境控制[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2006：7
Shou Rongzhong，He Huishan. Aerocraft environment control system[M]. Beijing：Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press，2006：7(in Chinese)

[5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安：西安交通大学出版社，2004：28－47
Tao Wenquan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an：Xi'an Jiaotong University Press，2004：28－47(in Chinese)

[6] 谢东，王汉青. 不同气流组织下夏季空调室内热舒适环境模拟[J]. 建筑热能通风空调，2007，27(3)：66－69
Xie Dong，Wang Hanqing. Room thermal comfort simulation of different air conditioning in summer [J]. Building Energy & Environment，2007，27(3)：66－69(in Chinese)

[7] GB/T 18977—2003　热环境人类工效学、适用主观判定量表评价热环境的影响[S]
GB / T 18977—2003 Thermal environment of ergonomics，using the subjective evaluation scale determine the effective of thermal environment[S](in Chinese)

（编　辑：李　晶）