

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

光电稳定跟踪装置中微机电陀螺应用研究

张文博, 范大鹏, 张智永, 李 凯

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:以微机电陀螺在高精度光电稳定跟踪装置中的应用为背景,研究了陀螺输出噪声对光电稳定跟踪平台精度的影响。结果表明,陀螺噪声会引起平台基准轴的抖动和缓慢漂移。根据微机电陀螺的实测数据,分析了其噪声特性。基于 AR 模型建立了微机电陀螺的噪声统计模型。研究了基于 Kalman 滤波的陀螺去噪算法,给出了去噪结果,分析了该算法不能够取得较好滤波效果的原因。针对 Kalman 滤波在微机电陀螺信号低频去噪方面的局限性,将基于阈值决策的小波去噪方法应用于微机电陀螺的信号处理中,给出了滤波结果。实测结果表明由于后者不依赖于噪声的精确模型,可根据噪声在不同频段的统计特性采用阈值决策滤波,具有更好的抑噪效果。最后给出了两种滤波算法的比较。

关键词:光电稳定跟踪装置;微机电陀螺;噪声;谱密度;AR 模型;卡尔曼滤波;小波变换;阈值决策

中图分类号:U666.12 **文献标识码:**A

Research on the application of MEMS gyro used in servo system for E-O stabilization and tracking devices

Zhang Wen-bo, Fan Da-peng, Zhang Zhi-yong, Li Kai

(College of Mechatronics Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the MEMS gyros used widely in the high accuracy electro-optical (E-O) stabilization and tracking devices, the impact of gyro noise to the E-O platform precision was studied. The analyzing result indicates that the gyro noise would cause the jitter of the Line of Sight (LOS) and slow drift on angle. Therefore, it is necessary to propose a effective filter method for restraining the gyro noise to obtain higher LOS stabilization precision. In this paper, the noise features were analyzed and the AR model of MEMS gyros was developed. By the Kalman filter method to denoise the signal of gyros primarily, the simulation results show that this method couldn't achieve good performance. Following that, the threshold filter method according to the wavelet was researched, and the simulation data reveal its perfect performance on the denoising. Finally, the comparisons on relative merits between these two denoise methods were given.

Key words: E-O stabilization/tracking device MEMS gyro; noise; Porver Spectral Density(PSD); AR model; kalman filter; wavelet transform; threshold

1 引言

在机载光电侦察、测量等设备的控制系统中,常常要将光电传感器的视轴精确指向目标,以完成对目标的捕获、跟踪及测量。目前,平台整体稳定方式仍是光电稳定跟踪装置的主要形式。为了保证视轴稳定,陀螺稳定平台必须同时解决伺服跟踪和隔离载体扰动的问题。微机电陀螺由于其体积小、质量轻、功耗小、成本低、瞬间启动及抗冲击力强等特点,广泛应用于新型光电稳定平台的研制中^[1]。作为伺服稳定跟踪系统的速度环敏感器件,微机电陀螺感受载体在惯性空间的扰动量,并输出与角速度成比例的电压信号,通过控制器输出驱动电机对框架施加一个与扰动力矩大小相等、方向相反的平衡力矩,使系统隔离载体在惯性空间的扰动。同时,速度环反馈控制能够提高系统位置环响应的频带,增加位置环响应的快速性,从而改善光电探测器或成像系统的稳定和快速跟踪。实际应用中,微机电陀螺的低频噪声和随机漂移降低了其信号分辨率,即当陀螺感受的速度信号很小时,陀螺输出有用信号会淹没在噪声信号中,使得控制器增益降低,影响了伺服跟踪系统的稳定精度和跟踪性能^[2-3]。为使微机电陀螺获得更好的应用,必须对微机电陀螺噪声特别是低频噪声进行抑制,从而使采用微机电陀螺作为速度反馈器件的光电稳定跟踪装置获得更高精度。

2 陀螺噪声对光电稳定跟踪装置的精度影响分析

光电稳定跟踪装置速率稳定回路控制器结构如图 1 所示。其中 ω_i 和 ω_o 分别表示速率稳定控制回路的指令输入和速度输出, ω_f 表示有陀螺测量得到的惯性角速率, ω_b 表示姿态干扰耦合到平台输出轴的角速率, ω_{noise} 表示陀螺噪声, K_f 表示陀螺增益(一般取 1), $G_v(s)$ 和 $G_o(s)$ 分别表示速率回路控制器和伺服电机的传递函数, K_{VS} 表示指令放大系数, K_{PWM} 表示 PWM 放大系数, u_d 表示干扰力矩。

在不考虑 ω_b 和 u_d 作用的前提下,由速率稳定回路的结构和梅逊公式知:

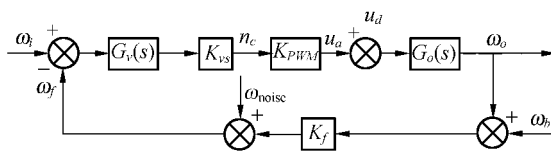


图 1 考虑陀螺噪声输入时的速率稳定回路框图
Fig. 1 Block diagram of control scheme of velocity-stabilized loop while exists gyro noise

$$\omega_o(s) = \frac{K_{VS}K_{PWM}G_v(s)G_o(s)}{1 + K_{VS}K_{PWM}K_fG_v(s)G_o(s)}\omega_i(s) = G_c(s)\omega_i(s), \tag{1}$$

其中

$$G_c(s) = \frac{K_{VS}K_{PWM}G_v(s)G_o(s)}{1 + K_{VS}K_{PWM}K_fG_v(s)G_o(s)}$$

$$G_o(s) = \frac{1/K_e}{(T_ms + 1)(T_s + 1)}$$

根据文献[4],可以认为 $G_c(s)$ 的频率特性为低通环节,一般速率稳定回路的截止频率 ω_{bw} 通常在 20 Hz 左右,谐振峰值 M_r 在 1.3 左右,如图 2 所示。因此可以认为 $G_c(s)$ 可以近似为一个典型的欠阻尼的二阶系统,即:

$$G_c(s) \approx \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \tag{2}$$

同样可求得速率陀螺噪声 ω_{noise} 到平台速率输出 ω_o 的传递函数为:

$$G_{cl}(s) = \frac{\omega_o(s)}{\omega_{noise}(s)} = -G_c(s), \tag{3}$$

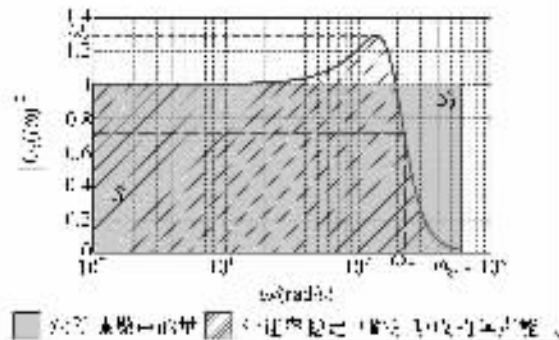


图 2 考虑陀螺噪声输入时的速率稳定控制回路频率特性图
Fig. 2 Frequency diagram of velocity-stabilized loop while exists gyro noise

由线性系统及随机过程的有关理论^[5]可知,线性系统的输出谱密度等于输入谱密度乘以系统的“功率增益因子 $|G(j\omega)|^2$ ”。设线性系统的输

入随机信号为 $x(t)$, 输出为 $y(t)$, 从 $x(t)$ 到 $y(t)$ 的闭环传递函数为 $G(s)$, 则系统的输出谱密度和输入谱密度的关系由下式给出:

$$\varphi_y(\omega) = |G(j\omega)|^2 \varphi_x(\omega), \quad (4)$$

输出均方差为

$$\bar{\varepsilon}^2 = R_y(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_y(\omega) d\omega, \quad (5)$$

微机电陀螺输出的噪声可以近似等效为一个带限的白噪声和一个缓慢变化的线性环节(零点漂移), 考虑其随机噪声的统计特性表示为:

$$R(\tau) = \sigma^2 \delta(\tau), \quad (6)$$

谱密度为

$$\varphi_x(\omega) = \sigma^2, \quad (7)$$

在白噪声作用下, 系统输出性能采用等效噪声带宽来表征。令 $s = j\omega$, 则式(2)可化为

$$G_c(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{(j\omega)^2 + 2\xi\omega_n(j\omega) + \omega_n^2}, \quad (8)$$

所以带限白噪声作用下系统输出角速度均方误差为:

$$\bar{\varepsilon}_V^2 = \int_{-\omega_{\text{gyro}}}^{+\omega_{\text{gyro}}} \varphi_y(\omega) d\omega = \int_{-\omega_{\text{gyro}}}^{+\omega_{\text{gyro}}} |G_c(j\omega)|^2 \varphi_x(\omega) d\omega, \quad (9)$$

其中, ω_{gyro} 表示微机电陀螺的带宽, 式(9)可进一步变成:

$$\bar{\varepsilon}_V^2 = \frac{\sigma^2}{\omega_{\text{gyro}}} \int_{-\omega_{\text{gyro}}}^{+\omega_{\text{gyro}}} \frac{\omega_n^4}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega_n^2 \omega^2} d\omega, \quad (10)$$

速率稳定回路的等效角速率噪声带宽为:

$$\omega_b = \int_{-\omega_{\text{gyro}}}^{+\omega_{\text{gyro}}} \frac{\omega_n^4}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega_n^2 \omega^2} d\omega, \quad (11)$$

同理可得噪声对系统角度输出的影响, 其传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{\omega_{\text{noise}}(s)}{\theta(s)} = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)}, \quad (12)$$

输出角度均方误差为:

$$\bar{\varepsilon}_p^2 = \sigma^2 \int_{-\omega_{\text{gyro}}}^{+\omega_{\text{gyro}}} |G_p(j\omega)|^2 d\omega, \quad (13)$$

由式(10)和(13)可以看出, 经过适当的简化和近似之后, 陀螺噪声对系统角速度和角度输出的影响受控于陀螺带宽 ω_{gyro} 、速率环转角频率 ω_n 及阻尼系数 ξ 的综合作用。由图 3 可知, 由于陀螺噪声的存在, 引起平台输出轴的抖动, 其统计特征与陀螺噪声基本上处于相同的数量级。而且由于噪声的存在, 会引起平台角度的缓慢漂移。另外, 由于陀螺的噪声并非严格意义上的带限白噪

声, 而是集中于低频段, 所以, 实际陀螺噪声对系统的影响要比式(10)和(13)给出的结果稍大。

假设某速率稳定回路的参数如下:

$$\omega_n = 20 \text{ Hz} = 20 * 2 * \pi \text{ rad/s}, \xi = 0.513 \text{ (对}$$

应谐振峰 $M_r = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} = 1.1$), $\omega_{\text{gyro}} = 2 * \omega_n$, 则

$$\bar{\varepsilon}_V^2 = \frac{\omega_b}{\omega_{\text{gyro}}} \sigma^2 = \frac{132.734}{80 * \pi} \sigma^2 = 0.5381 \sigma^2.$$

按照以上参数, 取陀螺噪声的功率谱的幅度值为 0.000 1, 在 SIMULINK 中仿真得到的结果如图 3 所示。其中, 陀螺噪声均方差为 $\sigma^2 = 0.009 9 (\text{°/s})^2$, 电机输出转速的均方差 $\bar{\varepsilon}_V^2 = 0.005 4 (\text{°/s})^2$, $\frac{\sigma^2}{\bar{\varepsilon}_V^2} = 0.546 2$; $\bar{\varepsilon}_p^2 = 0.002 5 (\text{°})^2$, $|\theta_{\text{max}}| = 0.225 4 (\text{°}) \approx 4 \text{ mrad}$, 可以看出, 仿真结果与式(10)计算的结果基本吻合。

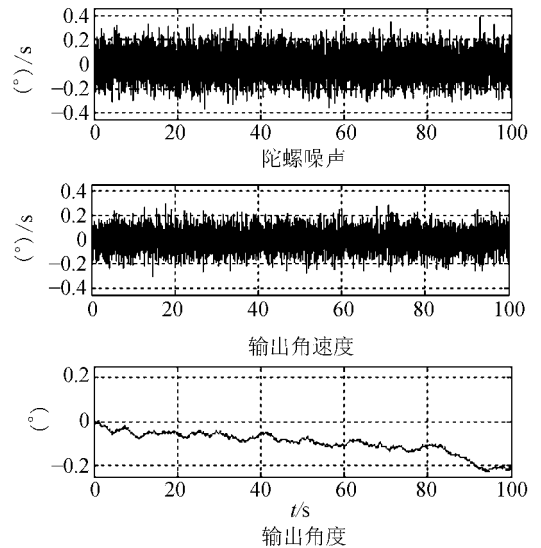


图 3 陀螺噪声输入下的平台响应

Fig. 3 Platform response under the gyro noise input

对于高精度的光电稳定装置来说, 由于难以消除这样的抖动和漂移的影响, 往往引起装置的性能下降。为使采用微机电陀螺的光电稳定跟踪平台达到较高的精度, 必须对陀螺的噪声特别是低频噪声进行有效抑制, 因此, 研究高效的陀螺去噪算法具有实际意义。

3 微机电陀螺输出噪声分析及统计特性建模

微机电陀螺的输出噪声由两部分组成。陀

螺内部的电子线路部分会在陀螺的输出叠加一定的噪声,此外还有漂移误差(包括系统漂移误差和随机漂移误差),电源噪声干扰和各种半导体器件热噪声形成的噪声,这部分噪声称为微机电陀螺的本征噪声,主要集中在输出信号的低频段。另一部分是陀螺信号的传输、采集过程中引入的测量噪声,这部分噪声为能量均匀分布于各频段的高斯白噪声。微机电陀螺的零点信号(角速度为零时的陀螺输出信号)能够较好的反映其噪声特性,故本文以该信号为算法验证对象。图 4 为国内某公司生产的固态角速率陀螺零点输出信号波形,采样频率为 250 Hz,采样时间为 16 s。该陀螺的刻度系数为 100 mV/s。把采样值换算成度/秒的单位后做 FFT 变换得到如图 4 所示的噪声单边功率谱密度。由图可知,在信号的低频段,陀螺的本征信号占主导地位,高频段主要为测量噪声。

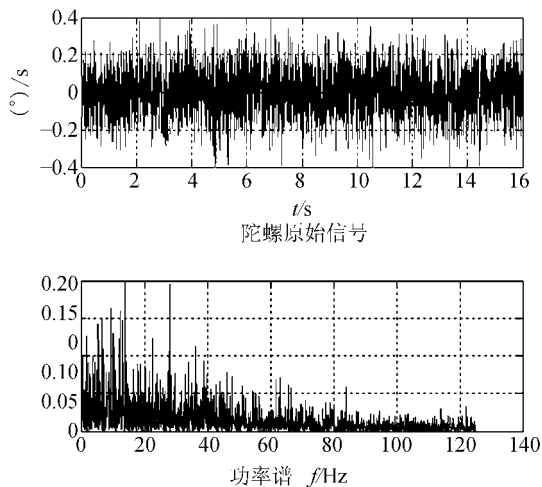


图 4 陀螺零位噪声及其功率谱密度

Fig. 4 Zero noise of gyro and its PSD chart

微机电陀螺的零点漂移是一个非平稳随机过程,陀螺输出噪声一般可用 AR 模型^[6]来描述,AR(n)模型的一般表达式为:

$$x(k) = \sum_{i=1}^n a_i x(k-i) + \omega(k), \quad (14)$$

建立陀螺输出信号的二阶自回归模型 AR(2),其模型结构为:

$$x(k) = a_1 x(k-1) + a_2 x(k-2) + \omega(k), \quad (15)$$

其中 a_1 和 a_2 是无量纲的系数; $x(k)$ 为 AR(2)模型的输出; $\omega(k)$ 为噪声序列,其方差 σ_ω^2 的估计式

为:

$$\hat{\sigma}_\omega^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{k=3}^N \omega_k^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{k=3}^N (x(k) - a_1 x(k-1) - a_2 x(k-2))^2, \quad (16)$$

4 基于 Kalman 滤波的去噪方法研究

Kalman 滤波使用的前提是假定陀螺零点噪声为白噪声,系统的状态设定为:

$$\text{状态方程: } X_k = \Phi X_{k-1} + H W_k,$$

其中,

$$\Phi = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$X_k = \begin{bmatrix} x(k) \\ x(k-1) \end{bmatrix}, \quad \omega_k = \begin{bmatrix} \omega(k) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

设 V_k 为测量噪声序列,则系统的输出方程为:

$$Z_k = C X_k + V_k \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (17)$$

其中, $C = [1 \quad 0]$, X_k 是以 AR 模型辨识误差为特征的白噪声序列(称作过程噪声序列),作为 AR 模型输入所得到的真值序列, Z_k 即为陀螺测量值, V_k 是测量噪声。

假设噪声序列 V_k 、 W_k ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$) 的统计特性是均值为零,即 $E(V_k) = E(W_k) = 0$;

对于前面所给出的系统方程, Kalman 滤波的递推算式为:

$$\text{状态一步预测: } \hat{X}_{k|k-1} = \Phi \hat{X}_{k-1};$$

协方差阵一步预测:

$$P_{k|k-1} = \Phi P_{k-1} \Phi^T + H Q_k H^T;$$

滤波增益:

$$K_k = P_{k|k-1} C^T (C P_{k|k-1} C^T + R_k)^{-1};$$

$$\text{协方差阵估计: } P_k = (I - K_k C) P_{k|k-1};$$

$$\text{状态估计: } \hat{X}_k = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Z_k - C \hat{X}_{k|k-1});$$

$$\text{系统输出: } Z_k = C \hat{X}_k, \quad (18)$$

将前述零漂数据作为上面 Kalman 滤波器的输入(Z_k),经计算得到滤波后输出曲线如图 5 所示。

由图可见,滤波后陀螺零位信号的高频噪声基本被消除,其标准偏差由原来的 0.176 3/s 降低到了 0.071 2/s,降低了 7.9 dB,起到了一定抑噪效果。同时,由滤波后陀螺零位信号的噪声功

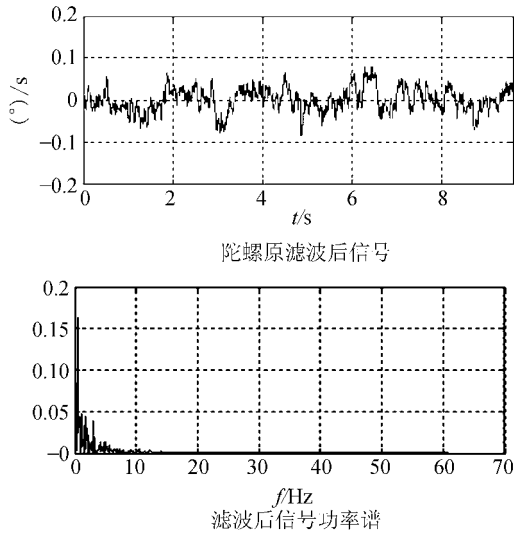


图 5 Kalman 滤波去噪结果

Fig. 5 Denoising results of gyro with Kalman filter

率谱可知 Kalman 滤波没有对陀螺信号的低频噪声特别是 5 Hz 以下噪声起到较好的抑制作用。而 0~5 Hz 频段是伺服系统速度环工作的主要频段,即微机电陀螺感受载体扰动信号的主要频段,为使伺服系统达到较高稳像精度,必须研究对陀螺低频噪声具有良好抑制效果的滤波方法。

Kalman 滤波去噪效果的好坏取决于对噪声精确建模程度,即噪声方差 σ^2 的估计值。由上节微机电陀螺噪声特性分析知,其噪声由低频段的本征噪声及均匀分布于各频段的测量噪声两部分组成。AR 模型建立的噪声模型不能够同时精确描述微机电陀螺的本征噪声和测量噪声的统计特性。AR 模型建立的噪声模型更多地描述了测量过程中引入的高斯白噪声的统计特性。将主要分布于低频段的陀螺本征噪声看作有用信号而导致对其建模程度不够,从而导致 Kalman 滤波未能对陀螺的低频噪声进行有效抑制。对噪声模型的过分依赖使得 Kalman 滤波在微机电陀螺噪声抑制中的应用受到限制。

5 基于阈值决策的小波去噪方法研究

小波变换具有良好的时频分辨特性,基于小波变换的信号去噪方法在实际应用中取得了较好的效果^[7]。其原理是通过浮动阈值将大部分噪声及接近噪声强度的小波系数均视为零而舍去,效果类似于将信号原有的能量压缩或集中到少数几

个大振幅的小波系数上。本节将基于阈值决策的小波去噪方法应用于微机电陀螺去噪中,该方法不依赖于对噪声的精确建模。根据噪声在不同频段内(小波空间)的分布特性,采用阈值滤波,在信号的低频段采用大阈值,能够有效去除微机电陀螺本征噪声的干扰。这里只介绍基于阈值决策的小波去噪思想,有关小波变换的内容请参考文献[8],这里不再赘述。

微机电陀螺输出信号有如下表示形式:

$$Y(n) = X(n) + V(n), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (19)$$

其中 $V(n)$ 为微机电陀螺噪声信号,方差为 δ^2 , N 为信号的采样点数。

小波阈值去噪过程分为如下 3 步:

(1) 对 $Y(n)$ 进行 M 层小波分解,得到第 j 层小波系数表示式为 $Y(j, k)$, $j = 1, 2, \dots, M$;

(2) $T_d(j)$ 为第 j 层小波空间的阈值,令经阈值处理后的小波系数为 $\hat{Y}(j, k)$, 则有

$$\hat{Y}(j, k) = \begin{cases} \text{sgn}(Y(j, k))(|Y(j, k) - T_d(j)|, |Y(j, k)| \geq T_d(j) \\ 0, & \text{其它} \end{cases}, \quad (20)$$

(3) 对 $\hat{Y}(j, k)$ 及尺度系数进行重构,即可完成去噪,得到有用信号的估计值 $\hat{X}(n)$ 。

下面讨论不同小波空间滤波阈值的取法,令噪声序列 $V(n)$ 在小波域尺度上的方差表达式为 $\delta(m)$ 。

在实际小波计算中,将原始离散数据序列 $V(n)$ 视为一连续函数在尺度 2^0 上的离散子波值,即 $S(0, n) = V(n)$ 。其中 $S(0, n)$ 表示第零级尺度信号。

记 $W(m, n)$ 的傅里叶变换为 $\hat{W}(m, \omega) = \hat{W}(2^m \omega)$ 。由离散小波分解和重构定理得:

$$\hat{W}(m, n) = \hat{G}(2^{m-1} \omega) S(2^{m-1} \omega), \quad (21)$$

$$\hat{S}(m, \omega) = \hat{S}(2^m \omega) = \hat{H}(2^{m-1} \omega) \hat{S}(2^{m-1} \omega), \quad (22)$$

其中 \hat{H} 是多尺度空间中低通滤波器的傅里叶变换, $G(\omega) = e^{-j\omega} H(\omega + \pi)$ 为高通滤波器的傅里叶变换。由式(21)和式(22)得:

$$\hat{W}(m, n) = \hat{G}(2^m \omega) \hat{H}(2^{m-1} \omega) \cdots \hat{H}(2^0 \omega) \hat{S}(2^0 \omega) = \left[\prod_{i=0}^{m-2} \hat{H}(2^i \omega) \right] \hat{G}(2^{m-1} \omega) \hat{V}(\omega), \quad (23)$$

求式(23)功率谱的数学期望有:

$$E[|\hat{W}(m, n)|^2] =$$

$$\left[\prod_{i=0}^{m-2} |\hat{H}(2^i \omega)|^2 \right] |\hat{G}(2^{m-1} \omega)|^2 \delta^2 / 2\pi, \quad (24)$$

于是得到原始噪声传播到 2^m 个尺度后的噪声水平方差 $\delta(m)$ 为:

$$\delta(m) = \left\| \left(\prod_{i=0}^{m-2} * H_i \right) * G_{m-1} \right\|_F \delta, \quad (25)$$

其中 $*$ 表示卷积, H_i 表示 H 的 2^i 尺度膨胀, G_{m-1} 表示 G 的 2^{m-1} 尺度扩张, $\| \cdot \|_F$ 为范数。

根据文献[9],有

$$E \| \hat{Y}(j, k) - Y(j, k) \| \leq \delta(j) n \sqrt{2 \ln(n)}, \quad (26)$$

式(26)表示当 $|Y(j, k)| \leq \delta(j) n \sqrt{2 \ln(n)}$ 时, $Y(j, k)$ 为由噪声引发,因而第 j 层小波空间的滤波阈值为

$$T_d(j) = \left\| \left(\prod_{i=0}^{j-2} * H_i \right) * G_{j-1} \right\|_F \delta \sqrt{2 \ln(n)}, \quad (27)$$

采用 db4 对称小波,对同一组微机电陀螺的零点输出信号进行 8 层分解。各小波空间的滤波阈值按上述推导的公式选取。经计算得到 1~8 小波空间的滤波阈值为:

{0.012, 0.013, 0.014, 0.015, 0.015, 0.015, 0.016, 0.021}。适当增大低频段(第 8 小波空间)的阈值,增加对陀螺低频段本征信号的抑制能力。滤波后信号及其功率谱如图 6 所示。由图可知,自适应阈值滤波不但较好地滤除了高频段噪声,低频段陀螺的本征噪声也得到了较好的抑制。需要指出的是,在算法验证过程中发现小波分解层

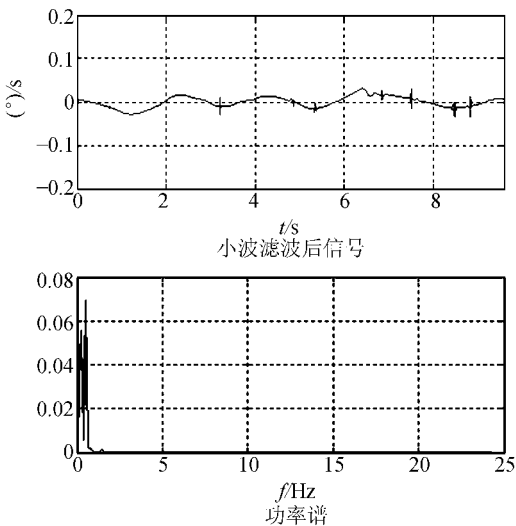


图 6 阈值决策小波去噪法滤波结果

Fig. 6 Denoised signal of MEMS gyro with wavelet transform

数对最后的滤波效果有较大影响。有关阈值滤波分解层数的相关理论可参考文献[10]。表 1 为去噪前后陀螺信号统计特征表。

图 7 为利用上述小波阈值和 Kalman 滤波器对微机电陀螺的 0.5 Hz 的动态信号进行去噪的结果。由滤波前后信号的统计特性知, Kalman 滤波和基于阈值决策的小波去噪方法都能够对微机械陀螺的噪声信号起到抑制作用,滤波后噪声能量(标准差)都有不同程度的减少。Kalman 滤波由于没有得到能够反映陀螺低频段本征噪声的精确模型,故对陀螺的低频噪声没有起到较好的抑制作用。基于阈值决策的小波去噪方法不过分依赖噪声模型,通过合理设置不同小波空间的滤波阈值,如在陀螺本征噪声占主导地位的低频段采用大阈值滤波,能够对微机电陀螺的噪声起到较好的抑制作用,仿真结果表明小波阈值滤波后的噪声能量比没经过滤波及经过 Kalman 滤波后的噪声能量低一个数量级。由第一节分析结论知,小波消噪后,平台的抖动及漂移误差比没有经过消噪处理及经 Kalman 滤波消噪后平台的抖动及漂移误差小一个数量级。在实际工程应用中, Kalman 滤波算法简单,具有较好的实时性,其算法容易在通用 DSP 芯片如 TI 公司 TMS3202407 中实现。基于小波阈值去噪算法较复杂,实时性稍差,具有相位滞后,其实现可采用专用小波算法芯片,目前国内已有相关芯片问世。

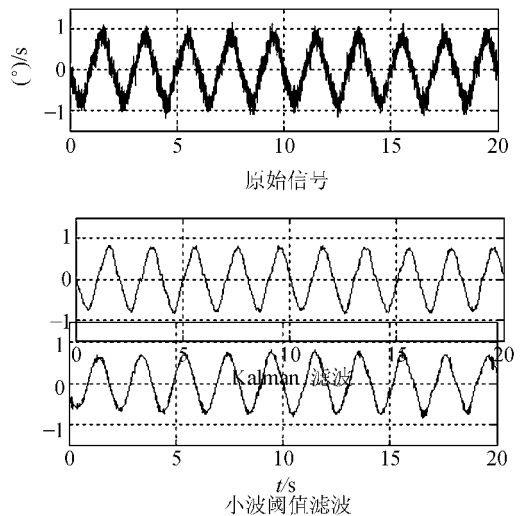


图 7 微机电陀螺动态信号滤波结果

Fig. 7 Denoised dynamic trend signals of MEMS gyro

表 1 微机电陀螺零位信号去噪前后统计特性对照表(单位:°/s)

Tab.1 Statistic features of QRS signals(°/s)

	原始信号	Kalman	小波阈值
均值	5.6175×10^{-13}	5.6213×10^{-4}	1.6988×10^{-15}
标准差	1.763×10^{-1}	6.75×10^{-2}	1.6053×10^{-2}

6 结 论

微机电陀螺低频噪声及随机漂移影响了其在高精度光电稳定跟踪系统中的应用。本文研究了速率稳定回路中平台输出和陀螺噪声的统计特

征之间的关系,研究结果表明陀螺噪声的存在会引起平台输出轴的抖动和角度的漂移。根据微机电陀螺的噪声特点,基于 AR 模型建立了噪声统计模型。研究了基于 Kalman 滤波的陀螺信号去噪方法,并分析了其不能够抑制陀螺低频噪声的原因。在此基础上,将基于阈值决策的小波去噪方法运用于微机电陀螺的信号滤波中,仿真实例说明了该方法的有效性和优越性。本文所做工作对微机电陀螺在高精度光电稳定跟踪平台中的实际应用具有一定参考意义。

参考文献:

- [1] 刘危,谢旭辉,李圣怡. 微机械惯性传感器的技术现状及展望[J]. 光学 精密工程,2003,11(5):425-431.
LIU W, XIE X H, LI SH Y. Present state and perspectives of micromachined inertial sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003,11(5):425-431. (in Chinese)
- [2] 孟中,张涛. 降低动力调谐陀螺输出噪声的方法[J]. 光学 精密工程,2002,10(4):420-424.
MENG ZH, ZHANG T. Method used in the suppression of DTG output noise[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(4):420-424. (in Chinese)
- [3] 郭立红,朱玮,李岩. 基于卡尔曼滤波技术解算惯导的水平偏差[J]. 光学 精密工程,2003,11(4):379-383.
GUO L H, ZHU W, LI Y. Using Kalman filter technology establishment of attitude and courses for measurement ship inertial navigation system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003,11(4):379-383. (in Chinese)
- [4] 富兰克林. 动态系统的反馈控制(第四版)[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
FRANKLIN G F. *Feedback control of dynamic systems (Fourth Edition)*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. (in Chinese)
- [5] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
GAO J ZH. *Feebleness signal check*[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2004. (in Chinese)
- [6] 杨叔子,吴雅. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1991.
YANG SH Z, WU Y. *Application and study of time series analysis*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press,1991. (in Chinese)
- [7] LANG M, GUO H. Noise reduction using an undecimated discrete wavelet transform[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1996,3:613 - 627.
- [8] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京:科学出版社,1999.
PENG Y H. *Application of wavelet transform*[M]. Beijing: Science Press,1999. (in Chinese)
- [9] 潘泉,戴冠中,张洪才. 基于阈值决策的子波域去噪方法[J]. 电子学报,1998,26(1):115-117.
PAN Q, DAI G Z, ZHANG H C. A threshold selection method for hard-threshold filter algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998,26(1):115-117. (in Chinese)
- [10] 张吉先,钟秋海,戴亚平. 小波门限消噪法应用中分解层数及阈值的确定[J]. 中国电机工程学报,2004,24(2):118-122.
ZHANG J X, ZHONG Q H, DAI Y P. The determination of the threshold and the decomposition order in threshold denoising method based on wavelet transform[J]. *Chin. Soc. for Elec. Eng.*, 2004,24(2):118-122. (in Chinese)
- [11] 柳贵福,张树侠. 光纤陀螺零漂数据滤波方法的研究[J]. 中国惯性技术学报,2001,4:66-69.
LIU G F, ZHANG SH X. Investigation on filter methods of fiber optic gyro drift data [J]. *Journal of Chinese In-*

ertial Technology, 2001, 9(4):66-69. (in Chinese)

- [12] 苏岩,王寿荣,周百令. AR 模型在动力调谐陀螺仪漂移补偿中的应用[J]. 中国惯性技术学报,1997,3:24-28.
SU Y, WANG SH R,ZHOU B L. Application of AR model to drift compensation of the dynamically tuned gyro (DTG)[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 1997,5(3):24-28. (in Chinese)

作者简介:张文博(1979—),男,国防科学技术大学机电工程与自动化学院博士研究生,研究方向为光电稳定跟踪装置伺服系统控制方法及其陀螺信号处理研究。zhangwenbo/8g@sina.com