

文章编号 1004-924X(2002)04-0420-05

# 降低动力调谐陀螺输出噪声的方法

孟中, 张涛

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 视轴 Line of sight (LOS) 抖动量的大小直接影响到陀螺稳定平台的性能, 引起该抖动的主要原因之一是系统中动力调谐陀螺 Dynamically tuned gyro (DTG) 的输出噪声。通过对动力调谐陀螺输出噪声的分析, 选用 Kalman 滤波方法来降低陀螺的输出噪声。仿真实验表明, 所采用的方法可降低噪声 4.7 dB, 滤波是合理有效的。

关键词: 视轴; 动力调谐陀螺; 陀螺稳定平台; 输出噪声; Kalman 滤波  
中图分类号: V241.5 文献标识码: A

## 1 引言

动力调谐陀螺 (Dynamically tuned gyro 缩写为 DTG) 以其结构简单、成本低廉、体积小等优点广泛应用于光电跟踪陀螺稳定平台。要达到较高的跟踪精度和稳定精度, 视轴的抖动量必须要减小到一定程度。本文从噪声的分析入手, 针对常用的低通滤波器的不足, 采用了 Kalman 滤波对陀螺的输出噪声进行处理, 取得了一定效果。

## 2 陀螺输出噪声的分析

对整个动力调谐陀螺来说, 陀螺内部的电子线路部分 (如相敏整波、解耦电路等) 会在陀螺的输出迭加一定的噪声, 此外还有漂移误差 (包括系统漂移误差和随机漂移误差)、开关电源交流干扰、触点火花干扰以及各种半导体器件热噪声形成的噪声。

为了直观地分析该噪声, 取动力调谐陀螺理想输出为零时输出的模拟噪声 (即零位噪声, 如图 1) 作为研究对象。为了对该噪声进行数字处理, 通过 1 KHz 的采样频率采样, 得到噪声数据序列, 对其中一组噪声数据样本进行 FFT 变换得到如图 2 所示的噪声单边功率谱密度。可见, 陀螺输出噪声主要集中在低频段。一般地, 采用低通滤波器仅能滤掉其截止频率 (伺服系统中一般设计

为 40Hz) 以上部分能量的噪声, 还有相当能量的低频噪声无法滤除。所以, 应从其它角度选用相

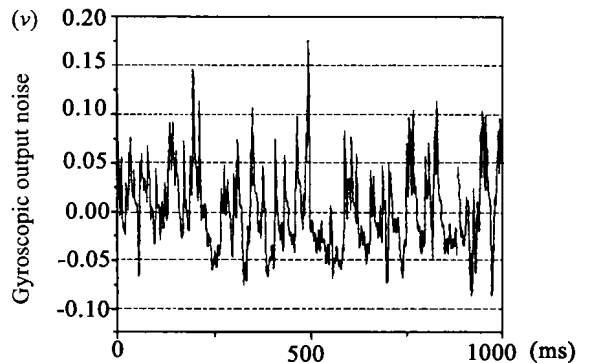


图 1 DTG 的模拟输出噪声

Fig. 1 Analog DTG output noise.

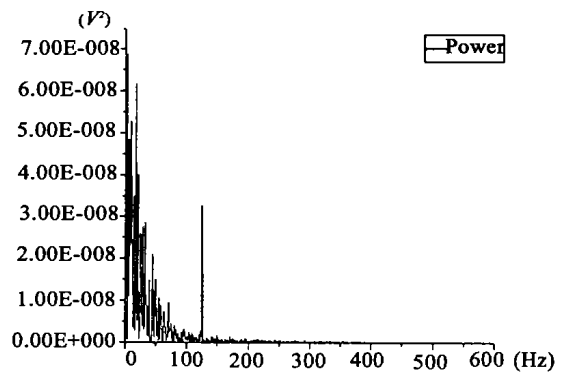


图 2 DTG 输出噪声的功率谱

Fig. 2 Power spectra of DTG output noise.

应的滤波方法对输出噪声进行处理。文献[2]、[3]指出,处理陀螺的零位噪声可以采用 Kalman 滤波,这样可以将噪声对系统的影响降至很小。

### 3 降低陀螺输出噪声的统计滤波方法 - Kalman 滤波

#### 3.1 噪声的数学模型

应用 Kalman 滤波前,需要对陀螺的噪声信号进行建模。实践表明,动力调谐陀螺的输出噪声模型可以用 AR(1) 模型(即一阶自回归模型)来拟合。AR(1) 模型结构为<sup>[2]</sup>:

$$x(k) = ax(k - 1) + w(k - 1), \quad (1)$$

其特点是:随机过程在  $k$  时刻的观测值  $x(k)$  仅与相邻的前一时刻的观测值  $x(k - 1)$  存在相关性,而与  $k - 1$  时刻之前的观测值均不存在相关性。这里,

$$a = \frac{R_1}{R_0}, R_1 = R(k - 1, k),$$

$$R_0 = R(k - 1, k - 1), \quad (2)$$

其中  $R_1$  为  $k - 1$  与  $k$  时刻的自相关函数,  $R_0$  为  $k - 1$  时刻的自相关函数。

$w(k)$  为白噪声序列,其方差  $\sigma_w^2$  的估计式为:

$$\hat{\sigma}_w^2 = (1 - a^2) / \sqrt{N}, \quad (3)$$

其中  $a$  为尤尔-沃克(Yule-walker)方程的系数,  $N$  为噪声采样序列的样本容量。实验中,由于  $N$  很大,  $\hat{\sigma}_w^2$  一般很小。

#### 3.2 Kalman 滤波公式

对于建立好的 AR(1) 模型,进一步得到标量 Kalman 滤波公式,如(4)所示,其中  $\hat{x}(k)$  为陀螺输出在最小均方误差准则下的最优估计值,即 Kalman 滤波器的输出。

$$\hat{x}(k) = a\hat{x}(k - 1) + b(k)[x_i(k) - a\hat{x}(k - 1)], \quad (4)$$

设滤波器的输入为陀螺输出的观测值:  $x_i(k) = cx(k) + v(k)$ ,其中  $v(k)$  为量测噪声,其方差记为  $\sigma_v^2$ 。

可以推出,滤波均方估计误差序列为<sup>[6]</sup>:

$$P(k) = \frac{1}{c} \sigma_v^2 b(k), \quad (5)$$

滤波增益序列为:

$$b(k) = \frac{a^2 P(k - 1) + \sigma_w^2}{\sigma_v^2 + \sigma_w^2 + a^2 P(k - 1)}, \quad (6)$$

### 4 仿真结果及分析

对噪声序列进行 AR(1) 拟合得到  $a = 0.99$ , 实验中,  $E[w(k)]^2 = \sigma_w^2 = 10^{-5}$ ,  $E[v(k)]^2 = \sigma_v^2 = 0.0018$ 。选择  $\hat{x}(0) = 0$ ,  $b(1) = 0.6$ , 则  $P(1) = \frac{1}{c} \sigma_v^2 b(1) = 0.6 \sigma_v^2$ 。当仿真步数  $N = 2000$  ( $T = 2\text{ms}$ ) 时,滤波增益稳态值 0.0718。选择一组零位噪声作为滤波器输入时,得到 Kalman 滤波器的输入输出对比结果如图 3、图 4 所示。

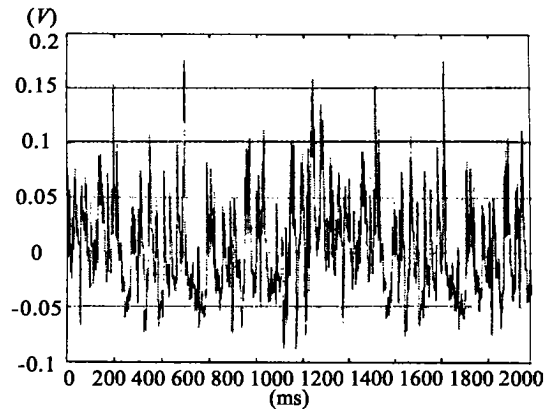


图 3 DTG的零位噪声

Fig. 3 Noise of DTG output ( $V_{\text{input}} = 0$ ).

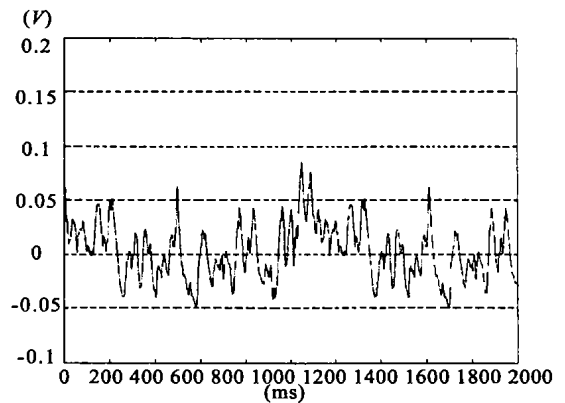


图 4 经过 Kalman 滤波后的 DTG 输出

Fig. 4 DTG output after Kalman filtering.

可见滤波后陀螺零位噪声虽然没有完全消除,但是其标准偏差由原来的 0.043V 降为

0.025V, 噪声幅值降低了约 42%, 滤波是有效合理的。当陀螺作速率反馈元件使用时, 设陀螺的真实输出是频率为 1Hz 的低频正弦信号, 分别得到在陀螺输出信号振幅为 0.1V 和 1V 时滤波器的输出值。分别如图 5 - 图 8 所示。

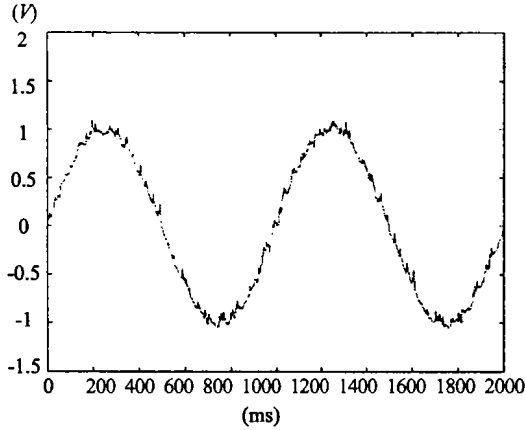


图 5 DTG的实际输出(振幅为 1V)  
Fig. 5 Actual output of DTG ( $|X|_{\max} = 1V$ ).

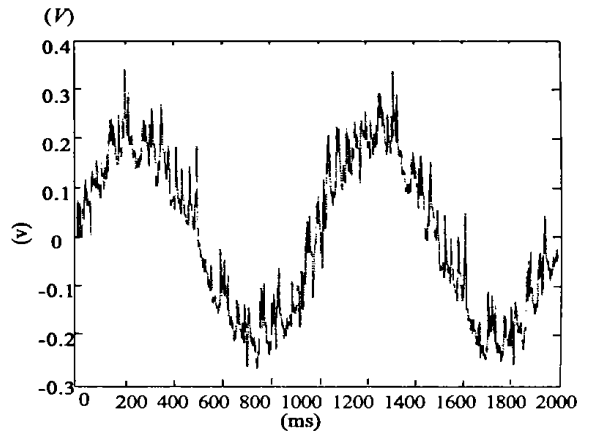


图 7 DTG的实际输出(振幅为 0.1V)  
Fig. 7 Actual output of DTG ( $|X|_{\max} = 0.1V$ ).

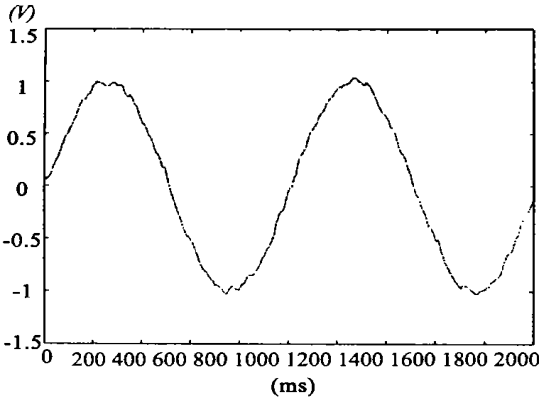


图 6 经过 Kalman 滤波后的 DTG 输出  
Fig. 6 DTG output after Kalman filtering.

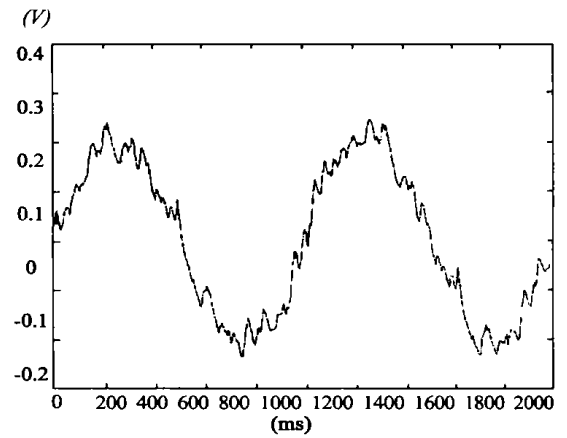


图 8 经过 Kalman 滤波后的 DTG 输出  
Fig. 8 DTG output after Kalman filtering.

实验中陀螺的标度系数为  $100 \text{ mV} / (\text{o/s})$ , 由图 5、图 6 可以看出, 在最高速处(此时陀螺敏感的最高速度为  $10 (\text{o/s})$ ) 的滤波效果是不错的, 此时的信噪比约为 27dB; 由图 7、图 8 可以看出, 在低速情况下(此时陀螺敏感的最高速度为  $1 (\text{o/s})$ ) 的滤波效果不如高速时好, 此时的信噪比约为 7dB 左右。

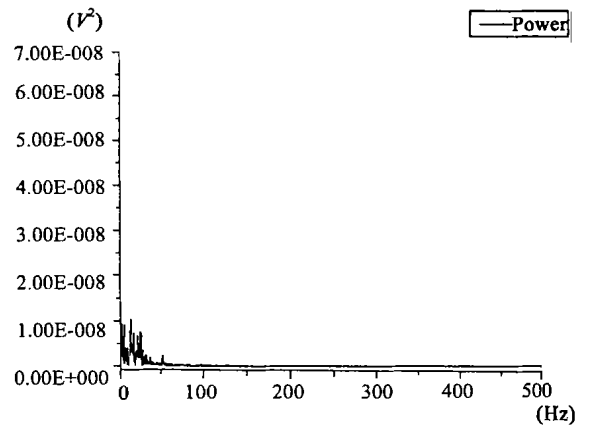


图 9 低通滤波后的功率谱  
Fig. 9 Power spectra after lowpass.

图 10 为陀螺零位噪声经过 Kalman 滤波处理后的功率谱,与图 2 对比可以看出, Kalman 滤波在某种程度上起到了一定的低通滤波作用。与仅经过低通滤波的零位噪声功率谱(如图 9)相比, Kalman 滤波将低通滤波无法滤除的低频噪声做了更进一步的滤除。

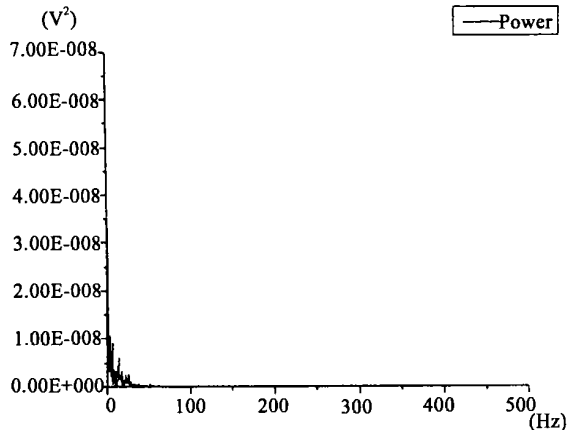


图 10 Kalman 滤波后的功率谱

Fig. 10 Power spectra after Kalman filtering.

实际中,一般系统都对陀螺的输出加低通滤波。这样,有的系统中陀螺输出噪声采样值本身就经过了低通滤波处理。对此,本文亦对低通滤波和 Kalman 滤波前后组合的混合滤波方法做了仿真,得到图 11 所示的零位噪声功率谱。可以看出,零位噪声又有一定程度的衰减,但不明显。一般地,各种滤波都在某种程度上压低了伺服系统的带宽,可以考虑不采用低通滤波,而直接采用 Kalman 滤波进行处理。

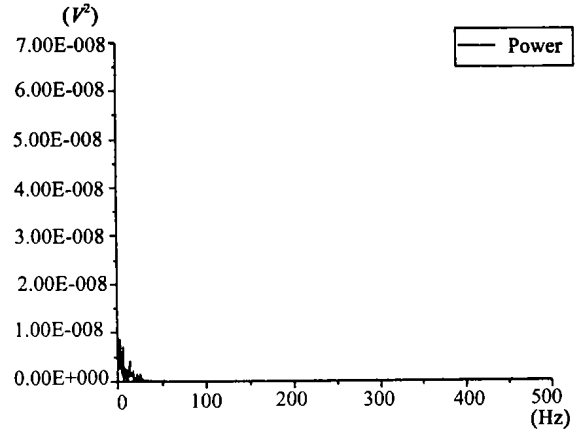


图 11 低通和 Kalman 混合滤波后的功率谱

Fig. 11 Power spectra after lowpass and Kalman filtering.

## 5 结 论

对动力调谐陀螺的输出进行滤波时,采用 Kalman 滤波能有效降低陀螺的输出噪声。低通滤波后陀螺零位噪声的标准偏差约为  $0.031\text{V}$ ,比原来降低了约  $2.8\text{dB}$ ; Kalman 滤波后标准偏差为  $0.025\text{V}$ ,比原来降低了约  $4.7\text{dB}$ ;经过二者混合滤波后标准偏差为  $0.022\text{V}$ ,比原来降低了约  $5.8\text{dB}$ 。可见,选用 Kalman 滤波是有效合理的。

需要指出的是,该结论是在仿真的基础上得出的,在实际系统中采用 Kalman 滤波还有待于进一步检验。

## 参考文献:

- [1] 郭尚来. 随机控制[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- [2] 郭秀中. 惯性系统陀螺仪理论[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
- [3] Algrain M C, Ehlers D E. Suppression of gyroscope noise effects in pointing and tracking system[J]. *SPIE*, 1994, 2221: 402 - 403.
- [4] Royalty J M B. Gimbal rate loop electrical noise: how much can you stand[J]. *SPIE*, 1993, 1950: 234 - 241.
- [5] 姜建国,曹建中,高玉明. 信号与系统分析基础[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
- [6] 蒋志凯. 数字滤波与卡尔曼滤波[M]. 北京:中国科学技术出版社,1993.
- [7] 付梦印,钟秋海. 现代控制理论与应用[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [8] 史维祥,尤昌德. 系统辨识基础[M]. 上海:上海科学技术出版社,1988.
- [9] 葛文奇. 机载光电平台的稳定与跟踪控制系统研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2000.

## Method used in the suppression of DTG output noise

MENG Zhong , ZHANG Tao

( Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics ,  
Chinese Academy of Sciences , Changchun 130022 , China)

**Abstract :** The jitter in line-of-sight (LOS) can result in the degraded performance of a gyro stabilized platform directly. And one of the main reasons leading to the jitter is the output noise from the dynamically tuned gyro (DTG). Analyzing the characteristics of DTG output noise , it is available for us to suppress the DTG output noise by applying Kalman filtering algorithm. The simulation results have shown that the output noise is suppressed by 4.7dB with Kalman filtering effectively.

**Key words :** LOS;DTG;gyro stabilized platform ;output noise ; Kalman filtering

作者简介:孟 中(1975 - ) ,男,吉林省长春市人,中科院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生,主要从事陀螺稳定控制技术的研究。

## 中国光学与应用光学文摘

《中国光学与应用光学文摘》(双月刊)是由中科院文献情报中心、中科院光学情报网和中科院长春光学精密机械与物理研究所联合主办,经国家科委批准的国家一级检索期刊。该刊主要收集我国科研人员在国内外期刊中发表的有关光学、光电子学以及光学在各领域的应用等方面的论文,国内召开的有关会议论文和国内有关部门的学位论文。该刊 1985 年创刊,现全部以文摘形式报道国内光学领域的最新研究成果与进展。每期报道文献 750 篇。

2001 年《中国光学与应用光学文摘》仍通过邮局发行,邮发代号:12 - 140,定价 9.00 元/期,订阅本刊的新老订户可去邮局订阅该刊,在邮局漏订或想补订该刊的订户,可随时与《中国光学与应用光学文摘》编辑部联系,银行汇款与邮局汇款皆可。

单 位:中科院长春光学精密机械与物理研究所《中国光学与应用光学文摘》编辑部

邮 编:130021

银 行:中行吉林省分行营业部

账 户:04 单位 438 部

账 号:01471908091001

地 址:吉林省长春市工农大路 61 号

联系人:杨妹清

电 话:(0431)5684692 转 2438

E-mail:xxfw @ciomp. ac. cn