

文章编号 1004-924X(2010)06-1381-06

应用有限冲击响应滤波器消除星敏感器星像噪声

王新升¹, 李葆华², 郑 靖³

- (1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;
2. 哈尔滨工业大学 空间控制与惯性技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:从图像处理的角度研究了提高星像坐标定位精度的方法。分析了星像噪声产生的原因,对去噪声前的星像坐标进行了频谱特性分析,根据分析结果,提出了一种基于 Parks-McClellan 算法的滤波器最优设计方法来设计有限冲击响应滤波器(FIR 滤波器)。分析了通过该 FIR 滤波器后星像坐标的功率谱曲线。结果显示,该 FIR 滤波器能很好地消除星像噪声。最后,采用某型号卫星星敏感器原理样机的地面观星数据进行实验验证,结果表明,星敏感器输出姿态精度由原来的 21.921" 提高到了 7.823"。

关键词:星敏感器;星像坐标精度;FIR 滤波器;星像质心;除噪

中图分类号:V448.22 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101806.1381

Elimination of noises of star locations in star images based on FIR filter

WANG Xin-sheng¹, LI Bao-hua², ZHENG Jing³

- (1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Research Center of Space Control and Inertial Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
3. Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A method to improve the accuracy of star locations in star images is presented based on image processing. The reasons for generating noises in star locations are researched, and a frequency spectrum of a star location before denoising is analyzed. Based on the analyzed results, a Finite Impulse Response (FIR) filter is designed and realized based on the Parks-McClellan algorithm. Finally, the spectra of the star locations obtained from the star images are analyzed with the FIR filter, and the results show that the FIR filter could eliminate the noises of star locations well. The algorithm is successfully demonstrated by real space experiment data captured by a star sensor in a satellite. The experimental results show that the accuracy of attitude has improved to 7.823" from 21.921".

Key words: star sensor; accuracy of star location; Finite Impulse Response (FIR) filter; star centroid; noise elimination

收稿日期:2009-07-06;修订日期:2009-08-07.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA704340;No. 2007AA704115)

1 引言

星敏感器在众多姿态敏感器中具有精度高、重量轻、功耗低、无漂移和工作方式多种多样等优点。新一代的星敏感器与惯性陀螺一样具有自主导航的能力,是一种优良并有前途的姿态测量部件^[1-2]。

国内外对于星敏感器技术的研究主要体现在以下几个方面:星识别方法、姿态估计算法、导航星库的编制方法等。然而星像质心精度将会在很大程度上影响到星敏感器的定姿精度,因此,如果能够提高质心的位置精度,就可以从整体上提高星敏感器的定姿精度^[3]。文献[4]提出了用维纳滤波方法对星图去噪,但是对于星敏感器而言,维纳滤波方法并不适用。首先,维纳滤波方法的缺陷是必须精确已知噪声的特性,至少要知道噪声的均值和方差,否则滤波器的效果将会大大下降;其次,用硬件描述语言来实现维纳滤波将会面临很大的困难,无论从处理速度、编程的复杂程度以及最终的滤波效果来看都不合适。文献[5-8]简要阐述了星图中噪声的一般特点,并且提出了一种全局阈值的星像提取算法。实际上该星像提取算法也是一种星图的滤波方法,该方法可以比较有效地去除星图中的冲激性噪声,但是对于导航星本身的噪声却没有什么效果。本文主要从图像处理的角度寻找一种合适的图像处理方法以提高星敏感器导航星的质心精度。针对 CCD 星敏感器星图预处理中存在的 CCD 各种噪声、A/D 量化噪声、算法定位误差等进行分析,讨论了提高测量精度的方法,并采用 FIR 滤波器来消除星敏感器星像坐标的噪声,从而提高了星敏感器的输出姿态精度。

2 影响测量精度的原因

星敏感器产生星像误差的主要原因包括光学系统带来的误差、光电转换带来的各种噪声引起的误差和算法误差^[9-11]。A/D 转换之前的各个过程均会引入各种噪声,A/D 转换本身还会引入量化噪声,而数字信号的传输基本不再引入噪声。

光学系统带来的误差。该误差主要是星光信号本身光强变化引起的,包括光强起伏和光强分

布变化两方面。另外温度的变化、冲击振动会使机械结构产生变形,导致光斑能量分布的改变,给光斑定位带来不确定性,所以要求机械结构应具有良好的稳定性,以保持装调好的最佳状态。

光电转换产生的误差。光电转换环节产生的噪声较多,它主要包括 3 类:光子霰粒噪声、暗电流噪声和读出噪声。各种噪声的产生使系统信噪比下降,导致测量精度降低。

A/D 量化产生的误差。光强信息经 A/D 转换后,光强的大小被分为有限等级。当光强度变化小于一个量化等级时,其变化不会在像元输出值中反映出来,从而引入 A/D 量化噪声,带来测量误差。

算法误差。该误差是由于定位算法本身的特性,以及星图和参与计算的各个星点像的特性在位置计算中带来的误差。

为了提高星敏感器测量精度,需要了解各种误差的产生机理,从而减小误差影响。通常需要对光学系统和电子学系统进行精确设计,采取必要的方法和技术,抑制各种噪声,从而提高测量精度。

3 FIR 滤波器

FIR 滤波器又叫有限冲击响应滤波器。设 FIR 滤波器的单位脉冲响应 $h(n)$ 为一个 N 点的序列,其中 $0 \leq n \leq N-1$,则 FIR 滤波器的系统函数为:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n}. \quad (1)$$

常用的 FIR 滤波器 3 种类型:直接型、级联型和频率采样型。

频率采样型的主要依据是采样定理。如果对有限长序列的 Z 变换在单位圆上做等间隔抽样,则采样值的离散傅里叶反变换所对应的时域信号是原序列以频率采样周期 N 为周期延拓的结果,也就是说如果频率抽样周期 N 大于原来的序列长度 M 时,则不会发生信号失真。在这种情况下,序列的 Z 变换 $H(z)$ 可以用频域采样序列内插得到,内插公式如下:

$$\frac{y(z)}{x(z)} = H(z) = (1 - z^{-N}) \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{H(k)}{1 - W_N^{-k} z^{-1}}, \quad (2)$$

其中 $W_N^{-k} = e^{j2\pi k/N}$, 该内插公式由两部分组成, 其中第一部分为:

$$H_1(z) = (1 - z^{-N}), \quad (3)$$

其频率响应的表达式为:

$$H_1(e^{j\omega}) = (1 - z^{-j\omega N}) = 2\sin\left(\frac{N}{2}\omega\right)e^{-j2\pi k/N}. \quad (4)$$

从其表达式上看, 它是一个由 N 阶延时单元所组成的梳状滤波器, 其在单位圆上有 N 个等间隔的零点; 第二部分的表达式为:

$$H_2(z) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{H(k)}{1 - W_N^{-k} z^{-1}}. \quad (5)$$

$H_2(z)$ 是由 N 个一阶网络并联成的, 每个一阶网络在单位圆上有一个极点, 这些极点与第一部分梳状滤波器的 N 个 0 点相抵消, 从而使 $H(z)$ 在频率抽样点上的频率响应等于 $H(k)$ 。

频率采样型的主要优点是可以根据 $H(k)$ 的值直接控制滤波器的响应, 因此该结构便于标准化、模块化。

对星图的分析表明, 星图滤波器并不属于经典的低通、高通、带通、带阻的范围, 从这个角度讲, 这种滤波问题在数字图像处理领域中属于图像的恢复问题, 也就是说在滤波的同时既要去掉噪声对信号的影响, 同时又要最大限度地保证对原始信号的保留。由于基于 Parks-McClellan 算法的滤波器是最优化设计方法, 因此, 本文选用基于 Parks-McClellan 算法的滤波器最优化设计方法来设计 FIR 滤波器。

滤波器的设计是调用 MATLAB 的信号处理工具箱函数 FIRPM 来实现的。该函数的内核主要是基于 Parks-McClellan 算法来实现滤波器的最优化设计问题。同时, 经过实际的验证发现滤波器的阶数在五阶到九阶之间时, 滤波器的实际频率响应与理想的频率响应相差较小, 调用 FIR-PM 函数可以得到如式(6)的五阶滤波器向量:

$$\mathbf{h} = [0.031\ 2 - 0.072\ 9\ 0.957\ 6 - 0.072\ 9\ 0.031\ 2], \quad (6)$$

得到一维矩阵后, 只要将一维矩阵转换成二维矩阵就可以得出与理想频率响应相近的滤波器矩阵。调用 MATLAB 图像处理工具箱中的 ftrans2 函数将一维 FIR 滤波器转换成二维 FIR 滤波器, 最终得到如式(7)所示的滤波器矩阵。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0.001\ 9 & 0.007\ 8 & 0.001\ 7 & 0.007\ 8 & 0.001\ 9 \\ 0.007\ 8 & -0.018\ 2 & -0.052\ 1 & -0.018\ 2 & 0.007\ 8 \\ 0.001\ 7 & -0.052\ 1 & 1.038\ 3 & -0.052\ 1 & 0.001\ 7 \\ 0.007\ 8 & -0.018\ 2 & -0.052\ 1 & -0.018\ 2 & 0.007\ 8 \\ 0.001\ 9 & 0.007\ 8 & 0.001\ 7 & 0.007\ 8 & 0.001\ 9 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

4 仿真实验

为了评价本文算法, 采用某型号卫星星敏感器原理样机的地面观星数据作为实验数据样本。该星敏感器参数为视场 $12^\circ \times 12^\circ$, 图像传感器面阵大小 $512\ \text{pixel} \times 512\ \text{pixel}$, CCD 曝光时间 220 ms, 星敏感器导航星从 SKY2000 星表中选取了星等在 0.0~6.0 中的 5 062 颗恒星作为导航星, 把星敏感器放在地球表面, 使星敏感器和地球相对静止, 光轴指向随机对准一个天区, 星敏感器将连续工作一段时间(本文选取工作 2 000 s 的数据)的星像坐标和姿态信息传送到 PC 机, PC 机实时保存星敏感器的数据。

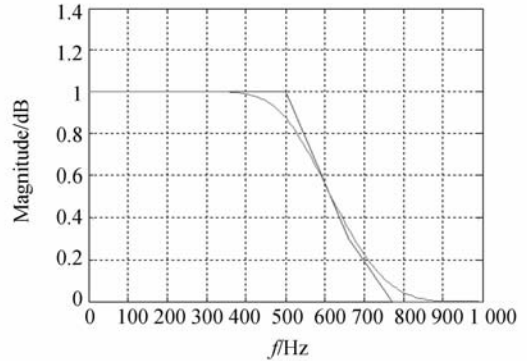


图 1 设计滤波器的频谱曲线

Fig. 1 Frequency distributing of designed filter

设计 FIR 滤波器的频谱曲线如图 1, 用 MATLAB 首先显示原始的星敏感器姿态信息功率谱(如图 2)和三轴姿态误差曲线(如图 3), 再根据原始数据的功率谱设计相应的 FIR 滤波器。利用设计滤波器参数, 对保存的星像坐标进行去噪, 并利用去噪后的星像坐标离线计算姿态信息, 去噪后的姿态信息的功率谱如图 4, 三轴姿态误差曲线如图 5。从图中可以看出, 精度有明显增加, 输出姿态精度由原来的 21.921" 提高到了 7.823"。

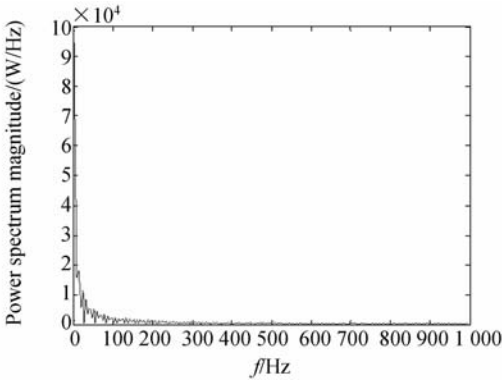


图 2 原始数据的功率谱曲线

Fig.2 Frequency distributing of original data

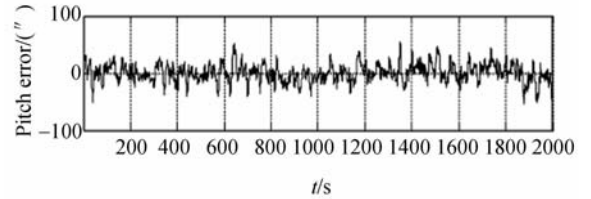
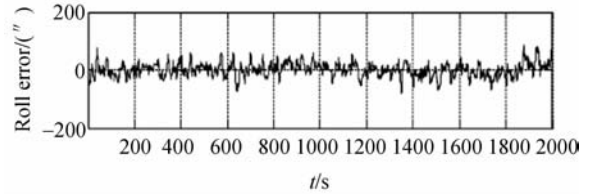


图 5 对数据进行 FIR 滤波后的三轴姿态误差

Fig.5 Errors of data filtered by FIR filter

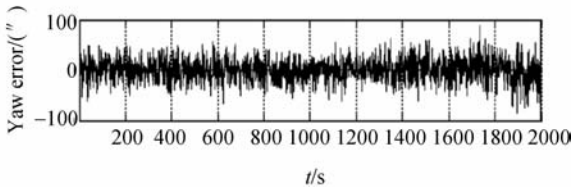
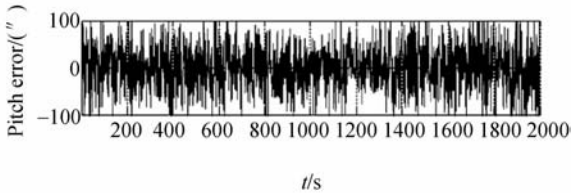
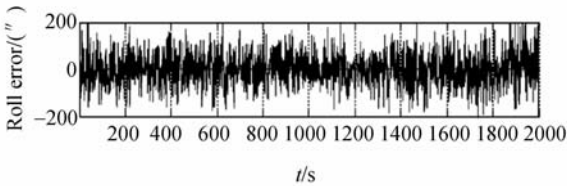


图 3 原始数据误差曲线

Fig.3 Errors of original data

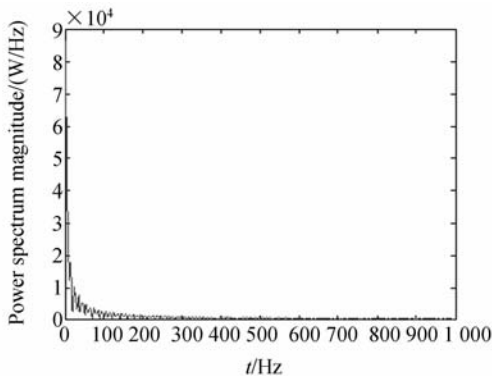


图 4 滤波后数据的功率谱曲线

Fig.4 Frequency distributing of data filtered by FIR filter

5 结 论

星敏感器是一种高精度、高可靠性的姿态测量部件,它通过探测地球上不同位置的恒星来确定卫星姿态,提供航天器相对于惯性坐标系的三轴姿态。星像坐标的定位精度不仅关系到姿态计算的精度,还影响到星图匹配的效率。本文首先分析了星敏感器星像噪声产生的原因,根据星敏感器实际拍摄的星图和提取的星像坐标数据,设计了一种 FIR 滤波器,在星图识别和姿态计算前,对提取的星像坐标通过 FIR 滤波器来消除各种噪声,从而提高星像坐标的精度。最后采用某型号卫星星敏感器原理样机的地面观星数据进行实验验证,结果表明:星敏感器输出姿态精度由原来的 21.921″提高到了 7.823″。

参考文献:

- [1] LIEBE C C. . Accuracy performance of star trackers- a tutorial[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587-599.
- [2] LIEBE C C. Star trackers for Attitude determination[J]. *IEEE AES Systems Magazine*, 1995, 31(6): 10-16.
- [3] XIE J F, JIANG W SH. The analysis of the error sources affecting the accuracy of attitude determined by star sensor[J]. *SPIE*, 2007, 6752: 675249-1~675249-8.
- [4] 张辉, 袁家虎, 刘恩海. CCD 噪声对星敏传感器星点定位精度的影响[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(5): 54-12.
- ZHANG H, YUAN J H, LIU E H. CCD noise effects on position accuracy of star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering* 2006, 35(5): 629-633+642. (in Chinese)
- [5] 马林立, 孙尧. 小波域中的维纳滤波方法在星图降噪中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(1): 55-58.
- MA L L, SUN Y. Application of wavelet domain Wiener filtering analysis to noise elimination in star-image denoising [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(1): 55-58. (in Chinese)
- [6] 李爽. 基于 FPGA 的 CCD 星敏传感器星图预处理 [D]. 哈尔滨工业大学, 2007: 34-36.
- LI SH. *Pre-processing of CCD star sensor image based on FPGA* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [7] SHORTIS M R, CLARKE T, SHORT T. A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images[J]. *SPIE*, 1994: 239-250.
- [8] RUFINO G, ACCARDO D. Enhancement of the centroiding algorithm for star tracker measure refinement[J]. *Acta Astronautica*, 2003, 53(4): 35-147.
- [9] 陈迎娟, 张之江, 张智强. CCD 像素响应不均匀性的校正方法[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(2): 216-220.
- CHEN Y J, ZHANG ZH J, ZHANG ZH Q. Correction of CCD pixel nonuniformity[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 216-220. (in Chinese)
- [10] 佟首峰, 阮锦, 郝志航. CCD 图像传感器降噪技术的研究[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(2): 140-145.
- TONG SH F, RUAN J, HAO ZH H. Noise reducing scheme on output signal of CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2): 140-145. (in Chinese)
- [11] 张辉, 钟建勇, 袁家虎, 等. 电路噪声对星敏传感器星点定位精度的影响[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(12): 1052-1056.
- ZHANG H, ZHONG J Y, YUAN J H, *et al.*. Circuit noise effects on star sensor position accuracy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 216-220. (in Chinese)
- [12] 朱卫平. 具有任意频响的二维 FIR 数字滤波器设计的闭式最小二乘解[J]. *电子学报*, 1996, 24(10): 36-40.
- ZHU W P. A closed-form solution to the design problem of 2D FIR digital filters with arbitrary frequency responses [J]. *Acta electronica sinica*, 1996, 24(10): 36-40. (in Chinese)

作者简介:



王新升(1973—)男,博士后,讲师,主要从事航天器控制、航天器总体技术、嵌入式系统设计、星模拟技术等方面的研究。E-mail: xswang@buaa.edu.cn



郑靖(1982—)男,博士研究生,主要从事航天器控制、航天器总体技术、卫星自动化测试系统等方面的研究。E-mail: jzheng@robotsat.com.cn



李葆华(1977—)男,博士,讲师,主要从事图像处理、模式识别、嵌入式控制、星模拟技术等方面的研究。E-mail: li-baohua@hit.edu.cn

● 下期预告

变包含角平面光栅单色器扫描转角精度的检测

卢启鹏¹, 马磊^{1,2}, 彭忠琦¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

SSRF 软 X 射线谱学显微光束线站高分辨变包含角单色器(VAPGM)需在超高真空环境下具有极高的转角精度,现场测试、标定极为重要。本文针对 VAPGM 波长扫描机构转角精度的现场测试进行研究,提出一种简洁、实用、有效的检测方法。采用自制的多角棱镜,结合高精度光电自准直仪实现了现场测试。首先,介绍了单色器波长扫描原理,给出了角度与波长的关系;接着,对转角精度与系统分辨率之间的关系进行理论分析;最后,详细介绍了检测方法的原理、装置及检测步骤。利用该方法完成了 VAPGM 平面镜(PM)和平面光栅(PG)转角精度的检测,结果分别为 $0.19''$, $0.22''$, 满足单色器技术指标要求。测试标定后的单色器系统经电离室在线检测其分辨率,测试结果好于 10 000,进一步验证了该检测方法的有效性。