

文章编号:1001-9014(2007)03-0191-05

基于匹配滤波的静态红外地平仪信息处理方法

陈宏宇¹, 沈学民², 朱振才¹

(1. 上海微小卫星工程中心, 上海 200050;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:针对国内静态红外地平仪探测器信噪比较低,传统地平检测方法定姿精度不高的现状,基于典型的静态地平仪设计,在分析探测器采样信号序列全局特征的基础上,设计了一套基于匹配滤波的信息处理算法,经仿真验证可以有效提高地平仪的定姿精度。

关键词:信息处理技术;姿态确定;匹配滤波;静态红外地平仪;数字信号处理

中图分类号:V448.22 **文献标识码:**A

DSP OF STATIC INFRARED-EARTH-SENSOR BASED ON MATCHING FILTER

CHEN Hong-Yu¹, SHEN Xue-Min², ZHU Zhen-Cai¹

(1. Shanghai Engineering Center for Micro-Satellites, Shanghai 200050, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: On the basis of analyzing the signal character of the static infrared-earth-sensor, a new digital signal processing based on matching filter was developed to find horizon information from the signal serial with low SNR. The simulation results verify the accuracy and feasibility of this method.

Key words: information processing technology; attitude determination; matching filter; static infrared-earth-sensor; digital signal processing(DSP)

引言

红外地平仪作为一种常用的卫星姿态敏感器,主要通过检测地球相对太空的红外辐射边缘,直接得到卫星相对天底方向的姿态偏移。按照是否采用机械扫描方式,红外地平仪可分为动态和静态两种。动态扫描式地平仪技术较为成熟,但是由于存在机械转动部件,重量和功耗都比较大。静态红外地平仪使用线阵列或面阵焦平面探测器,通过电子扫描方式得到地平边界信号,具有体积小、重量轻、功耗低、寿命长等优点。但受到各方面的限制,目前国内能够获得的线阵列探测器各元不一致性较大,因此目前国内线阵列静态地平仪定姿精度较低,在应用上受到一定的限制。

关于红外目标的检测方法较多,如杨磊等提出的“由粗到精”的分块检测方法^[1]或对目标检测阈值进

行自适应调整的方法^[2],对面阵小目标的检测方法进行了探索。本文在对线阵列静态地平仪信号特征总体分析的基础上,设计了一套基于匹配滤波的信号处理算法,来改善静态红外地平仪系统信噪比较低的先天不足,有效地提高了地平仪的定姿精度。

1 系统工作原理

典型静态地平仪由探测器、机械结构、电子线路和信号处理算法组成。探测器将接收到的热红外信号转换成微弱的电压信号,对每个探头 32 个线元信号轮流放大和 A/D 转换,合并成一个信号序列,送给可编程芯片 FPGA 进行数字信号处理,处理后得到卫星滚动、偏航姿态角数据通过串口发往星载计算机。

相比宇宙空间的 3K 背景辐射,从卫星上看到的地球相当于一个由大气中 CO₂ 辐射引起的 220 ~

收稿日期:2006-10-30,修回日期:2007-03-01

基金项目:中科院知识创新工程项目(KGCX1-Y-03)

作者简介:陈宏宇(1976-),男,山西大同人,上海微小卫星工程中心副研究员,博士,主要从事微小卫星总体设计工作。

Received date: 2006-10-30, revised date: 2007-03-01

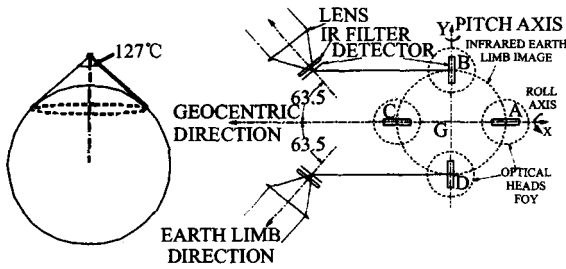


图1 地平圆及光学系统模型
Fig.1 Horizon & model of optical system

240K 的圆盘状红外辐射源. 以 800km 轨道高度为例, 卫星看到的地平圆是半张角为 θ 的圆锥与地球相切的圆周. 其中:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\text{地球半径} + \text{CO}_2 \text{ 层厚度}}{\text{地球半径} + \text{轨道高度}}$$

$$= \sin^{-1} \frac{6378 + 40}{6378 + 800} \approx 63.5^\circ \quad (1)$$

某型号卫星线阵静态地平仪的典型设计为 4 个对称探头(4 套成像光路和线阵列探测器), 提供夹角为 90° 的 4 个方位的地平线方位角, 两个相对镜筒轴线张角为 $63.5^\circ \times 2 = 127^\circ$, 如图 1 所示. 每个探头中的线阵探测器为 32 线元, 每个元对应 0.625° 视场. 为计算方便, 设线元计数均从地球一端开始至太空一端, 编号对应 1 ~ 32, 红外地平边缘对应的线元编号即为该探头输出, 定为 A、B、C、D.

从工程可靠性方面考虑, 经常取探头 4 个线阵(对 X、Y 轴)成 $\pm 45^\circ$ 斜对称分布, 一方面互相备份, 另一方面以降低大气模型误差.

2 地平信号一般检测方法

地平仪要得到的是 4 路热电堆信号跳变元位置. 理想情况下, 若热探测器一致性较好, 即各元噪声幅度远远小于信号幅度时, 对跳变元的检出并不是一件困难的事. 最直接的一种处理方法是判断探测器相邻两元的差值, 出现最大值的最大, 就是对应太空 - 地球的跳变位置.

从实际应用情况看, 目前国内的探测器性能并不理想, 主要表现为 3 个方面: 一方面探测器各线元的一致性较差, 即各元的响应率和零点不一致; 另一方面探测器以及仪器系统中运算放大器、A/D 转换器件、电源转换模块均会产生随机噪声; 同时地平目标容易受到冷云等的干扰, 也影响地平仪的准确输出, 系统信噪比不高. 在上述情况下, 若采用直接判断相邻两元差值的方法很容易

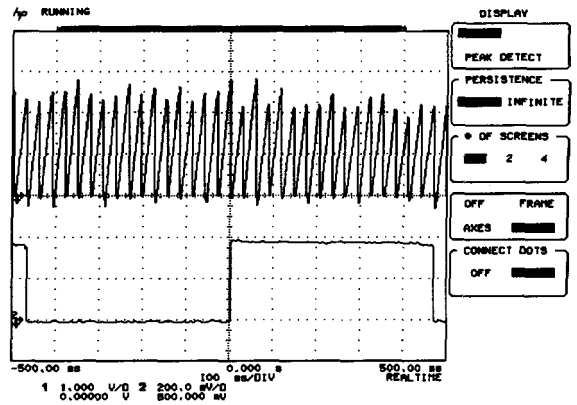


图2 地平仪探测器背景噪声输出
Fig.2 Background noise of IRRE detector

误判或错判地平边缘, 需要对信号处理算法进行完善.

如果各个线元的响应率和零点偏差的不一致性较大, 可以对其进行初步校正^[3]. 校正后的线元输出可以表示为:

$$x_i = R \cdot (\phi_i + V_T + \varphi_i) + V_0 + \xi_i + N_i \quad (2)$$

其中, R 为校正后的平均响应率, ϕ_i 为真正的目标辐射, V_T 为探测器工作温度带来的辐射, φ_i 为冷云干扰噪声, V_0 为校正后平均零点, ξ_i 为校正误差, 相比信号为小量^[4]. N_i 是零均值白噪声. 如图 2 所示, 是一组实测的探测器线元输出, 包含均匀背景辐射部分和噪声部分.

针对噪声较大的实际情况, 贝志年^[5] 改进了边缘检测方法. 主要思路是取连续 4 元(如第 $n-2, n-1, n, n+1$ 元), 设其信号幅度分别为 $V_{n-2}, V_{n-1}, V_n, V_{n+1}$. 则当 $(V_n + V_{n+1}) - (V_{n-2} + V_{n-1})$ 最大时, n 即为跳变元位置.

虽然这种方法改善了奇偶元信号幅值差对跳变元位置检出的影响, 提高了信噪比, 但该方法仍然属于局部检测, 直接差分误差信号被放大, 同样存在误判的情况. 考虑地平边缘是地平红外辐射与太空辐射背景综合比较幅值相差最大的阶跃位置, 因此服从全局判断的数字处理方法应该能更好的确定地平位置. 同时地平仪上载有 FPGA 数字处理单元, 允许使用稍微复杂的数字处理算法.

匹配滤波是一种利用信号的全局特征进行信号检测的数据处理方法, 其实质是在已知目标信号特征的基础上, 利用特征的相关性从混合信号中检测出目标信号. 下文将在分析地平信号序列输出特征的基础上设计一种基于匹配滤波的全局信号分析方法.

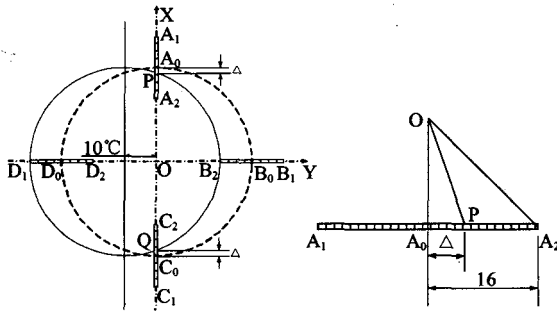


图3 卫星姿态变化对地平仪地平信号的影响
Fig.3 Influence of satellite attitude on IRRE detector signal

3 地平信号特征分析

为方便分析,假设地平仪探测器线元沿着卫星星体坐标系 OX 轴和 OY 轴安装,将探测器线元的两端分别按照靠近太空的一端下标记为“1”,靠近地球的一端下标记为“2”.当卫星对地定向滚动、偏航姿态为 0 时,地平圆刚好经过 4 个探测器线元的中点 A_0, B_0, C_0, D_0 . 这时相对两个线元对着地球的线元(高电平线元)数目之和,也即相对探头输出之和为 32.

当卫星滚动和俯仰姿态变化时,相对探头输出之和将发生变化. 设卫星滚动、俯仰姿态小于 10° , 即地平圆始终在地平仪视场内,分析对地平线元数目之和的变化范围.

如图 3 示,不难证明,当地平仪 X 或 Y 某一轴通过地平圆的直径时,该轴探头对地球线元数目之和取得最大值 32.

当地平仪 X 或 Y 某一轴通过地平圆的直径且该轴两个线元各有一个端点在地平圆上时,另一轴(Y 或 X 轴)割地平圆的弦最短,相应的该轴上两个探头输出之和最小. 以卫星滚动角等于 -10° 为例,即地平圆达到地平仪 Y 轴视场边缘的情况下,地平仪 X 轴上探头对着地球的线元数目之和最小,较 32 元减少 $A_0P + C_0Q = 2\Delta$. 根据矢量代数不难解出 $\Delta = 0.7$ 个线元.

此时,地平仪 X 轴上探头对地平线元数目之和为 $32 - 2\Delta = 30.6 \geq 31$ 元,可见卫星姿态偏差对地平仪相对探头输出之和影响甚小.

4 基于匹配滤波的地平信号检测方法

基于上述分析,设计基于匹配滤波的地平信号检测方法如下.

如图 4 所示将探头输出理解为坐标轴上点的位

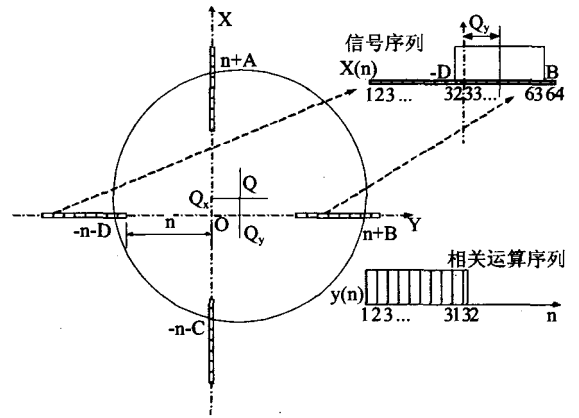


图4 地平仪定姿的几何解释
Fig.4 Geometric interpretation of attitude determination on IRRE

置,并将符号统一,则地平圆与坐标系的 4 个交点坐标分别为 $n + A, n + B, -n - C, -n - D$. n 为原点到探测器线元起点的距离.

观察定姿公式(1)可知,地平仪定姿实质上是要得到地平圆心在坐标系 OXY 中的偏移位置坐标 $Q(Q_x, Q_y)$.

$$\begin{cases} Q_y = \frac{(n + B) + (-n - D)}{2} = R/0.625 \\ Q_x = \frac{(n + A) + (-n - C)}{2} = -P/0.625 \end{cases} \quad (3)$$

为此将相对探头的输出信号起点相连,得到两个如图 4 右上图所示的长度为 64 信号序列,表示为 $x(n), n = 1, 2, \dots, 64$

根据式(2)可知,信号 $x(n)$ 包括真正的信号 $s(n) = R \cdot \phi_i$ 和常数偏移量 $c(n) = R \cdot V_r + V_0$ 以及噪声 $u(n) = R \cdot \varphi_i + \xi_i + N_i$ 所组成. 其中对地平线元输出高电平,对应着信号序列 $s(n)$ 中长度为 31 或 32 的方波信号. 地平仪定姿算法的目标是找到该方波的中点,直接对应着地平圆心位置. 冷云干扰可以认为是地平圆平均辐射上的噪声,校正偏差 ξ_i 也是随机的,各元的噪声模型 N_i 基本相同,因此这里将噪声模型 $u(n)$ 综合等效为均值不为零的高斯白噪声,即 $u(n)N(\mu, \sigma^2)$.

至此,静态红外地平仪的定姿问题转化为从混有噪声的信号序列中检测方波部分的中点位置问题.

这里考虑利用匹配滤波方法检测方波信号的位置. 匹配滤波在雷达等信号检测中广泛应用,主要利用反映信号间相似性的相关运算,将已知信号的若干特征从混合信号中检测出来,实现信号的检测、识

别与提取^[6].

定义相关序列

$$y(n) = V_0, n = 1, 2, \dots, 32$$

其中 V_0 为信号高电平的幅值, 对计算结果的特征位置没有影响, 可以根据数字处理单元的计算方便进行选取.

根据有限长序列互相关运算, 同时考虑地平仪的有效输出时, 信号序列 $x(n)$ 中方波中点的位置在 16 ~ 48 之间, 只需计算对应位置的相关函数即可, 对互相关算法进行简化后最终得到

$$r_{xy}(m) = \sum_{n=1}^{32} x(n+m)y(n), m = 0, 1, 2, \dots, 32 \quad (4)$$

由于 $x(n) = s(n) + u(n) + c(n)$, 因此

$$\begin{aligned} r_{xy}(m) &= \sum_{n=1}^{32} [s(n+m) + u(n+m) + c(n+m)] \cdot y(n) \\ &= r_{sy}(m) + r_{uy}(m) + r_{cy}(m) \end{aligned}$$

$r_{sy}(m)$ 是信号序列与 $y(n)$ 的互相关. 根据上节分析, 信号序列里方波序列的宽度为 31 或 32, 与 $y(n)$ 的相关程度最高. 当两序列的方波中点位置一致时 $r_{sy}(m)$ 取最大值, 对应波形为三角波峰值.

$r_{uy}(m)$ 是噪声与方波的互相关, 当 $m = 0 \sim 32$ 时,

$$r_{uy}(m) = A \cdot \sum_{n=1}^{32} u(n+m) = 32A \cdot E(u(n))$$

其中 $E(u(n)) = \mu$ 为噪声均值. 因此 $r_{uy}(m)$ 可以认为是等值序列.

$r_{cy}(m)$ 是偏移量与方波的互相关, 当 $m = 0 \sim 32$ 时为等值序列.

因此, $r_{xy}(m)$ 序列的最大值对应的位置, 即是信号序列中方波中点的位置设为 n_{max} . 则

$$Q_y = n_{max} - 16$$

代入式(6)可以得到卫星姿态.

分析式(7) 每次只需要 32×33 次整数乘加运算和一次 33 元序列极大值搜索, 对于在 FPGA 上实现并不困难.

5 仿真实验

下面对本文设计的静态红外地平仪的降噪算法进行了仿真实验. 其中横坐标为拼接处理后的线元编号, 纵坐标为信号幅值.

图 5(a) 为地平仪理想信号 $s(n)$ 加电路设计中的偏移量 $c(n)$. 图 5(b) 为服从均值为 1V, 均方差为 0.5V 的正态分布的噪声信号 $u(n)$. 信噪比按照理想信号的平均值与噪声的平均值计算, 即

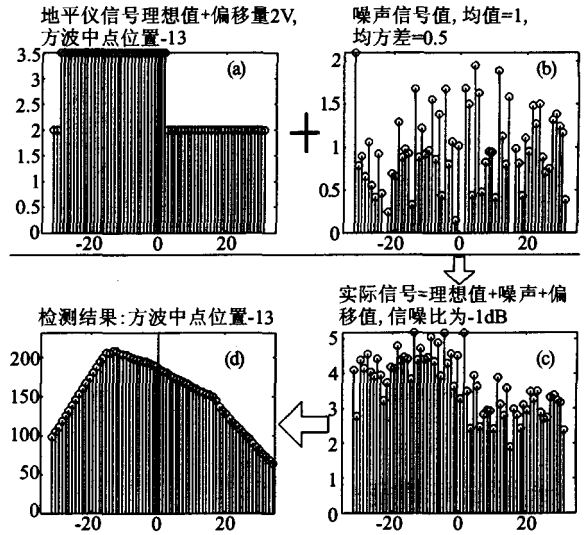


图 5 地平仪信号处理过程仿真 1
Fig. 5 Simulation of signal processing 1

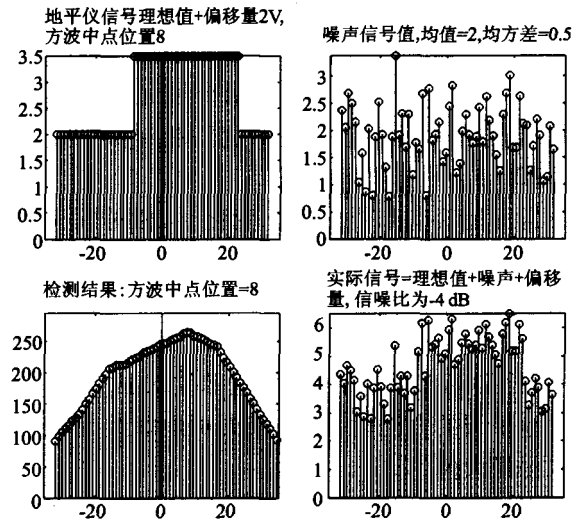


图 6 地平仪信号处理过程仿真 2
Fig. 6 Simulation of signal processing 2

$$SNR = 10 \log \frac{\sum s(n)}{\sum u(n)}$$

图 5(c) 为地平仪实际输出的仿真信号, 可以看出信号几乎被噪声淹没, 通过互相关运算得到的序列如图 5(d), 序列的最大值即对应方波信号的中值. 对比图 5(a) 可见, 通过匹配滤波检测的结果为 -13, 与实际信号中值位置一致.

图 6 是噪声服从均值 2V, 均方差为 0.5V 正态分布情况下地平仪信号处理过程的仿真.

从结果可以看出, 该方法可以准确得到方波中值的位置, 进一步通过式(1)可以得到卫星姿态.

6 小结

本文首先简单介绍了线阵列静态红外地平仪的工作原理和系统方案,然后针对目前国内探测器信噪比较差的问题,在对地平信号全局特征进行分析的基础上,设计了一种基于匹配滤波的地平仪定姿算法.该方法在工程上容易实现,仿真证明能够在信噪比很差的情况下有效提高静态红外地平仪的定姿精度.此外,本文的方法也可扩展到二维相关运算,用于面阵焦平面的静态地平仪定姿.相信该方法对国内静态红外地平仪技术的发展会提供一定的参考.

REFERENCES

- [1] YANG Lei, YANG Jie, LING Jian-Guo, et al. Real-time method for detecting multi-small targets in infrared large sight field[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨磊, 杨杰, 凌建国, 等. 一种红外大视场环境下的多小目标实时检测

方法. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(5): 377—381.

- [2] YANG Lei, YANG Jie, ZHENG Zhong-Long. Detecting infrared small targets based on adaptive local energy threshold under sea-sky complex backgrounds [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨磊, 杨杰, 郑忠龙. 海空复杂背景中基于自适应局部能量阈值的红外小目标检测. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(1): 41—45.
- [3] ZHANG Hua-Da, *Research of correction on the Static IRFPA Earth Sensor* [D]. Paper for master's degree of SITP (张华达. 红外面阵焦平面静态地平仪系统校正研究. 上海技术物理研究所硕士论文). 2004.
- [4] CHEN Jie. *Key Technology of Static IRFPA Earth Sensor for Micro-satellites* [D]. Paper for master's degree of SITP (陈杰. 小卫星静态红外地平仪关键技术研究. 上海技术物理研究所硕士论文). 2000.
- [5] BEI Zhi-Nian. *DSP of Static Infrared-earth-sensor* [D]. Paper for master's degree of SITP (贝治年. 静态红外地平仪信号处理技术研究. 上海技术物理研究所硕士论文). 2002.
- [6] HU Guang-Shu. *Digital Signal Processing* [M]. Beijing: Tsinghua Press (胡广书. 数字信号处理. 北京: 清华大学出版社), 1997.

(上接 190 页)

表 2 同一颗脉冲星在不同频段脉冲信号的一维选择线谱与特征模板向量的相关性

Table 2 Correlation among one-dimension selected line spectrum of average pulse profiles for the same kind of pulsar signals at different frequencies

脉冲星类型	观测频率	与相应特征模板向量的相关性
B0329 + 54	8500MHz	0.5083.
	10550MHz	0.5583.
B1451 - 68	450MHz	0.5309
	674MHz	0.5154
	1520MHz	0.5107
B2111 + 46	400MHz	0.5014.
	610MHz	0.5404.
	800MHz	0.5399.
	10550MHz	0.5425

REFERENCES

- [1] Suneel I Sheikh, Darryll J Pines, Paul S Ray, et al. The use of x-ray pulsars for spacecraft navigation [J]. *Advances in the Astronautical Science*, 2005, 119: 105—119.
- [2] LIAO X, BAO Z. Circularly integrated bispectra: novel shift invariant features for high-resolution radar target recognition [J]. *Electron Letters*, 1998, 34: 1879—1880.
- [3] ZHANG Xian - Da, SHI Yu, BAO Zheng. A new feature

vector using selected bispectra for signal classification with application in radar target recognition [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49(9): 1875—1885.

- [4] WANG Dang-Wei, MA Xin-Yi, WANG Shao-Gang, et al. New approach to radar target identification using a generalized likelihood ratio test [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王党卫, 马兴义, 王少刚, 等. 一种基于广义似然比检测的雷达目标识别新方法. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(4): 311—315.
- [5] LIU Rong, LIU San-Yang, ZHAO Rui-Zhen. An auto-extraction method of spectral line for normal galaxy spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (刘蓉, 刘三阳, 赵瑞珍. 正常星系光谱的一种谱线自动提取方法. *光谱学与光谱分析*), 2006, 3: 583—586.
- [6] WU Bin, JI Hong-Bing, LI Peng. New method for moving dim target detection based on third-order cumulant in infrared image [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (武斌, 姬红兵, 李鹏. 基于三阶累积量的红外弱小运动目标检测新方法. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(5): 364—367.
- [7] ZHANG Xian-Da. *Modern Signal Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press (张贤达. 现代信号处理. 北京: 清华大学出版社), 2002: 335—344.
- [8] JI Hong-Bing, GAO Xin-Bo, XIE Wei-Xin. Study of bispectrum signatures of radar targets and classification techniques [J]. *Journal of Xi' dian University* (姬红兵, 高新波, 谢维信. 雷达目标双谱特征分析与分类方法研究. *西安电子科技大学学报*), 1999, 26(6): 691—694.