

基于 FPGA 的空间太阳望远镜图像相关算法实现

耿立红, 孙才红, 李长松

(中国科学院国家天文台空间天文技术实验室, 北京 100012)

摘 要: 二维图像相关跟踪是空间太阳望远镜 1m 光学系统达到 0.1"分辨率关键之一. 介绍了基于 FPGA 实现 SST 相关算法的方法, 如 2×2 矢量基蝶形 FFT、模块化结构、两级状态机、动态块浮点、并行流水时序等. 20MHz 下 32×32 图像相关算法在 XCV800 芯片上实现仅 713 微秒, 像元拟合精度优于 1/50.

关键词: 空间太阳望远镜; 图像相关; FFT; FPGA

中图分类号: V447; V443 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 01-0147-05

FPGA Implementation of SST Image Correlation Algorithm

GENG Li-hong, SUN Cai-hong, LI Chang-song

(National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: 2-D image correlation tracking is a key factor for the 1m optical system on SST (Space Solar Telescope) to reach its 0.1" spatial resolution. The image correlation algorithm's FPGA implementation methods are introduced: 2×2 radix butterfly-algorithm, modular structure, two levels infinite state machine, dynamic block float-point, and parallel processing sequence. Only 713us is needed to realize a 32×32 image correlation algorithm on XCV800 FPGA chip with 20MHz clock. Tracking precision is better than 1/50 pixel.

Key words: space solar telescope (SST); image correlation; FFT; FPGA

1 引言

空间太阳望远镜(SST)^[1]的 1m 主光学望远镜科学目标是以 0.1"分辨率观测太阳矢量磁图. 但卫星非线性轨道运动和姿态不稳定会引起望远镜主光轴抖动, 使望远镜在长积分时间内成像模糊. 在卫星平台提供 $\pm 6''$ 指向精度和 $3''/s$ 姿态稳定度基础上, 高精度实时图像相关跟踪通过补偿图像偏移, 实时校正主光轴抖动. 空间化、运算时间和精度成为限制相关跟踪系统性能的重要因素. 根据卫星平台要求, 作相关处理的 CCD 图像阵列为 32×32 , 跟踪精度优于 1/30 像元, 每秒执行一千次跟踪操作. 用主频为 20MHz 的航天级 DSP (如 ADSP21020) 完成 32×32 FFT 需 1.5ms^[3], 本文采用有相应航天级抗辐照产品的单片 FPGA 芯片实现相关跟踪系统的图像相关算法, 利用 VHDL 并行流水特点缩短相关运算时间, 使系统可靠性提高、空间化成为可能.

2 相关跟踪原理及基于 2×2 矢量基算法的两维图像 FFT 算法分解

由相关定理, 相关运算可利用 FFT 实现:

$$R(m, n) = \text{IFFT}[\text{FFT}[X(x, y)] \cdot [\text{FFT}[Y(x + \Delta x, y + \Delta y)]^*] \quad (1)$$

一个观测周期内, 先采集一幅图像作参考图 $X(x, y)$, 再以固定采样频率采集活动图 $Y(x + \Delta x, y + \Delta y)$, Δx 和 Δy 为活动图相对参考图的偏移量. 计算出参考图和活动图相关函数 $R(m, n)$ 后, 经曲面拟合求得偏移量. 通过 PID 控制算法和执行机构, SST 成像系统能跟踪主光轴抖动, 动态锁定目标. 跟踪执行机构在超出其动态范围时复位, 并在下一个跟踪周期开始重新采集参考图. 图 1 虚框中为 FPGA 需完成功能.

与常用行列算法相比, 矢量基 FFT 算法要复杂, 所需加法次数相同, 但乘法数节省 25%. 二维矢基 FFT 基本原理是将一个二维 DFT 连续地分成更小的二维 DFT, 一直分到只需计算无足轻重的二维 DFT 时为止^[2]. $N \times N$ 二维复数序列 $x(n_1, n_2)$ 的二维离散傅立叶变换 DFT:

$$X(k_1, k_2) = \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} x(n_1, n_2) W_N^{n_1 k_1} W_N^{n_2 k_2},$$
$$W_N = \exp(-j2\pi/N), W_N^{nk} \text{ 为 } W \text{ 因子}, k = 0 \cdots N-1 \quad (2)$$

按时间抽取方式将式(2)分解成四个和式, 即 n_1 和 n_2

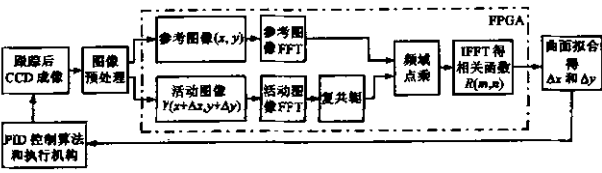


图 1 二维图像相关算法流程

都为偶数的所有抽样、 n_1 为偶数而 n_2 为奇数的所有抽样、 n_1 为奇数而 n_2 为偶数的所有抽样以及 n_1 和 n_2 都为奇数的所有抽样. 由此可得:

$$\begin{aligned} X(k_1, k_2) &= S_{00}(k_1, k_2) + W_N^k S_{01}(k_1, k_2) + W_N^k S_{10}(k_1, k_2) \\ &\quad + W_N^{k_1+k_2} S_{11}(k_1, k_2) \\ X(k_1 + N/2, k_2) &= S_{00}(k_1, k_2) + W_N^k S_{01}(k_1, k_2) \\ &\quad - W_N^k S_{10}(k_1, k_2) - W_N^{k_1+k_2} S_{11}(k_1, k_2) \\ X(k_1, k_2 + N/2) &= S_{00}(k_1, k_2) - W_N^k S_{01}(k_1, k_2) \\ &\quad + W_N^k S_{10}(k_1, k_2) - W_N^{k_1+k_2} S_{11}(k_1, k_2) \\ X(k_1 + N/2, k_2 + N/2) &= S_{00}(k_1, k_2) - W_N^k S_{01}(k_1, k_2) \\ &\quad - W_N^k S_{10}(k_1, k_2) \\ &\quad + W_N^{k_1+k_2} S_{11}(k_1, k_2) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $S_{00}(k_1, k_2)$, $S_{01}(k_1, k_2)$, $S_{10}(k_1, k_2)$, $S_{11}(k_1, k_2)$ 的各个抽样又可以分解成四个 $N/2 \times N/2$ 点 DFT 来表示. 见式(4). 如此一直分解成 2×2 DFT. 一个矢量基 2×2 蝶形流图见图 2.

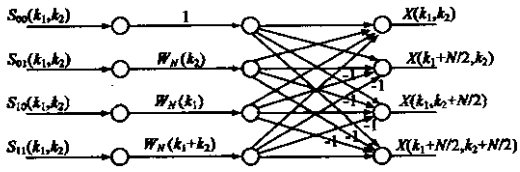


图 2 矢量基 2×2 蝶形流图

$$\begin{aligned} S_{00}(k_1, k_2) &= \sum_{m_1=0}^{N/2-1} \sum_{m_2=0}^{N/2-1} x(2m_1, 2m_2) W_N^{2m_1 k_1 + 2m_2 k_2} \\ S_{01}(k_1, k_2) &= \sum_{m_1=0}^{N/2-1} \sum_{m_2=0}^{N/2-1} x(2m_1, 2m_2 + 1) W_N^{2m_1 k_1 + 2m_2 k_2} \\ S_{10}(k_1, k_2) &= \sum_{m_1=0}^{N/2-1} \sum_{m_2=0}^{N/2-1} x(2m_1 + 1, 2m_2) W_N^{2m_1 k_1 + 2m_2 k_2} \\ S_{11}(k_1, k_2) &= \sum_{m_1=0}^{N/2-1} \sum_{m_2=0}^{N/2-1} x(2m_1 + 1, 2m_2 + 1) W_N^{2m_1 k_1 + 2m_2 k_2} \end{aligned} \quad (4)$$

基于矢量基 2×2 的 32×32 图像 FFT 算法及相关算法特点:

表 1 FFT 五次抽取地址公式. X_{step} 、 Y_{step} 和 X_{ystep} 分别为 S_{10} 、 S_{01} 和 S_{11} 相对于 S_{00} 的地址增量

第一级	$k1=0$	$k2=0$	$I_x=0-15$	$I_y=0-15$	$X_{step}=1$	$Y_{step}=32$	$XY_{step}=33$
	每个蝶形第一个值 S_{00} 在 RAM 中的位置: ADDR00 = $64I_y + I_x * 2$						
第二级	$k1=0-1$	$k2=0-1$	$I_x=0-7$	$I_y=0-7$	$X_{step}=2$	$Y_{step}=64$	$XY_{step}=66$
	每个蝶形第一个值 S_{00} 在 RAM 中的位置: ADDR00 = $128I_y + I_x * 4 + 32k1 + k2$						
第三级	$k1=0-3$	$k2=0-3$	$I_x=0-3$	$I_y=0-3$	$X_{step}=4$	$Y_{step}=128$	$XY_{step}=132$
	每个蝶形第一个值 S_{00} 在 RAM 中的位置: ADDR00 = $256I_y + 8I_x + 32k1 + k2$						
第四级	$k1=0-7$	$k2=0-7$	$I_x=0-1$	$I_y=0-1$	$X_{step}=8$	$Y_{step}=256$	$XY_{step}=264$
	每个蝶形第一个值 S_{00} 在 RAM 中的位置: ADDR00 = $512I_y + 16I_x + 32k1 + k2$						
第五级	$k1=0-15$	$k2=0-15$	$I_x=0$	$I_y=0$	$X_{step}=16$	$Y_{step}=512$	$XY_{step}=528$
	每个蝶形第一个值 S_{00} 在 RAM 中的位置: ADDR00 = $32k1 + k2$						

(a) 32×32 图像通过 5 次抽取实现, 抽取每一级包含 256 个蝶形, 每个蝶形包含 3 次复乘和 8 次复加(减); 3 次复乘, 并行运算时需 12 个乘法器同时工作;

(b) 同址计算: 蝶形计算四个输出数据与四个输入同址存储; FFT 运算所需存储器与图像大小相同;

(c) 位倒序: 原始图像输入数据按照行列地址倒位序排列方式存储, FFT 结果为自然顺序. 逆 FFT 运算前, 同样要将数据进行位倒序. 输出结果要进行四相限置换和位倒序, 这在读写 RAM 时通过地址译码完成, 不需额外的处理时间和存储空间; (d) $(0, 0)$ 地址数据清零: FFT 变换后频域的 $(0, 0)$ 地址数据为直流分量, 其值最大, 但对相关后偏移量拟合计算影响很小. 用块浮点方式时保留直流分量, 会影响芯片内部块 RAM 资源利用和算法精度, 因此将直流分量清零.

3 方案设计和实现

3.1 总体方案设计

采用 VHDL 语言和图 3 层次化模块化结构, 包括外部命令和数据接口、存储器、控制、串并转换和并串转换、正逆 FFT 及点乘运算、数据锁存求最大值、复位和时钟模块等模块. 运算模块中, 又包括 16 个乘法器、32 个加减法器等于模块. 点乘运算采取四个复数乘法并行运算, 16 个乘法器中有 12 个与 FFT 运算单元共享, 地址、数据转换通过多路开关切换.

相关运算流程见图 4 中单向数据箭头. 双端口 RAM 地址在读数时同步保存在 FIFO 中, 回写数据时直接从 FIFO 中读出地址, 从而实现同址运算.

3.2 地址寻址和 FFT 运算过程

相关算法中参考图和活动图分别存储. 存储器寻址方式与 FFT 运算过程有关, 而该过程与算法分解过程相反, 需从 $N=2$ 最简单二维矢量基蝶形运算开始. 将位倒序后 32×32 阵列分成行列各 16 个 2×2 基本阵列, 计算各阵列 DFT, $k1=k2=0$; 256 个阵列用 I_x 和 I_y 来定位, $I_x, I_y=0, 1, 2, \dots, 15$; 由阵列位置 I_x, I_y 和 W 因子参数 $k1, k2$, 得到 256 个蝶形所有参数地址和 W 因子地址. 然后作 $N=4, 8, 16, 32$ 阵列的蝶形运算. W 因子保存在 ROM 中, 由 $k1$ 和 $k2$ 及 $k3=k1+k2$ 寻址得到. 寻址方式可用表 1 来概括:

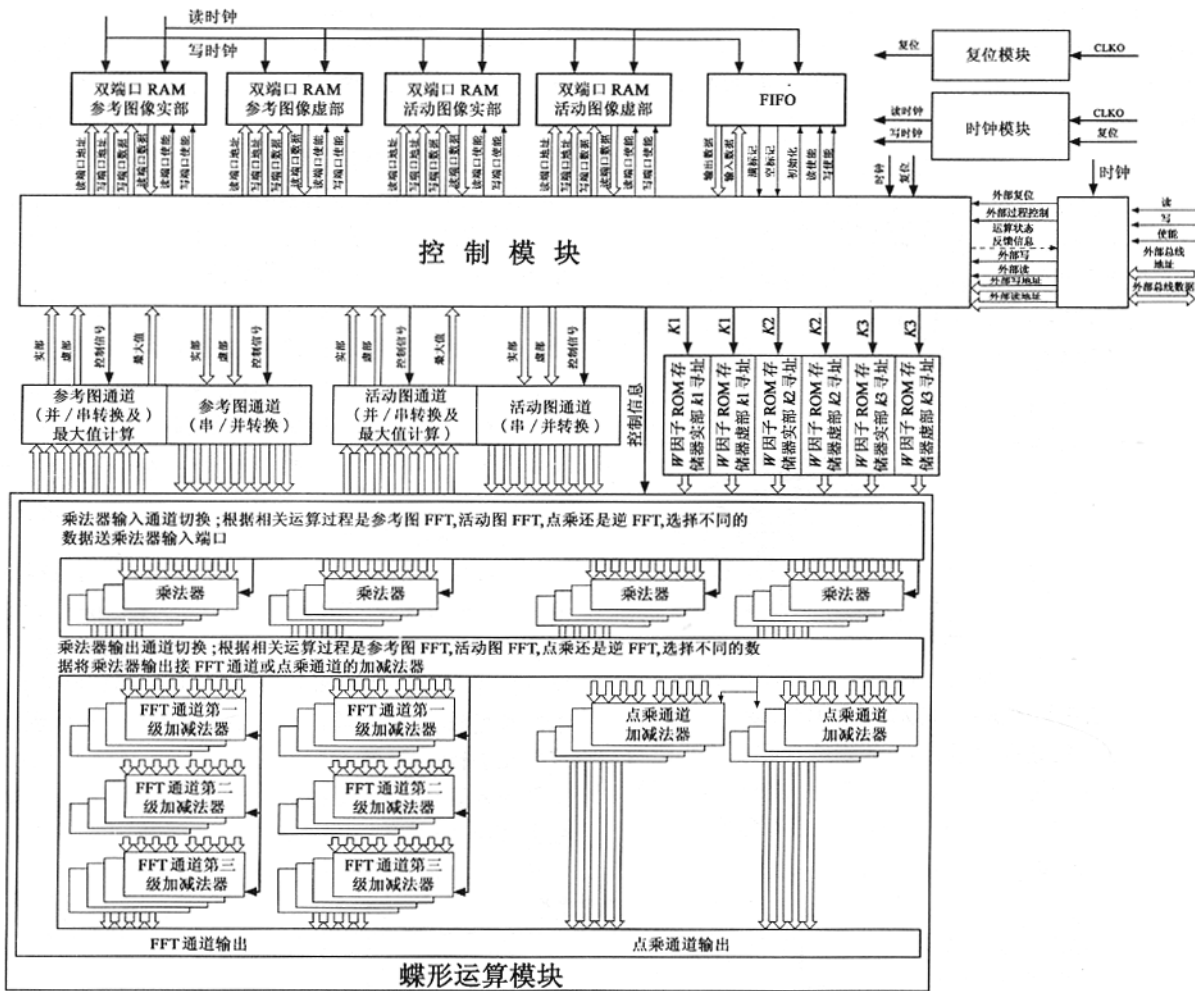


图 3 相关运算单元模块化设计框图

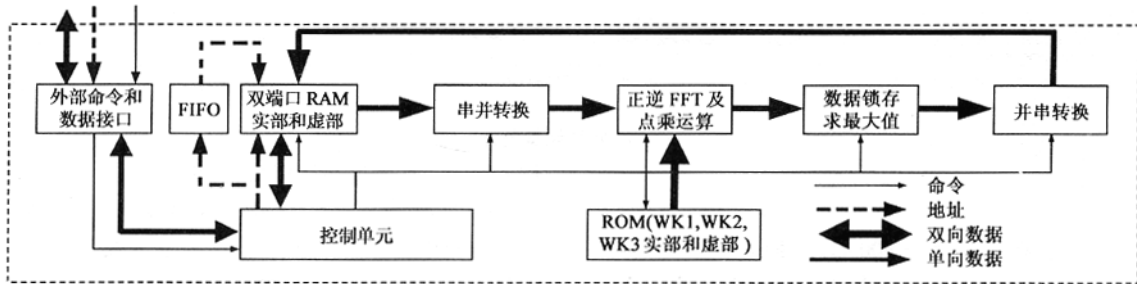


图 4 相关运算流程图

3.3 芯片选择

从航天应用、芯片资源和封装等方面考虑,采用 XILINX^[4]公司 VERTEX 系列有相应航天级抗辐照产品的 80 万门 XCV800-4HQ240 芯片,内置 112Kbit 块 RAM,工作频率为 20MHz.采用 IP 核构造 20bit 宽乘法器和加、减法器.利用片内块 RAM 构造:(a)图像存储器:4 个 20bit×1024 双端口同步 RAM,存储参考图和活动图的实部、虚部;(b)地址存储器:10bit×15 同步 FIFO,存储 FFT 运算过程中的数据地址;(c)W 因子存储器:6 个 19bit×64 同步 ROM,配置时调用 *.coe 文件写入内容.

3.4 两级状态机完成相关算法流程的控制和调度

(a)顶层状态机:顶层状态机 7 个状态及其状态转移条件见图 5.为降低对时序配合的严格要求,增加抗干扰性能,保证运算过程顺序执行,对每个运算设置运算结束标志,当某运算正在进行时不接受命令(除复位命令),此运算结束后不重复执行已完成的命令,除非写入新图像.(b)FFT 运算状态机:第二级状态机为 FFT 运算状态机,也包含 7 个状态,实现 FFT 五层蝶形运算的状态转换,为正逆 FFT 共用.初始处于 FFT 运算等待状态,完成初始化,FFT 运算结束标志为 0;当顶层状态机调度进入 FFT 状态时,此

- 时间:20MHz 频率完成一次相关运算需 $713\mu\text{s}$, 满足小于 1ms 的要求;

- 精度:(a)相关结果:对比 VHDL 相关运算和 MATLAB 双精度浮点相关运算结果,误差 $<0.3\%$;(b)拟合结果:对十对已知偏移量的图像进行 VHDL 和 Matlab 相关运算后,在 Matlab 中计算抛物面拟合后偏移量,VHDL 算法精度优于 1/50 像元,满足相关跟踪优于 1/30 像元要求.见表 2.

致谢:感谢国家天文台金声震研究员、姜爱民研究员、胡柯良高工和空间中心徐志衡研究员的指导.

参考文献:

- [1] 航天部五院,国家天文台.空间太阳望远镜卫星总体方可行性论证报告[R].北京:国家天文台,2000.39-40.
- [2] 美 D E 达吉恩, R M 默塞里奥.多维数字信号处理[M].北京:科学出版社,1991.60-63.
- [3] 王涛,姜爱民,等.基于 FPGA 的快速并行 FFT 及其在空间太阳望远镜图像锁定系统中的应用[J].电子技术应用,2003,29(3):52-54.
- [4] Xilinx Production Product Specification. VirtexTM 2.5V

Field Programmable Gate Arrays[DB/OL]. <http://www.xilinx-china.com/xlnx/xweb>, 2002-12-09.

- [5] 罗雪荀,詹阳.用 FPGA 实现 FFT 算法[DB/OL]. <http://www.epc.com.cn/2002/0002/y1.htm>.

作者简介:

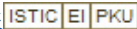


耿立红 女,1967 年 7 月出生于江苏省沭阳县,博士,中科院国家天文台空间天文技术实验室高级工程师,主要从事空间电子技术应用研究. E-mail: genglh@sst. bao. ac. cn.



孙才红 男,1966 年 8 月出生于江苏省兴化市,博士,中科院国家天文台空间天文技术实验室研究员,主要从事星敏感器研制及空间电子技术应用研究. E-mail: sch1@sst. bao. ac. cn.

基于FPGA的空间太阳望远镜图像相关算法实现

作者: 耿立红, 孙才红, 李长松, GENG Li-hong, SUN Cai-hong, LI Chang-song
作者单位: 中国科学院国家天文台空间天文技术实验室, 北京, 100012
刊名: 电子学报 
英文刊名: ACTA ELECTRONICA SINICA
年, 卷(期): 2006, 34(1)
被引用次数: 0次

参考文献(5条)

1. 航天部五院. 国家天文台 空间太阳望远镜卫星总体可行性论证报告 2000
2. 美 D E 达吉恩, R M 默塞里奥 多维数字信号处理 1991
3. 王涛, 姜爱民 基于FPGA的快速并行FFT及其在空间太阳望远镜图像锁定系统中的应用[期刊论文]-电子技术应用 2003 (03)
4. Xilinx Production Product Specification VirtexTM 2.5V Field Programmable Gate Arrays 2002
5. 罗雪荀, 詹阳 用FPGA实现FFT算法

相似文献(3条)

1. 期刊论文 姜钊, 金声震, 姜爱民, JIANG Zhao, JIN Sheng-zhen, JIANG Ai-min 空间太阳望远镜中1-bit图像相关器的实现 - 天文研究与技术 - 国家天文台台刊 2007, 4 (2)

两维图像相关跟踪是空间太阳望远镜(SST)主光学望远镜系统达到0.1"分辨率的关键之一。本文提出了采用1-bit相关算法来实现图像快速相关运算,并设计出了基于FPGA+DSP架构的相关器硬件结构。25MHz下32×32点图像相关运算在XCVR800芯片上实现仅需0.33ms,而硬件规模仅为基于FFT相关器(12-bit数据)的1/9。

2. 期刊论文 王涛, 姜爱民, 金声震 图像相关系统中的二维FFT的FPGA实现 - 航空计测技术 2003, 23 (3)

研究了二维快速傅里叶变换(FFT)的FPGA(Field Programmable Gate Array)实现问题,解决了空间太阳望远镜在轨实时图像处理与航天级DSP运算速度不足之间的矛盾;经过实验验证,各项指标达到了设计要求。

3. 学位论文 李长松 空间太阳望远镜稳像系统中图像相关器的研究 2008

空间太阳望远镜是我国自主研发的第一颗天文卫星。主要用于对太阳的全日制、多波段以及高分辨率观察。将有助于太阳小尺度磁场和活性区磁场精细结构的研究,并有望取得突破性进展,因此曾被国外媒体称为“雄心勃勃的大计划”。

空间太阳望远镜的1m主光学系统具有0.1"的瑞利衍射极限分辨率。望远镜本身的卫星平台仅提供±6"的指向精度和3"/s的姿态稳定度,由于卫星本身的震动以及太阳自转会造成分时间内的成像模糊。在必需增加积分时间以提高CCD图像信噪比的情况下,需要利用相关跟踪器改正,实现对成像的运动补偿。

本文对空间太阳望远镜相关跟踪器的目标图像特征进行了分析。考虑到太阳米粒组织的对比度比较低、形状不规则等特点,沿用了国内外一贯采用的相关算法实现图像偏移检测。相关算法在整像元偏移检测上具有很好的效果,辅助亚像元拟合可以得到更高的检测精度。本文通过对大量米粒图像进行仿真分析发现,引入修正参数后的曲面拟合算法可以进一步提高亚像元偏移检测精度。其中修正参数是利用统计学方法对其分布进行分析后,根据数学期望的估计值得到的。

对于整个相关跟踪系统来说,相关计算十分费时。过去由于器件水平有限,太阳望远镜的相关跟踪系统难以实现快速计算,造成了系统具有明显时滞特征。而纯时滞系统的闭环特性与时延有反比关系,因此寻求快速相关实现方法成为类似系统所需解决的关键之一。快速相关器的设计可以利用简化相关算法实现,主要是减少乘法的次数,例如以减法相关算法取代乘法相关算法。但是,减法相关算法容易产生零漂。本文在总结前人的经验基础上,根据当今集成电路发展的水平,采用了高集成度的FPGA实现相关运算。利用并行算法将相关运算进行分解,并与FPGA的结构特点相结合,设计出并行相关计算单元。使之具有模块化、数控分流等特点。充分利用了硬件资源,达到缩短计算时间的目的。

利用FPGA实现相关运算的数据结构为浮点格式。考虑到资源有限,在保证运算过程不发生溢出的情况下,采用18 bits的浮点运算。通过实际测试,相关矩阵的计算结果与双精度浮点的相比,相对误差在2%~6%之间。

利用理论推导、仿真波形和示波器测试都可以验证,整个相关计算时间约为240 μs。满足空间太阳望远镜的需求。

综上所述,拟合修正参数的引入改善了亚像元偏移检测精度,为高精度亚像元偏移检测提供了算法保证;利用并行算法和FPGA结构特点相结合的方法,极大缩短了相关运算的计算时间。实现了计算时间和计算精度指标的优化。本文的相关跟踪计算单元不但满足了相关跟踪器的指标需求,而且为其他类似实时高精度数据处理系统提供设计参考。

关键词: 空间太阳望远镜; 相关跟踪器; 相关计算; FPGA; 亚像元拟合

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dianzixb200601030.aspx

授权使用: 陕西理工学院(sxlgy), 授权号: 69a31ce4-03ad-4d37-a8ad-9df201084243

下载时间: 2010年9月15日