

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 Lihong SUN Cairhong 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 ±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:

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

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%. 二维矢量基 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:

$$X(k_1, k_2) = \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} x(n_1, n_2) W_N^{n_1 k_1} W_N^{n_2 k_2}, \quad (2)$$

$$W_N = \exp(-j2\pi/N), W_N^{nk} \text{ 为 } W \text{ 因子, } k = 0 \dots N-1$$

按时间抽取方式将式 (2) 分解成四个和式, 即 n_1 和 n_2

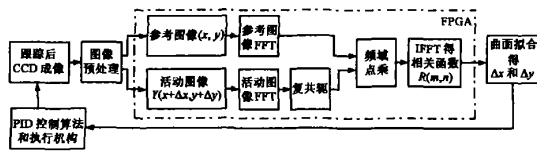


图 1 二维图像相关算法流程

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：

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

其中， $S_{00}(k_p, k_2)$ ， $S_{01}(k_p, k_2)$ ， $S_{10}(k_1, k_2)$ ， $S_{11}(k_1, k_2)$ 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

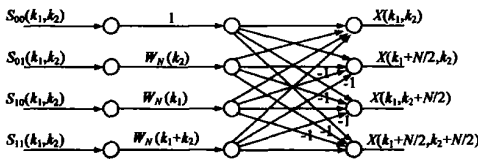


图 2 矢量基 2×2 蝶形流图

$$\begin{aligned}
 S_{00}(k_b, k_2) &= \sum_{m_1=0}^{N/2-1} \sum_{m_2=0}^{N/2-1} x(2m_1, 2m_2) W_N^{2m_1k_1+2m_2k_2} \\
 S_{01}(k_p, k_2) &= \sum_{m_1=0}^{N/2-1} \sum_{m_2=0}^{N/2-1} x(2m_1, 2m_2+1) W_N^{2m_1k_1+2m_2k_2} \\
 S_{10}(k_p, k_2) &= \sum_{m_1=0}^{N/2-1} \sum_{m_2=0}^{N/2-1} x(2m_1+1, 2m_2) W_N^{2m_1k_1+2m_2k_2} \\
 S_{11}(k_b, k_2) &= \sum_{m_1=0}^{N/2-1} \sum_{m_2=0}^{N/2-1} x(2m_1+1, 2m_2+1) W_N^{2m_1k_1+2m_2k_2} \quad (4)
 \end{aligned}$$

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	$k_1 = 0$	$k_2 = 0$	$l_x = 0-15$	$l_y = 0-15$	$X_{step} = 1$	$Y_{step} = 32$	$X_{ystep} = 33$
	每个蝶形第一个值 S_{00} 在 RAM 中的位置: ADDR00= $64l_y + l_x^* 2$						
第二级	$k_1 = 0-1$	$k_2 = 0-1$	$l_x = 0-7$	$l_y = 0-7$	$X_{step} = 2$	$Y_{step} = 64$	$X_{ystep} = 66$
	每个蝶形第一个值 S_{00} 在 RAM 中的位置: ADDR00= $128l_y + l_x^* 4 + 32k_1 + k_2$						
第三级	$k_1 = 0-3$	$k_2 = 0-3$	$l_x = 0-3$	$l_y = 0-3$	$X_{step} = 4$	$Y_{step} = 128$	$X_{ystep} = 132$
	每个蝶形第一个值 S_{00} 在 RAM 中的位置: ADDR00= $256l_y + 8l_x + 32k_1 + k_2$						
第四级	$k_1 = 0-7$	$k_2 = 0-7$	$l_x = 0-1$	$l_y = 0-1$	$X_{step} = 8$	$Y_{step} = 256$	$X_{ystep} = 264$
	每个蝶形第一个值 S_{00} 在 RAM 中的位置: ADDR00= $512l_y + 16l_x + 32k_1 + k_2$						
第五级	$k_1 = 0-15$	$k_2 = 0-15$	$l_x = 0$	$l_y = 0$	$X_{step} = 16$	$Y_{step} = 512$	$X_{ystep} = 528$
	每个蝶形第一个值 S_{00} 在 RAM 中的位置: ADDR00= $32k_1 + k_2$						

(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， $k_1 = k_2 = 0$ 256 个阵列用 k_x 和 l_y 来定位， $k_x, l_y = 0, 1, 2, \dots, 15$ 由阵列位置 l_x, l_y 和 W 因子参数 k_1, k_2 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 k_1 和 k_2 及 $k_3 = k_1 + k_2$ 寻址得到。寻址方式可用表 1 来概括：

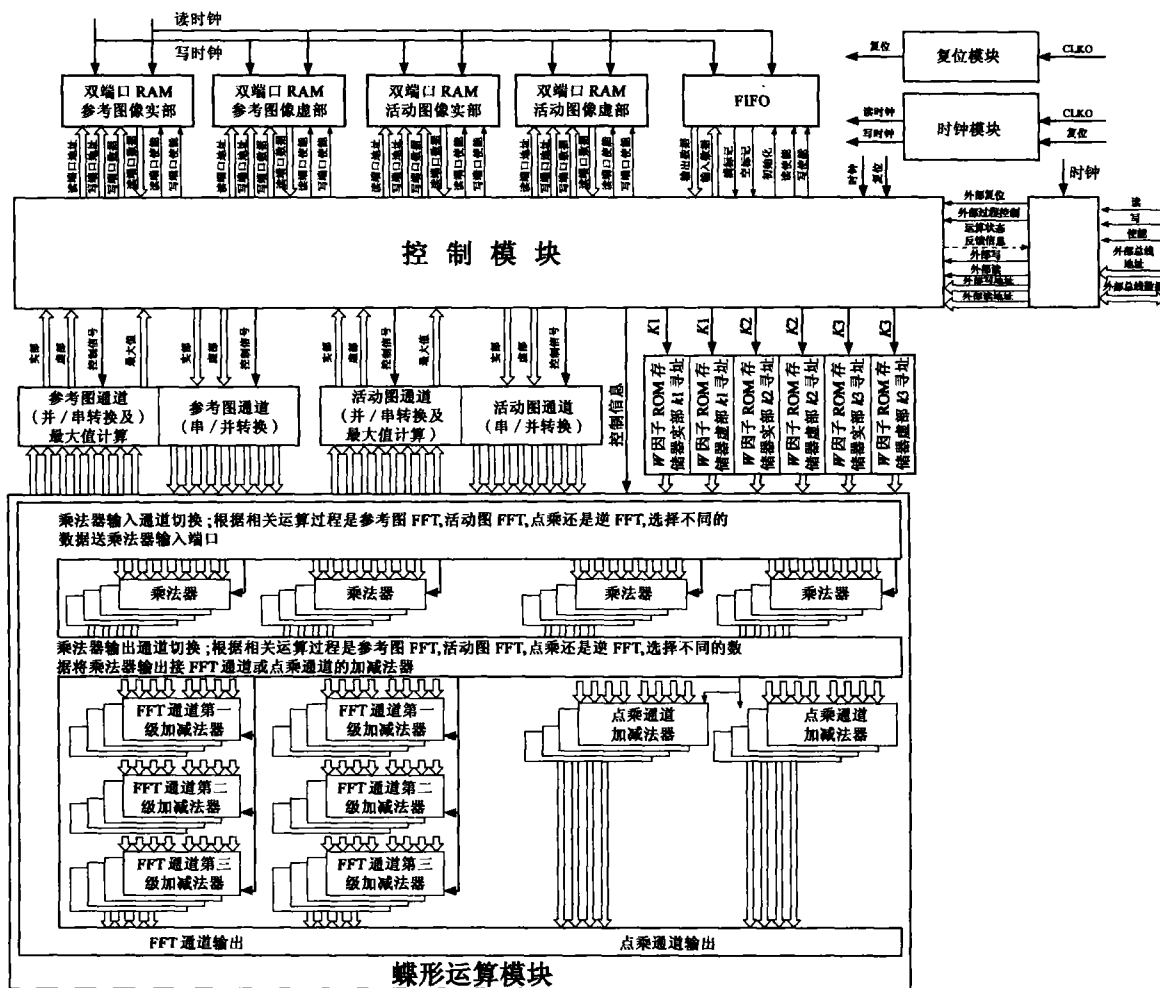


图 3 相关运算单元模块化设计框图

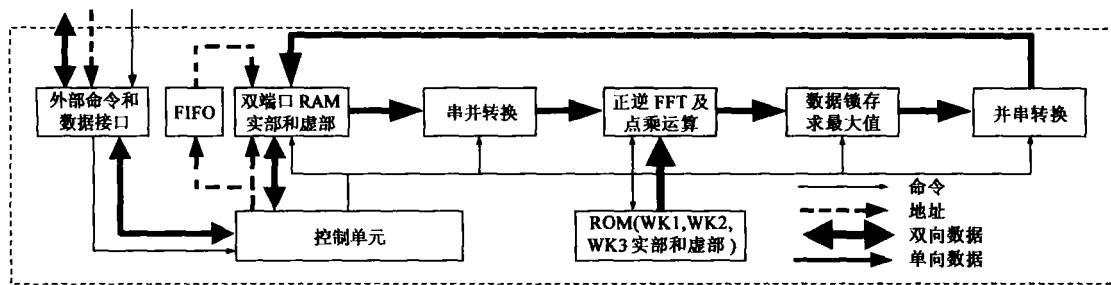


图 4 相关运算流程图

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Q。当顶层状态机调度进入FFT状态时，此状态机进入FFT五层蝶形运算，每层蝶形运算对应一个状态。运算结束后再次进入等待状态，并设置对应的FFT运算结束标志为1。

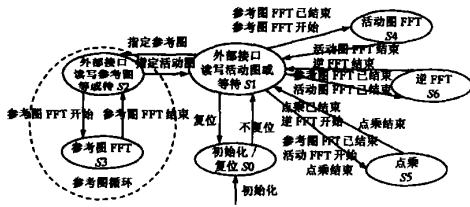


图 5 相关运算状态机

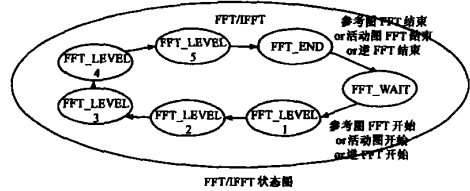


图 6 二维FFT五层蝶形运算状态机

3.5 相关算法采用改进的动态块浮点方法

相对于浮点的数据表示方式，能根据数据值大小进行移位的定点方式即块浮点方式。文献[3]从均方根意义讨论过，复数数组最大模是非减的，即对于按时间抽取的FFT，其每级蝶形运算后最大模都会增加 $1 + \sqrt{2} \approx 2.414$ 倍。

须将结果右移 2bits。文献[5]中对块浮点的移位控制方法是对蝶形运算输出数据的高三位进行溢出检测，绝对值最大的那个数高三位决定该级蝶形运算后的移位方式。

相关跟踪是对一系列图像进行相关运算和跟踪实现的，块浮点移位控制比较复杂，每层蝶形运算后，仅判断溢出移位或右移 2bits是不够的。设计中改进了动态块浮点方法，策略是将刚运算完的 32×32 阵列的实部和虚部求绝对值后按位异或，得最大值最高BIT位置，每次(层)运算后送入控制单元，决定下次(层)运算时数据左右移，同时复位最大值判断模块以保存次轮最大值。该过程与FFT等运算同步，没有附加延时。每轮参与运算数据最大值都保持在相同的数量级，即使图像序列的动态范围较大，仍保持同样相关运算精度。蝶形运算和点乘运算乘、加级数不同，移位处理不同。

3.6 并行流水时序设计

设计用一个蝶形进行流水。将FFT运算每层蝶形运算分为259个节拍，共1295个时钟周期，五层FFT需6475个时钟。根据蝶形运算和双端口RAM输入输出数据需要，主要节拍为5个时钟周期。第1个节拍从存储单元读出第一组四对复数；第2拍读第二组数，同时将第一组数送入运算单元进行计算；第I(I=3...256)个拍，读第I组数，将I-1组数送入运算单元，并将I-2组数写回。第257至258拍将数据写回，第259拍完成状态转换。点乘运算分为258个节拍，共1295个时钟。正逆FFT时序相同，见图7。

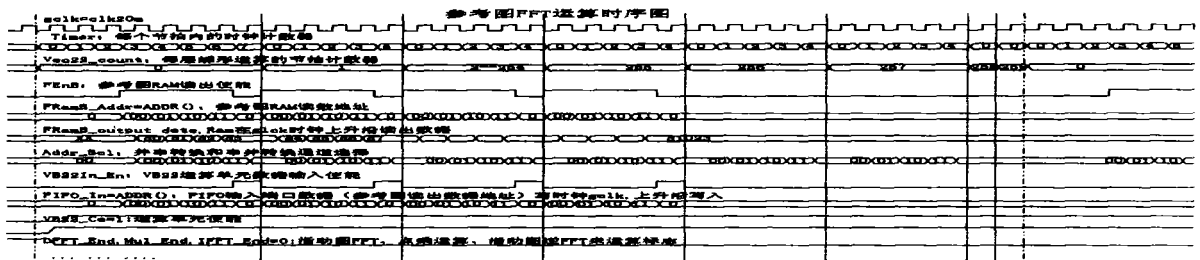


图 7 参考图 FFT 运算简化时序图

4 验证结果

成。PC机通过PC接口与FPGA通讯；

- 验证方法：在包含 XCV 800-4HQ240 芯片的 PC 卡上完

- FPGA 资源：块 RAM 利用率 96% (图像实、虚部按照 20bit 带符号数保存)，分布式资源占 62%；

表 2 MATLAB 相关运算和 VHDL 相关运算经抛物面拟合后结果比较

原始文件	实际位移		Matlab 浮点相关运算抛物面拟合结果		VHDL 20bit 浮点相关运算抛物面拟合结果		绝对误差 $ \Delta x_m - \Delta x_v $	绝对误差 $ \Delta y_m - \Delta y_v $
	Δx	Δy	Δx_m	Δy_m	Δx_v	Δy_v		
x0_05y_0_05	0_05	0_05	-0_0487	-0_0487	-0_0455	-0_0455	0_0032	0_0032
x0_15y_0_8	0_15	0_8	-0_8040	-0_1468	-0_8089	-0_1467	0_0049	0_0001
x0_1y_0_1	0_1	0_1	-0_0976	-0_0976	-0_0947	-0_0947	0_0029	0_0029
x0_2y_0_2	0_2	0_2	-0_1959	-0_1959	-0_1939	-0_1939	0_0020	0_0020
x0_5y_0_5	0_5	0_5	-0_4948	-0_4948	-0_5087	-0_5087	0_0039	0_0039
x0_6y_0_1	0_6	0_1	-0_0977	-0_6056	-0_0962	-0_6040	0_0015	0_0016
x0_7y_0_7	0_7	0_7	-0_7051	-0_7051	-0_7093	-0_7093	0_0042	0_0042
X1_5y1_5	1_5	1_5	-1_4815	-1_4815	-1_4838	-1_4838	0_0023	0_0023
X1_8y1_8	1_8	1_8	-1_7790	-1_7790	-1_7832	-1_7832	0_0042	0_0042
x1y1_12	1	1	-1	-1	-1_0023	-1_0023	0_0023	0_0023

• 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 Virtex™ 2.5V

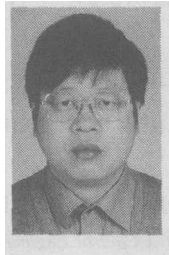
Field Programmable Gate Arrays [DB/OL]. <http://www.xilinx-china.com/xlnx/xwch>, 2002-12-09.

- [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 月出生于江苏省沛阳县, 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, 主要从事星敏传感器研制及空间电子技术应用研究.
E-mail: schl@sst.bao.ac.cn