

文章编号 1004-924X(2008)07-1273-06

遵循 xDM 标准的 PGF 压缩编码器优化设计

胡新华^{1,2}, 邓元勇¹, 王先平³

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;
3. 北京芯系嵌入式系统设计室, 北京 100012)

摘要:针对太阳观测中产生的极大数据流量,提出了一个遵循 xDM 标准的渐进式图形文件(PGF)压缩编码器对太阳观测图像进行实时压缩以节省存储空间和网络带宽。分析并裁减了在自然图像压缩和压缩速度方面都有很大优势的 PGF 压缩算法;按 xDM 标准要求的接口设计了一个 PGF 压缩编码器,并针对达芬奇硬件架构的特点在软件设计、C 语言编程和线性汇编等多个方面进行了优化;最后,对压缩比、压缩时间和压缩信噪比等性能参数进行了在线实时测试。测试结果表明,优化后的 PGF 压缩编码器的压缩速度是原有编码器的 18.7 倍,完全满足太阳望远镜实时图像处理终端的要求。

关键词:渐进式图形文件(PGF); xDM 标准;编码器;达芬奇技术;图像压缩;优化

中图分类号: TP751; TN762 **文献标识码:** A

Optimal design of PGF compression encoder based on xDM standard

HU Xin-hua^{1,2}, DENG Yuan-yong¹, WANG Xian-ping³

(1. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
3. *Beijing XinXi Embedded System Design House, Beijing 100012, China*)

Abstract: A Progressive Graphic File(PGF) compression encoder based on xDM standard was presented for the real-time image compression of a solar image. The PGF compression algorithm with advantages of natural image compression and compression speed was analyzed and customized. According to the interfaces required by xDM standard, a PGF compression encoder was designed. Aiming at the features of the DaVinci hardware architecture, the PGF compression encoder was optimized on many aspects such as software design, C language program and linear assembly language program. Finally, a real-time online test was carried out for the performance parameters on compression ratio, compression time and SNR of the PGF compression encoder. The experimental result shows that the speed of the optimized PGF compression encoder is 18.7 times that of original one, which can fully meet the design requirements of the real-time image processing system of a solar telescope.

Key words: Progressive Graphic File(PGF); xDM standard; encoder; DaVinci technology; image compression; optimization

收稿日期:2007-10-22;修订日期:2008-01-22.

基金项目:国家重点基础研究发展规划基金资助项目(No. 2006CB806301);国家自然科学基金资助项目(No. 60673158)

1 引 言

国家天文台怀柔太阳观测基地口径为 14 cm、观测波段为 656.3 nm 的 H_{α} 全日面望远镜,可在日常观测中对日面爆发性活动特别是耀斑爆发进行监测^[1],其终端实时图像处理系统(SIPRS)采用了 TI 公司最新一代高性能的数字视频处理技术—达芬奇技术^[2],具有以下图像处理功能:

(1) 日面图像实时采集,并对日面图像进行预处理如大气扰动改正、几何改正和积分去噪等,以及统计分析如偏振计算、日面活动类型归类和频繁程度统计;

(2) 耀斑、谱斑和日珥等日面活动特征实时提取与识别;

(3) 日面活动图像的压缩、传输和存储。

H_{α} 全日面望远镜采用数字 CCD 相机 MDC-1004,图像采集分辨率高达 1 004 pixel \times 1 004 pixel \times 12 bit,最高帧速 48 frame/s,原始数据流量最高可达 92.3 MB/s。SIPRS 采用 100 M 以太网对采集的原始数据向高速存储和回放系统进行传送,最高速度只有 12.5 MB/s,需要高速高性能的压缩算法对原始图像数据进行压缩,单帧图像压缩时间不能超过 1/48 s,即 20.8 ms,压缩比不能低于 7.4。为保证对太阳活动区域压缩后的重构图像不损失分辨率,要求压缩算法具备全局域可重构特点,压缩信噪比(SNR) $>$ 26 dB。

目前较为先进的图像压缩算法有很多,如自适应二进制优化(ABO)、分形编码、人工神经网络编码和小波压缩^[3]。这些压缩算法应用于多种图形图像文件格式中,如渐近式图形文件(PGF)、双平衡图像压缩(JBIG2)、无失真 JPEG(LSJPEG)、JPEG 新版(基于小波变换)(JPEG2000)、便携网络图形(PNG)和微软媒体相片(WMPPhoto)等等,这些文件格式名称同时也表示它们所采用的算法,一般不予区分。

PGF 压缩算法对自然图像压缩和压缩速度相对于大多数压缩算法(如压缩性能很高的 JPEG2000)有很大优势,但开源的 PGF 算法代码仅对 x86 平台做了程序优化,为将其应用于达芬奇平台上,需要按达芬奇平台的最新算法标准—xDM 标准要求的接口进行改造,设计成 PGF 压

缩编码器,并针对达芬奇硬件架构的特点在软件设计、C 语言编程和线性汇编等多个方面进行软件优化,根据太阳图像压缩的特点对原始 PGF 算法进行一定的裁减,以进一步提升 PGF 压缩编码器的压缩性能。

2 PGF 与 xDM 简述

PGF 是与 JPEG2000 同期开发的,但其焦点是速度而不是压缩率,而且是遵循 GPL 授权的开源项目,十分适合科研应用。它基于带渐近编码特色的快速离散小波变换,支持无损和有损图像压缩,对自然图像(如全日面图)和遥感图像压缩具有优势。为提升压缩速度采用了基于整型数据的小波变换,在 x86 平台上同样压缩比的条件下 PGF 比 JPEG2000 的压缩速度快约 10 倍^[4],因此十分适合对压缩速度和性能都有很高要求的场合。

因 PGF 公开源代码,可方便地向其他平台进行移植,如以达芬奇技术为核心的 SIPRS。TI(德州仪器)公司为规范其达芬奇平台上的多媒体(音频、语音、图像和视频)处理算法,制定了一套算法标准—xDM(基于 xDAIS 算法标准的数字媒体)标准。

xDM 标准对各种各样的多媒体编解码器定义了一套统一的应用程序编程接口(API),以方便整合,确保互通性^[5]。它构建于 TI 经过良好验证的 eXpress DSP 算法互用标准(也称为 xDAIS)规范之上,解决了如下 3 方面的问题:各类多媒体算法如音频、语音、图像和视频处理算法统一的轻量级 API;元数据分析、文件格式、定制处理等扩展灵活性;各算法和各算法提供商之间的互操作性,以期实现如下七个目标:实现各算法提供商提供的多媒体编解码器的即插即用架构;加速多媒体产品如数字相机、蜂窝电话、机顶盒和便携多媒体播放器的上市速度;基于现有的多媒体编解码器类(如音频、语音、图像和视频),提供一个标准的接口;基于现有的多媒体编解码器类,定义公共的状态和参数;为定制功能提供灵活的扩展性;降低接口开销;为系统开发者降低集成时间。

本文遵循 xDM 标准的要求,分析了 PGF 算法在程序实现上的一些特点,从软件实现上充分利用达芬奇平台的多种硬件和软件资源,优化了

PGF 压缩编码器的实现。

3 PGF 编码器优化设计

3.1 算法原理分析与裁减

PGF 编码属于变换域编码,其变换—量化—编码流程如图 1 所示。



图 1 PGF 变换、量化和编码流程图

Fig. 1 Flowchart of transformation, quantization and encoding for PGF

因原始图像是灰度图,无需颜色空间转换,相对于原 PGF 算法节省了一个步骤,编程中对此处代码进行了裁减,使算法速度得到了进一步提高, SIPRS 采集的原始全日面图像可直接输入 DWT 进行变换。

PGF 的张量积 DWT 选用了 5/3 滤波器,其低通滤波器和高通滤波器的长度分别为 5 和 3,滤波器系数分别为 $k(1,2,6,2,1)$ 和 $k(2,4,2)$,其中 $k=1/4\sqrt{2}$,开方运算在变换结束后通过归一化操作(将低通滤波器除以 $\sqrt{2}$,而高通滤波器乘以 $\sqrt{2}$)来消除,最终的乘除运算在算法的整型数据实现中以高速的移位运算完成。一维信号的一层前向变换(解构变换,重构表达式略)表达式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} h_0 = x_1 - \left[\frac{x_0 + x_2 + c_1}{2} \right] \\ l_0 = x_0 + \left[\frac{h_0 + c_1}{2} \right] \\ h_k = x_{2k+1} - \left[\frac{x_{2k} + x_{2k+2} + c_1}{2} \right] \\ l_k = x_{2k} + \left[\frac{h_{k-1} + h_k + c_2}{4} \right] \end{array} \right\} k=1, \dots, M-1$$

$$\left. \begin{array}{l} l_M = x_{N-1} + \left[\frac{h_{M-1} + c_1}{2} \right] N \text{ 为奇数} \\ h_M = x_{N-1} - x_{N-2} \\ l_M = x_{N-2} + \left[\frac{h_{M-1} + h_M + c_2}{4} \right] \end{array} \right\} N \text{ 为偶数}$$

上式中 $\{x_i\}, i \in [0, N-1]$ 是长度为 N 的一维离散信号, l_i 和 h_i 分别为低通滤波器和高通滤波器的子带采样输出, $M = \lfloor N/2 \rfloor - 1$, c_1 和 c_2 为

小整型常数。二维信号的行列可以当成系列的一维信号,上面的一维变换在程序上可方便地拓展到二维领域。

为充分利用达芬奇处理器的高速缓存,先对图像中一定数目的行进行滤波,接着对滤波结果进行列滤波,然后再处理下一个一定数目的行,而不是处理完所有行后再对结果进行列处理。因 SIPRS 中达芬奇处理器的缓存存取速度是其外存的 3 倍,这样的处理可将 DWT 变换速度提升 2~3 倍。

带死区的一致标量量化是 PGF 编码中唯一造成信息损失(有损压缩)的步骤。虽然向量量化通常比标量量化功能更强,但固定间隔长度的标量量化更简单且程序上更容易优化。标量量化中设置的死区可将大量小波转换系数设置成零而生成一个稀疏矩阵,如果再将间隔长度取 2 的幂,结合滤波器系数,可极大地简化运算、降低算法空间复杂度并提高算法速度。

PGF 编码器的最后一步就是将量化的小波转换系数进行编码,生成一个位流。采用的渐近小波编码包含两个主要步骤:

(1) 重新排序。与强调编码效率的嵌入式零树(EZT)编码或者结构树集合划分(SPIHT)编码不同,在 PGF 中采用简单且数据无关的快速的重新排序算法:首先将子带按一定规则划分成固定尺寸(8×8 和 4×4 两种)的矩形块,然后按小波系数的金字塔分层从顶层向第一层按对角线进行交替扫描,即可将相近的小波系数归类,然后将收集的块按类似的扫描方式填充到具有 2 的幂大小的固定尺寸的宏块中去,为压缩做好准备。

(2) 压缩。自适应行程(ARL)编码相对而言较为简单,速度较快,用于对重新排序生成的宏块进行独立编码。在高层的位平面上零行程长且编码效率很高,而接近底层的位平面零行程短,需要对算法做改进,如果行程编码码长超过被编码序列长度,即将被编码序列直接拷贝到输出的压缩序列中并做上标识,从而提高压缩率。

SIPRS 仅需要图像在线压缩,因此软件实现中也将原始代码中包含的重构代码裁减掉了,使代码量减少了几近 1/3。

3.2 接口标准化

为满足 xDM 算法标准,PGF 编码器需实现 8 个标准接口(函数),对于一个具体的 PGF 编码器实例来说这 8 个函数的执行顺序如图 2 所示:

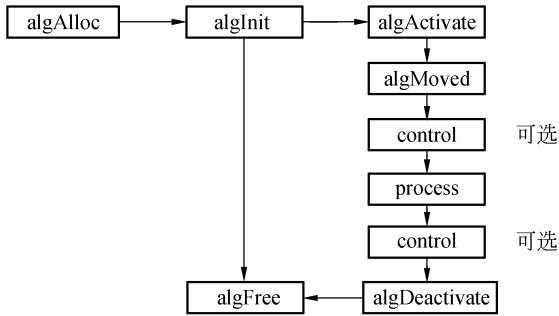


图 2 xDM 算法标准接口

Fig. 2 Standard interfaces of xDM algorithm

各函数的功能描述如表 1 所示:

表 1 xDM 算法标准接口描述

Tab. 1 Description of standard interfaces of xDM algorithm

函数名称	功能描述
algAlloc	查询算法,获取其内存需求
algInit	初始化算法实例
algActivate	通知算法要处理的缓冲区有效,可调用 process 进行算法处理
algMoved	通知算法实例其内存已经重新分配
control	算法相关的控制与状态
process	算法核心处理,如 PGF 的变换—量化—编码过程
algDeactivate	保存全部永久数据
algFree	允许算法初始化由 algAlloc 请求的内存

PGF 编码器属于 xDM 中的图像编码器,算法核心处理都在 process 函数中进行,全日面图从其输入缓冲区参数传入,经变换—量化—编码后,PGF 压缩图像从其输出缓冲区参数传出;其余几个函数只用来做内存请求、分配、初始化和算法参数控制等一次性辅助工作。各个函数参数和返回值的具体细节见参考文献[6]。

3.3 软件优化

PGF 编码器在 PGF 算法原理上做了一些裁减后,主要针对达芬奇平台的硬件和软件特点进行了编程实现方面的优化^[7-8]。SIPRS 采用基于 C64x+内核的 DM6437,该处理器有二级缓存结构^[9],合理地利用可使算法性能成倍提升;从编程

上还可对 C 语言代码进行优化^[10],采用线性汇编语言进行关键代码段的并行编程^[11];对底层操作系统 DSP/BIOS 上的任务进行调度优化^[12];充分利用 TI 提供的优化的数字信号处理函数库^[13]和图像处理函数库^[14],都可使算法性能进一步得以改善。

高速缓冲存储器(CACHE)是临近 CPU 的一小块高速存储区,利用代码以及数据的时间和空间临近性缓冲一定的指令和数据来提高程序性能,其关键在于保持 CACHE 的一致性。采用 DM6437 的 32 kB L1P 程序 CACHE 将 PGF 编码器的变换—编码—压缩中的函数全部缓冲,再用 EDMA 将 DDR2 中的全日面图以双缓冲的形式逐次送入 80 kB L1D 数据 CACHE 和 128 kB L2D CACHE 进行数据缓冲,通过对代码和数据的划分以及函数归类将 CACHE 效率提高到了 90%以上,也将 PGF 的速度比不用 CACHE 提升了 2 倍多。

在对程序代码进行优化的过程中,达芬奇数字媒体处理器的集成开发环境(CCS)中提供的性能测试工具可对代码段、循环和函数进行精确到指令周期的测试,这样就可以找到最消耗时间的代码段,从而使程序优化做到有的放矢。除了采用现有的优化函数库之外还进行了如下的手工优化:

(1) 采用 C 语言编译器的优化选项对程序进行优化。高层的优化实现对代码的优化,底层优化实现针对达芬奇数字媒体处理器平台相关的代码生成。共有 0~3 四级优化,数字越大优化程度越高。优化内容有:代码简化,无用代码和函数消除;循环和函数优化,小函数在线化(inline);软件流水;循环展开等。经过采用 C 语言优化器的优化,PGF 编码器代码量减少了 36%,性能提高了 3 倍。

(2) 充分利用并行硬件资源实现软件流水。C64x+内核总共有 64 个 32 bit 的寄存器,8 个独立的功能单元(2 个乘法器和 6 个算术逻辑运算单元),深达 11 级的流水线,一个指令周期内最多可执行 8 条指令,每个乘法器每个时钟周期可执行 1 个 32 bit×32 bit 的乘法、2 个 16 bit×16 bit 的乘法或者 4 个 8 bit×8 bit 的乘法;C64x+内核特有的软件流水的循环(SPLOOP)缓冲无需对硬件资源进行显性调度,即可优化 8 个功能单元的

使用,并行完成对循环中多个迭代的调度。充分利用这些并行硬件资源可实现软件的高度流水。如果知道两个指针所指的数据块是相互独立的,可在程序中用 restrict 关键字明确指出,这样编译器会优化数据的存取,使其流水化。

(3) 将短整型数据用整型或者更长的数据类型进行处理。C64x+内核具有双 16 bit 扩充功能,在一个周期内可完成双 16 bit 的乘法、加减法、比较、移位等操作。在优化过程中将连续的短整型数据流操作转化成对整型数据流的操作,这样一次可以把两个短整形(16 bit)的数据(如全日面图的像素数据)读入一个 32 bit 的寄存器,然后用内联函数对它们进行处理,从而使算法速度提高将近 2 倍。

(4) 使用内联函数和循环展开。内联函数是 C64x+ C/C++ 编译器提供的内置函数,是与 C64x+ 汇编指令映射的或者经过平台相关特别优化的在线函数,可用于快速优化 C 程序。循环体内加入内联函数不影响程序的流水执行,这是和一般函数的最大区别;而循环展开可以使 CPU 内的功能单元和寄存器得到充分的利用,使循环体达到最佳流水状态。

(5) 进行汇编代码级的优化。使用线性汇编对 C 程序中的关键部分重新改写并采用汇编器的优化选项进行自动优化。因为汇编语言是平台相关的,用线性汇编改写程序时还可根据达芬奇的平台资源进行手工优化。线性汇编介于汇编语言和 C 语言之间,它具有很多高级语言的特性,编写时无需考虑指令并行执行、指令延迟、流水线填充以及寄存器的分配和使用,可用汇编优化器来自动实现这些功能。汇编优化进一步将 PGF 编码器性能提升了 56%。

CCS 的探针测试表明,经过上述一系列软件优化技术的运用,优化后的 PGF 编码器在代码量上比未经优化的代码量减少了 43%,速度达到原始代码(未经平台优化,仅移植过来的代码)的 18.7 倍。因此如果不能在算法原理上进行改进,充分利用算法赖以执行的硬件和软件平台的资源,在算法的软件实现上进行优化,也可使算法性能得到巨大的提升。

4 PGF 编码器性能测试

在 SIPRS 平台上的 DSP/BIOS 实时操作系统中,创建了 3 个实时统计对象(STS Object)对

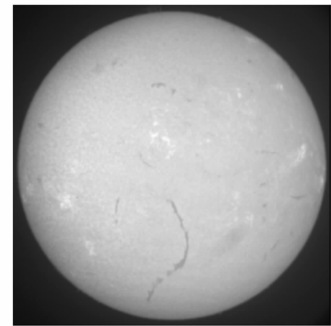
PGF 编码器压缩时间和信噪比两个性能参数进行了实时统计,统计被测参数的最大值、最小值和平均值。在线统计结果如表 2 所示。从连续测试的 5 000 个单帧全日面图的压缩测试^[15]统计结果可以看出,在压缩比为 16^[16]的条件下,单帧全日面图最长压缩时间为 19.2 ms,满足 <20.8 ms 的要求;最小信噪比为 36.5 dB,满足压缩信噪比 >26 dB 的要求。

表 2 PGF 编码器性能在线实时统计

Tab. 2 Real-time statistics for performance of PGF encoder

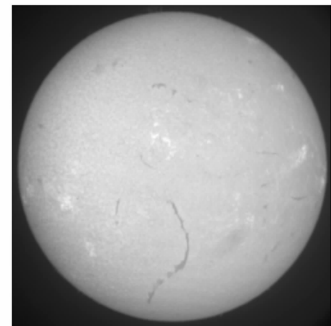
统计值	压缩比 (CR)	压缩时间 (CT)/ms	信噪比 (SNR)/dB
最大值	16	19.2	38.6
平均值	16	17.5	37.8
最小值	16	16.8	36.5

图 3 给出了高速采集和回放系统中解压的 PGF 压缩全日面图(上图)和对应的原始全日面图(下图),日面图像分析程序表明重构图像^[17]的



(a)解压的 PGF 全日面图

(a)Uncompressed PGF solar full disk image



(b)与上图对应的原始全日面图

(b)Original solar full disk image corresponding top image

图 3 PGF 的全日面图

Fig. 3 Solar full disk images of PGF

画质损失可以忽略不计,既满足重构要求,也满足日面活动离线统计(如耀斑爆发周期和太阳活动周期统计等)的需要。

5 结 论

PGF 压缩编码器在达芬奇平台上的优化实现,在压缩比为 16 的情况下单帧全日面图平均压缩时间短至 17.5 ms,平均压缩信噪比高达

37.8 dB,不但满足了 SIPRS 系统对压缩速度和压缩质量的严格要求,低至 5.77 MB/s 的压缩数据输出率还充分降低了图像数据传输对网络带宽的需求。由于只需要未经压缩的全日面图 1/16 的容量,极大地节省了高速存储和回放系统的存储空间。又其满足 TI 制定的 xDM 标准,还可以无缝地集成到采用达芬奇技术并遵循 xDM 标准进行设计的图像处理系统中,提供高速和高质量的图像压缩。

参考文献:

- [1] 全日面色球望远镜[OL]. <http://sun.bao.ac.cn/index1.html>. Solar full disk chromosphere telescope[OL]. <http://sun.bao.ac.cn/index1.html>. (in Chinese)
- [2] Texas Instruments Incorporated. *DaVinci Technology-Digital Video Innovation Product Bulletin (Rev. D)* [M]. Houston: Discpro Printing & Graphics, 2007.
- [3] Image compression [OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Image_compression.
- [4] CHRISTOPH S. A new progressive file format for lossy and lossless image compression [J/OL]. *Institute of Theoretical Computer Science*, 2003.
- [5] Texas Instruments Incorporated. xDAIS-DM (Digital Media) user guide[DB/OL]. <http://focus.ti.com/lit/ug/spruec8b/spruec8b.pdf>, 2006.
- [6] Texas Instruments Incorporated. xDAIS-DM (Digital Media) reference manual[DB/OL]. http://XDAIS_INSTALL_DIR/docs/html/index.html, 2006.
- [7] 孟占红,赵保军. 基于 DSP 的实时图像压缩软件优化技术研究[J]. 电子学报, 2006, 34(9):1558-1561. MENG ZH H, ZHAO B J. The study on software optimizing technology of real-time image compression system based on DSP [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(9):1558-1561. (in Chinese)
- [8] 陈升来,黄廉卿,郭静寰. 基于整型提升小波变换的图像处理及 DSP 实现[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3):498-502. CHEN SH L, HUANG L Q, GUO J H. Image processing based on integral lifting scheme and its implementation by DSP [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):498-502. (in Chinese)
- [9] Texas Instruments Incorporated. TMS320C64x+ DSP Cache User's Guide [DB/OL]. <http://focus.ti.com/lit/ug/spru862a/spru862a.pdf>, 2006.
- [10] Texas Instruments Incorporated. TMS320C6000 Optimizing Compiler [DB/OL]. <http://focus.ti.com/lit/ug/spru187n/spru187n.pdf>, 2006.
- [11] Texas Instruments Incorporated. TMS320C6000 Programmer's Guide [DB/OL]. <http://focus.ti.com/lit/ug/spru198i/spru198i.pdf>, 2006.
- [12] Texas Instruments Incorporated. TMS320 DSP/BIOS User's Guide [DB/OL]. <http://focus.ti.com/lit/ug/spru423f/spru423f.pdf>, 2006.
- [13] Texas Instruments Incorporated. TMS320C64x+ DSP Little-Endian DSP Library Programmer's Reference [DB/OL]. <http://focus.ti.com/cn/cn/lit/ug/sprueb8b/sprueb8b.pdf>, 2006.
- [14] Texas Instruments Incorporated. TMS320C64x+ DSP Image/Video Processing Library Programmer's Reference [DB/OL]. <http://focus.ti.com/lit/ug/sprueb9/sprueb9.pdf>, 2006.
- [15] 田宝凤,徐抒岩,孙荣春,等. 一种适合星上应用的遥感图像有损压缩算法[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(4):725-730. TIAN B F, XU SH Y, SUN R CH, *et al.*. A lossy compression algorithm of remote sensing image suited to spaceborne application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):725-730. (in Chinese)
- [16] VENKATESWARAN N, RAMANA Y V R. K-means clustering based image compression in wavelet domain [J]. *Information Technology Journal*, 2007, 6(1):148-153.
- [17] 耿则勋,王振国. 改进的天文斑点图像高清晰重建方法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(7):1151-1156. GENG Z X, WANG ZH G. Modified high definition reconstruction algorithm of astronomical speckle images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7):1151-1156. (in Chinese)

作者简介:胡新华(1978—),女,辽宁沈阳人,博士,主要研究领域为图像采集与处理系统的设计与应用,数字图像处理与识别算法的高性能 DSP 和 FPGA 实现的研究等。E-mail:hhflower22@gmail.com
 邓元勇(1965—),男,博士,研究员,主要研究领域为太阳物理和天文仪器等。
 王先平(1977—),男,硕士,高级工程师,主要研究领域为嵌入式系统架构及其应用。