

文章编号 1004-924X(2015)04-1122-09

空间相机图像复原的实时处理

付天骄^{1,2*}, 张立国¹, 王文华¹, 张宇¹, 任建岳¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:提出了一种基于有效提取点扩散函数(PSF)的图像实时复原方法来提高空间相机成像性能。从典型的图像复原原理出发,分析了实时复原的关键问题。将PSF与典型的线性复原滤波方法相结合计算出实时复原的反卷积算子,通过空间域卷积计算的方式进行实时复原,并以现场可编程门阵列(FPGA)为核心器件设计了具备图像实时复原计算性能的硬件系统。利用上述设计在硬件平台上对空间相机的遥感图像数据进行了实验验证,并与经典图像复原方法的效果进行了对比。结果显示,采用该平台对单片CCD像元数为12 000的空间相机图像进行复原后,灰度平均梯度由3.788 7提升到8.229 6,拉普拉斯和由15.456 7提升到43.907 5,达到了经典图像复原的性能。在模板尺寸为19 pixel × 19 pixel时,实时复原处理延时为1.9 ms,复原后的相机调制传递函数在Nyquist频率处从0.1提高到0.23,有效地提高了空间相机系统的成像性能。

关键词:空间相机;图像实时复原;反卷积算子;现场可编程门阵列

中图分类号:V447.3;TP752.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152304.1122

Real-time processing of image restoration for space camera

FU Tian-jiao^{1,2*}, ZHANG Li-guo¹, WANG Wen-hua¹, ZHANG Yu¹, REN Jian-yue¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)
* *Corresponding author, E-mail: futianjiaohit@163.com*

Abstract: To enhance the imaging performance for a space camera, a real-time image restoration method was proposed based on the efficient extraction of Point Spread Function (PSF). The key issues of real-time image restoration were analyzed based on typical image restoration methods. A deconvolution operator was given by combining the PSF with the typical image restoration methods. Then, the real-time recovery processing was carried out in a spatial domain by using a Field Programming Gate Array(FPGA) as the core device. The verified experiments on the remote sensing image data from the space camera were performed on a hardware platform and the restoration results by proposed method were compared with those by typical image restoration methods. The comparative results show that the gray mean gradient of the image from one space camera with 12 000 pixel CCD chip has improved from 3.7887 to 8.2296 and the Laplacian from 15.4567 to 43.9075, which achieves

收稿日期:2014-05-21;修订日期:2014-07-07.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

the same performance as that of the typical image restoration methods. The image processing delay is 1.9 ms when the deconvolution operator size is $19 \text{ pixel} \times 19 \text{ pixel}$, and the Modulation Transfer Function(MTF) is increased from 0.1 to 0.23 at the Nyquist frequency. These data demonstrate that the imaging performance within the whole space camera system is significantly improved by the real-time image restoration system.

Key words: space camera; real-time image restoration; deconvolution operator; Field Programmable Gate Array(FPGA)

1 引言

空间相机在对地观测和地球遥感领域都具有很高的应用价值,但是目前空间相机所获得的遥感图像都不可避免地存在退化降质问题,主要原因有两点:第一,光的衍射特性决定了光学系统都存在成像模糊;第二,系统成像过程中场景与相机之间的复合运行、载荷平台的振动、CCD 采样率受限、大气抖动以及观测噪声等多种因素的共同作用也会导致图像降质^[1]。

随着空间光学技术的发展和在地观测需求的增加,人们对空间相机的成像质量提出了更高的要求。目前,空间相机在设计、加工、装调等方面的制作水平已经接近衍射极限,性能很难进一步提升。提升 CCD(Charge Coupled Device)的采样频率、减小推扫相移及平台震动、减小加工装调误差、减小系统噪声等办法虽然能提高相机性能,但所付出的代价过高,可行性很差。

针对遥感图像退化的问题,人们对图像复原方法进行了大量研究。现有的针对遥感图像的复原处理都是在地面站进行的,成本虽低但是存在获取图像滞后的问题^[2],这种滞后难以适应用户对实时获取信息的强烈需求。

为了解决对空间相机实时获得更高质量遥感图像的迫切需求与进一步提升空间相机成像性能代价过高的矛盾,本文在参考现有经典图像复原方法以及在有效提取点扩散函数(Point Spread Function, PSF)的基础上实现了空间相机图像实时复原硬件系统。通过分析总结该系统图像实时复原硬件化的关键问题,将在轨 PSF 与现有的典型线性复原滤波方法相结合计算出实时复原的反卷积模板,把通常在频域实施的复原处理过程搬到空间域进行,从而大幅降低了对于存储空间的要求。该方法满足相机图像实时复原的时序要

求,并可以给出精确的系统复原延时,便于空间飞行器系统的整体控制。该系统将图像复原计算等效为大规模并行乘法/加法运算,并选取现场可编程门阵列(FPGA)为核心器件构造图像实时复原的硬件逻辑结构,从而解决了上述关键问题。

2 空间相机图像实时复原的关键问题

2.1 遥感图像退化模型与图像复原原理

目前应用最为广泛的空间相机是线阵推扫式空间相机,其工作原理如图 1 所示。设空间相机拍摄的地面场景为 $f(x, y)$,经过相机系统后,获得的遥感图像 $g(x, y)$ 可以表示为:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

式中: $h(x, y)$ 为空间相机系统的 PSF; $n(x, y)$ 为噪声;*表示卷积。对于式(1)的退化模型,图像复原的本质是寻找一种最优准则对 $f(x, y)$ 进行估计,以得到复原后的图像 $\hat{f}(x, y)$ 。

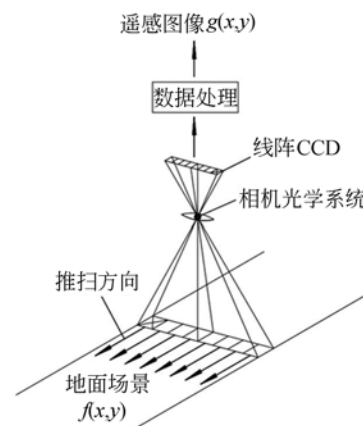


图 1 空间相机工作原理

Fig. 1 Principle for space camera

在工程领域中,针对图像退化模型进行的图像复原主要是利用点光源法、倾斜刃边法、矩形脉冲靶标法和辐射靶标法等^[3-5]获取 PSF 后的线性

非盲复原方法,例如维纳滤波和约束最小二乘方滤波等。

维纳滤波的最优准则是使 $\hat{f}(x, y)$ 与 $f(x, y)$ 的均方误差最小,如式(2)所示:

$$E\{[f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2\} = \min. \quad (2)$$

在工程应用领域,其频域表达式如式(3)所示:

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + K} \right] G(u, v), \quad (3)$$

式中: $\hat{F}(u, v)$ 、 $H(u, v)$ 和 $G(u, v)$ 分别是 $\hat{f}(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 的二维傅里叶变换, K 为规整化因子,一般取退化图像信噪比估值的倒数。

约束最小二乘方滤波方法是寻找满足最小准则函数 C 约束的图像 f , C 的定义如下:

$$C = \min \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\nabla^2 f(x, y)]^2, \quad (4)$$

其约束为: $\|g - H\hat{f}\|^2 = \|n\|^2$, ∇^2 是拉普拉斯算子,使式(4)在该约束下频域最优解的表达式为:

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \lambda |P(u, v)|^2} \right] G(u, v), \quad (5)$$

其中 λ 是使式(5)满足式(4)约束条件的拉格朗日系数。 $P(u, v)$ 是以下函数的傅里叶变换^[6]。

$$p(x, y) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

在图像复原的工程应用中,通常是在已知 PSF 条件下,采用上述式(3)或式(5)的方法对遥感图像进行复原处理。

2.2 空间相机图像实时复原的关键问题与难点

现有的图像复原处理都是在地面进行的事后处理,完全不具备实时性,用于空间相机图像实时复原系统的新方法需要解决如下关键问题:

首先,PSF 的估计精度问题。在轨 PSF 估计的高精度可以避免图像复原产生病态问题,保证图像复原的质量。由于对 PSF 估计的最终结果是一个尺寸较小的归一化二维矩阵,故可以采用较为复杂且精确的软件估算方法在地面上计算在轨 PSF,并将计算的结果注入到星上相机系统中作为图像复原的先验信息。前期工作解决了这个问题^[7]。

其次,硬件实现的问题。实时处理对于有限

的嵌入式资源来说面临以下挑战:一是存储空间的挑战。遥感图像尺寸通常很大,因此现有的在频域处理的图像复原方法对于嵌入式的硬件存储空间要求过高,即式(3)和式(5)的方法需要将整幅图像存储之后,再进行傅里叶变换以及逆变换。这意味着需要保存计算这些变换时产生的中间变量,还要成倍提升存储空间;二是计算量的挑战。以像元数为 12 kpixel、行频为 10 kHz、灰度量级为 12 bit 的 CCD 为例,每秒需要复原 1.2×10^8 个 12 bit 像元的图像,这即使是在地面处理,一般的计算机也难以承受。

最后,实时处理时序的问题。实时处理一方面要求图像复原的处理速度要不低于 CCD 像元速率,另一方面为了不增加相机整体电子学系统设计与控制的改动代价,图像复原的处理时序要与推扫时序相同,即经过复原处理后的图像输出时序与之前相同,差别仅在于短暂的延时。出于对飞行器系统控制的考虑,对这个延时最好要给出精准的定量描述,而通常在频域处理的图像复原方法显然不满足这种要求。

3 空间相机图像实时复原系统设计

3.1 空间相机图像实时复原算法设计

从上面的分析可知,现有的线性经典的图像复原方法不适合实时复原处理,而以多次迭代、逐次逼近为代表的更复杂的复原方法更不可能适用于该系统。本文在充分考虑了维纳滤波与约束最小二乘方滤波法优点的基础上,针对前文总结的关键问题,结合嵌入式硬件的计算结构对其进行改进,得到了一种新方法。

首先是利用本文前期工作提出的基于多通道盲反卷积的方法来估计 $h(x, y)$,该方法利用大视场空间相机多通道的特点,从遥感图像中提取符合局部一致性的多幅子图像对 $h(x, y)$ 进行估算,并使用交替最小化盲反卷积的思想处理单幅遥感图像,以降低估算 $h(x, y)$ 对靶标的依赖,具有估算精度高的优点^[7]。

获得高精度的 $h(x, y)$ 后,从式(3)和式(5)易知,由于 $h(x, y)$ 是先验信息,在确定了参数 K 或者是 λ 后在频域中与 $G(u, v)$ 相乘的部分

$\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + K}$ 与 $\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \lambda |P(u, v)|^2}$ 就成

为确定值,与 $G(u, v)$ 无关。更进一步,将 $\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + K}$ 与 $\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \lambda|P(u, v)|^2}$ 经过离散逆傅里叶变换后,可以得到一个空间域的模板,截取其主要的能量部分,设为 $h_m(x, y)$,如图 2 所示。

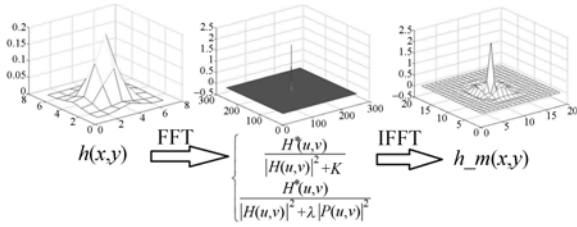


图 2 空间域反卷积复原模板的计算方法

Fig. 2 Calculation method for deconvolution operator in spatial domain

考虑到嵌入式硬件计算的截断效应可能带来精度下降的问题,需要适当增大模板。根据本课题组所研制的相机参数与成像性能,本文选取的模板大小为 19×19 。由此整个图像复原可以从频域搬到空间域进行,即:

$$\hat{f}(x, y) = h_m(x, y) * g(x, y) \quad (7)$$

需要指出,经典的图像复原在频域处理是为了解决上文提到的图像实时复原前两点难题,其带来的计算量增大的问题则由 3.2 节的 FPGA 的大规模并行处理硬件的设计来解决。

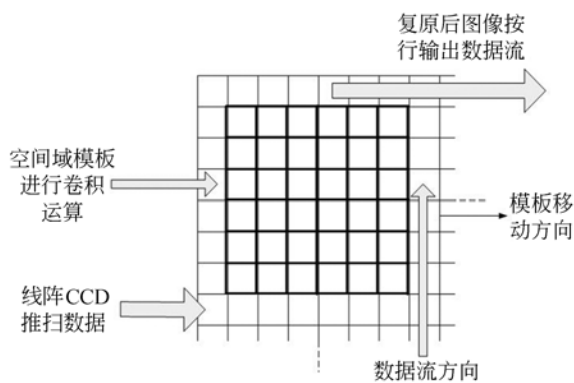


图 3 空间域反卷积复原模板计算原理

Fig. 3 Calculation principle for deconvolution operator in spatial domain

由于采用空间域卷积模板的方式对图像进行卷积处理,可以在推扫获得图像的同时进行复原

处理,如图 3 所示。对于 19×19 大小的模板,仅需要存储 10 行的图像数据就可以进行复原计算,大大降低了对硬件存储空间的要求。这种滑动窗口的处理时序可以保证与遥感相机的像元速率同步,故只需要将推扫的图像按行送入即可。

空间域卷积复原带来的另一个问题是图像的边缘可能会复原不准确,这里采用的方式是舍去图像边缘的 9 行。这并不会影响空间相机获取全视场图像,因为空间相机多采用多片 CCD 进行拼接的方式获得全视场图像^[8-9]。交错重叠的部分宽度通常在几十个像元,所以舍去 9 行图像不会影响全视场遥感图像的获取。

3.2 空间相机图像实时复原硬件设计

加入图像实时复原系统的空间相机与现有空间相机的区别如图 4 所示。现有的空间相机系统输出为退化的图像 $g(x, y)$,而加入图像实时复原系统的空间相机的输出有原始图像 $g(x, y)$ 和复原图像 $\hat{f}(x, y)$ 两个数据通道。原始图像通道主要用于 $h(x, y)$ 的提取与计算,也可用于后期分析相机状态的工作。两通道的工作模式可以根据用户需求进行控制,包括同时工作模式和分时工作模式。

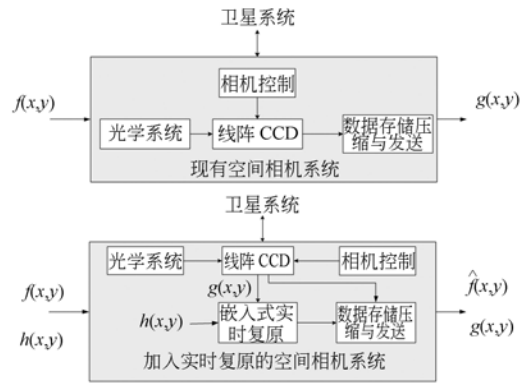


图 4 加入实时复原系统的空间相机与现有空间相机的区别

Fig. 4 Difference between space camera with and without real-time image restoration systems

图像复原通常被认为是软件领域的工作,然而基于 FPGA 的图像复原方法却完全变为硬件领域的工作^[10]。为了在两者之间搭起桥梁,选择 FPGA 作为计算的核心器件,因为本文算法的本质是并行的。虽然以 Zynq 为代表的芯片更适用于软硬件联合开发^[11],但由于其处于发展初期,功能尚需完善,故现有的一些光电设备实现特定

图像处理功能的系统多采用 FPGA 为核心器件^[12-13]。以本文的相机系统为例,对于 19×19 的模板,则每个像元要进行 361 次的乘法和 360 次的加法运算,对于像元速率为 120 Mpixels 的系统,乘法和加法的运算频率分别高达 43.32 GHz 和 43.2 GHz,这对于数字信号处理器(DSP)来说无法完成。

对于上述的问题,选择 XC7VX485T FPGA 作为运算的核心器件,2 800 个 DSP Slice 与 37 080 kbit 的 Block RAM 足够应付大规模并行运算,并可为后续更复杂的改进方法保留设计余量。

整个图像实时复原系统的原理框图如图 5 所示。

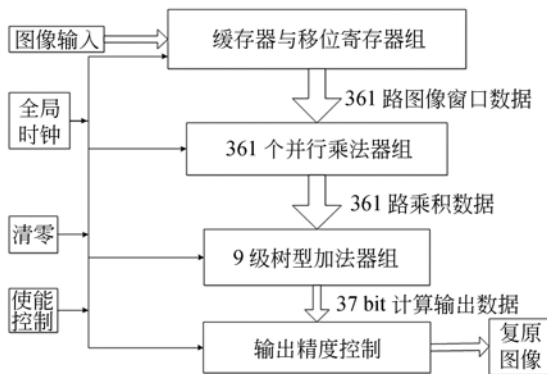


图 5 图像实时复原系统硬件设计原理框图

Fig. 5 Hardware design schematics for real-time image restoration system

硬件设计的核心部分是大规模并行的乘法和加法运算,由于所选择的 FPGA 拥有足够的硬件资源,同时为了设计方便,采用 ISE 的 IP 核生成器设计了 361 个 25×12 bit 的乘法器和 365 个 37 bit 的加法器(包括 5 个延时器),每个乘法器和加法器分别消耗 1 个 DSP Slice。其计算的时钟周期与像元时钟同步,以保证在 1 个像元时钟周期内复原并输出 1 个像元的图像数据。

硬件设计的另一个关键是并行数据流的分配,图像是以像元时钟的速率送入复原系统的,但是乘法器需要在每个像元时钟内读取 361 个邻近的像元,这需要由多输出的移位寄存器组构成 19×19 大小的反卷积窗口。缓存器与移位寄存器的连接方式如图 6 所示。

图像从行缓存 1 进入,依次经过由 19 个行缓存构成的 FIFO 结构,待图像的前 19 行完全进入

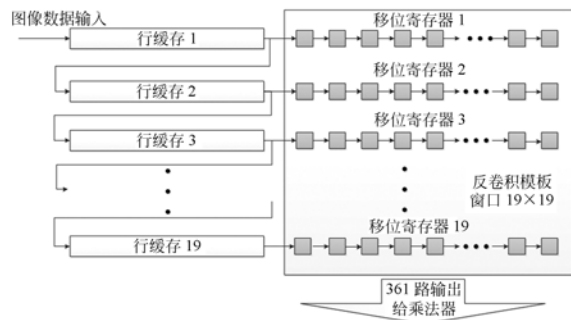


图 6 行缓存与反卷积窗口连接示意图

Fig. 6 Schematic diagram for connection between row cache and deconvolution window

行缓存后,每个行缓存的最后一个地址的数据开始不间断向寄存器组写数据,以实现 19×19 的窗口在图像水平方向的滑动。

输入每个乘法器的两个乘数分别为 12 bit 的图像数据和采用定点表示的 25 bit 的反卷积模板系数,第 1 位为符号位,最后 22 位为小数位,其定点定义如表 1 所示。乘法器采用 IP Core Generator 工具中的 Multiplier 生成 25×12 bit 的有符号流水线乘法器,可以稳定地以 120 MHz 的频率输出乘积结果。

表 1 乘法器定点数定义

Tab. 1 Definition of fixed-point for multiplier

定义项目	符号位	整数位	小数位	总位数
模板系数	1	2	22	25
乘积结果	1	14	22	37

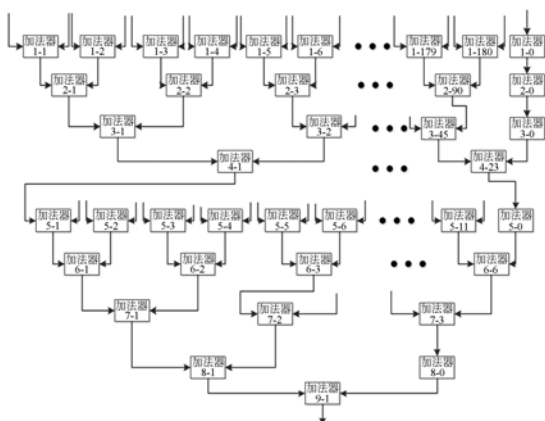


图 7 9 级树型加法器组

Fig. 7 9-level tree-type adders

得到 361 路乘法器输出的乘积后,需要在一个像元时钟周期内做 360 次加法,得到的总和即为复原后的图像。加法器由 IP Core Generator 工具的 Adder Substracter 生成,并采用 9 级树型加法器组构成整体运算逻辑功能,如图 7 所示。编号为 1-0、2-0、3-0、5-0 和 8-0 的 5 个加法器是为了保证每一级的加数数量均为偶数,以便于控制,其本质是延时器,加上的另一个数是 0。第 1~9 级的加法器数量分别为 181、91、46、23、12、6、3、2 和 1 个,共消耗 365 个 DSP Slice,算上前面 361 个乘法器的,一共消耗了 726 个 DSP Slice。

从加法器输出的数据结果是 37 位的二进制代码,取其中的整数部分作为复原的图像的灰度值。为了保证精度,对输出采用四舍五入的方法进行修正。由表 1 可知,乘积结果中整数部分是第 23 位到第 34 位,故取第 1 位小数位为第 22 位,当该位为 1 时,在输出结果加 1,为 0 时正常输出。

FPGA 综合后的主要逻辑资源消耗如表 2 所示。从表 2 可以看出,设计方法对于本系统所选用的 FPGA 的资源占用率较低,并且乘法器的工作频率也远没有达到其最高工作频率,故整个设计为后续的改进方法保留了足够的设计余量。

表 2 FPGA 逻辑资源占用率

Tab. 2 Resource utilization of FPGA

逻辑资源	使用数	总数	占用率
LUT	1 517	303 600	0.5%
IOB	27	700	3.9%
RAMB36E1	76	1 030	7.4%
RAMB18E1	38	2 060	1.8%
BUFG	3	32	9.4%
DSP48E1	726	2 800	25.9%

图像从输入复原系统到输出复原系统的总延时 T_{Total} 由式(8)给出:

$$T_{\text{Total}} = T_{\text{R}} + T_{\text{F}} + T_{\text{M}} + T_{\text{A}} + T_{\text{C}}, \quad (8)$$

其中: $T_{\text{R}} = MNT_{\Delta}$, 表示行缓存延时; M 是模板的行数; N 是 CCD 像元个数; T_{Δ} 是像元时钟周期; T_{F} 是移位寄存器延时; T_{M} 是乘法器计算延时; T_{A} 是树型加法器组计算延时; T_{C} 是精度控制电路延时。由 ModelSim SE 10.1c 仿真得到最终输出的延时为 228 034 个像元时钟周期,以 120

MHz 的像元时钟频率计算,延时约为 1.9 ms。该延时与图像的行数无关,在 CCD 的像元数、模板尺寸以及推扫频率都确定的情况下,延时是确定值,这对于整体的控制来说是一个巨大的优点。

4 实验验证

实验主要用于验证两个方面的内容,一是实时性,二是图像复原的质量。

实验系统如图 8 所示,其工作过程为:服务器将某空间相机的遥感图像注入给图像模拟源,并设定相关的参数。图像模拟源对其进行整理,调整好速率,以模拟空间相机在轨时 CCD 的推扫输出,并发送给 VC707 开发平台,该平台采用 XC7VX485T-2FFG1761C FPGA 为核心器件。图像经过其处理后发送给上位机进行对比和分析。

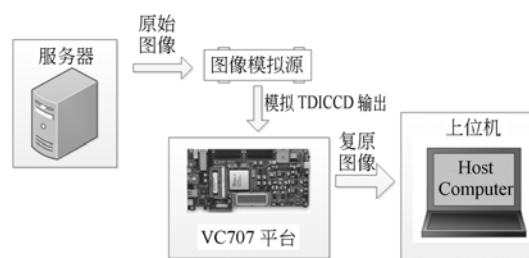


图 8 实验系统

Fig. 8 Experiment system

图像模拟源发送像元数为 12 kpixel,行频为 10 kHz,像素速率为 120 Mpixels/s,总共发送 6 s,整幅图像尺寸为 12 kpixel×60 kpixel。FPGA 时钟主频设定为 120 MHz,选择最小二乘滤波计算反卷积模板。结果显示,上位机收到复原后的图像像素的速率也为 120 Mpixels/s,验证了实时性。

将原始图像和利用 Matlab 使用最小二乘滤波复原的图像与本系统实时复原的图像进行对比,其局部截图如图 9 所示。

由图 9 可知,实时复原系统复原后的图像与利用 Matlab 复原的图像基本相同。由于 Matlab 采用长整形保存数据,所以计算精度足够精确,而 FPGA 设定的小数位只有 22 位二进制数,精度大约为 2.4×10^{-7} ,所以两者复原的结果一定会有差别。除去 9 行/列的图像边缘,可用于比较的总

像元数为 7.1945×10^8 。将两者作差,得到灰度差值在 2 以内的像元数为 374 262 个,约占总像元数的 0.052%,其余 99.948% 的像元数差值为 0,这说明复原的结果基本相当。



(a) 原始图像

(a) Original image



(b) 最小二乘方滤波复原图像

(b) Restored image by least square filtering



(c) 本文的实时复原图像

(c) Restored image by proposed method

图 9 复原效果的对比

Fig. 9 Comparison of recovery effect

进一步采用灰度平均梯度 (Gray Mean Grads, GMG) 和拉普拉斯和 (Laplacian Sum, LS) 两种客观指标来评价两者复原的效果^[1],结果如表 3 所示。

表 3 复原性能的比较

Tab. 3 Comparison of recovery performance

指标	原始图像	经典方法	实时复原
GMG	3.788 7	8.228 6	8.229 6
LS	15.456 7	43.902 3	43.907 5

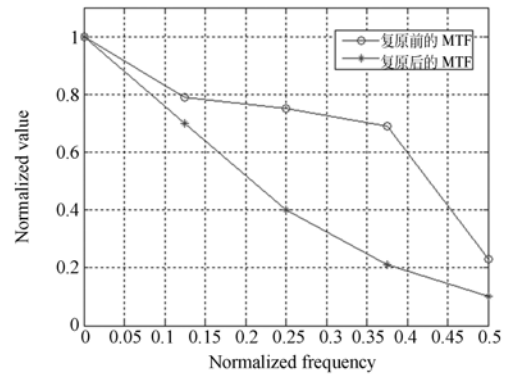


图 10 实时复原前后相机 MTF 对比

Fig. 10 Comparison of camera MTF with and without real-time restorations

从表 3 可以看出,两者的定量评价结果也相当,均对原始图像有了明显的复原效果。利用 ISO12233 倾斜刃边法^[14]分别计算遥感图像经过实时复原系统前后的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF),结果如图 10 所示。从图中可知,经过本文图像实时复原系统处理后,相机 Nyquist 频率处的 MTF 从 0.1 提高到 0.23,其余频率处的 MTF 也有明显的提升,这说明本系统有效地提高了相机整体的成像性能。

本实验验证的图像实时复原系统的反卷积模板为最小二乘方滤波法,若采用维纳滤波的方法计算反卷积模板并重复上面的步骤,会得到类似的结果。本方法也适用于其它线性滤波的图像复原方法,这里不再重复讨论。

5 结 论

为了提高空间相机的成像性能,根据经典图像复原方法与嵌入式硬件的计算特点,本文将 PSF 与典型的线性复原滤波方法相结合来计算实时复原的反卷积算子,以 FPGA 为核心器件利用该算子实现实时复原,并设计出了一种空间相机图像实时复原系统。

对空间相机的遥感图像数据在实验平台上进行了实验验证,并与传统的地面图像复原方法进行了对比。结果表明该系统完全满足实时处理要求并留有充分的设计余量,可以有效地提高相机

系统整体的MTF,图像复原效果与在地面采用经典复原方法相当,具有很高的工程应用价值。

本文提出的图像实时复原方法具有很好的可

移植性,可以广泛应用于需要实时提高成像性能的光电成像设备,不局限于空间相机应用领域,具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 杨利红. 大视场航天相机遥感图像复原研究[D]. 北京:中国科学院,2012.
YANG L H. *Research on Image Restoration of Space Camera with Wide Field of View* [D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [2] 高昆,刘迎辉,倪国强,等. 光学遥感图像星上实时处理技术的研究[J]. 航天返回与遥感,2008,29(1):50-54.
GAO K, LIU Y H, NI G Q, *et al.*. Study on on-board real-time image processing technology of optical remote sensing [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008,29(1):50-54. (in Chinese)
- [3] DOMINIQUE L, JOEL D, FRANCOISE R. MTF measurement using spotlight [C]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1994, 4:2010-2012.
- [4] 谢丁杰,李铁成,冯华君,等. 卡塞格林光学遥感系统的图像复原[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0611004.
XIE D J, LI T CH, FENG H J, *et al.*. Image restoration of Cassegrain optical remote sensing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0611004. (in Chinese)
- [5] TAEYOUNG C. *IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement Using Edge and Pilsse Method*[D]. Brookings: South Dakota State University,2002.
- [6] RAFAEL C G. 数字图像处理(第三版)[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
RAFAEL C G. *Digital Image Processing* [M]. Third Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2012. (in Chinese)
- [7] 郭玲玲,吴泽鹏,张立国,等. 基于多通道盲反卷积的空间光学传感器在轨点扩散函数估算[J]. 光学学报,2013,33(4):0428001.
GUO L L, WU Z P, ZHANG L G, *et al.*. Multichannel blind deconvolution-based on-orbit estimation of point spread function for space optical remote sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0428001. (in Chinese)
- [8] 李进,金龙旭,李国宁,等. 星上大视场TDICCD相机的多光谱图像无损压缩系统[J]. 发光学报,2013,34(4):506-515.
LI J, JIN L X, LI G N, *et al.*. Lossless compression system of multi-spectral image for spaceborne TDICCD camera with a large field of view [J]. *Chinese Journal of Luminescence*. (in Chinese)
- [9] 朱宏殷,郭永飞,司国良. 多TDICCD拼接相机成像非均匀性实时校正的硬件实现[J]. 光学精密工程, 2011,19(12):3034-3042.
ZHU H Y, GUO Y F, SI G L. Real-time correction of imaging nonuniformity for multi-TDICCD mosaic camera on hardware [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 3034-3042. (in Chinese)
- [10] DONALD G B. 基于FPGA的嵌入式图像处理系统设计[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
DONALD G B. *Design for Embedded Image Processing on FPGAs* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2013. (in Chinese)
- [11] 邢艳芳,张延冬. 基于Zynq的OLED驱动设计[J]. 液晶与显示,2014,29(2):224-228.
XING Y F, ZHANG Y D. OLED driver design based on Zynq [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(2): 224-228. (in Chinese)
- [12] 刘春香,郭永飞,李宁,等. 星上多通道遥感图像的实时合成压缩[J]. 光学精密工程,2013,21(2): 445-453.
LIU CH X, GUO Y F, LI N, *et al.*. Composition and compression of satellite muti-channel remote sensing images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):445-453. (in Chinese)
- [13] 樊博,王延杰,孙宏海,等. FPGA实现高速实时多端口图像处理系统的研究[J]. 液晶与显示,2013,

28(4):620-625.

FAN B, WANG Y J, SUN H H, *et al.*. High speed real-time multiport image processing system realized on FPGA[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(4): 620-625. (in Chinese)

[14] 李铁成,陶小平,冯华君,等. 基于倾斜刃边法的调

制传递函数计算及图像复原[J]. *光学学报*, 2010, 30(10):2891-2897.

LI T CH, TAO X P, FENG H J, *et al.*. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2891-2897. (in Chinese)

作者简介:



付天骄(1986—),男,吉林长春人,助理研究员,博士研究生,2009年、2011年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间光学遥感器研制与图像处理方面的研究。E-mail: futianjiaohit@163.com

导师简介:



任建岳(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事空间光学相机光机电一体化研究。E-mail: renjy@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)