

〈系统与设计〉

空间中波红外线列过采样探测系统设计

李真真, 陈凡胜

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 随着长线列红外探测器技术的发展, 其在空间遥感领域中得到愈来愈广的应用。亚像元探测技术在空间遥感领域已得到了广泛应用, 在可见波段 SOPT5 卫星通过亚像元探测技术获得了 2.5 m 分辨率的高分辨率图像。给出了一套中波红外亚像元探测系统的设计方法。设计以交错排列的中波探测器为成像焦平面, 设计了包括光学系统、杜瓦结构、基于 FPGA 的控制时序以及信号处理电路、采集系统以及图像显示的一整套系统。以该系统为终端, 进行了目标成像试验, 并对图像进行了非均匀性校正处理以及图像的重建。

关键词: 过采样探测; 光学系统; 亚像元探测器; 中波红外; 非均匀校正; 图像重建

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2012)12-0709-08

Design of MW Line Array Infrared Oversampling Detection System in Space

LI Zhen-zhen, CHEN Fan-sheng

(Shanghai Institute of Technology Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: With the development of long line array infrared detector, this technology gets more and more wide applications in the field of space remote sensing. Sub-pixel detection technology has been widely applied in the field of space remote sensing. By using the sub-pixel detection technology, SOPT5 satellite obtained high-resolution images of 2.5m resolution in the visible band. This paper produces a design of medium-wave infrared sub-pixel detection system. This design uses staggered MW detector as imaging focal place. Also, it includes the optical system, Dewar structure, timing control and signal processing circuit based on FPGA, acquisition system and image display. Using this whole system as the terminal, we do imaging experiments of the goal, and then deal with the non-uniformity correction and do image reconstruction.

Key words: over-sampling detection, optical system, sub-pixel detector, middle infrared wave, non-uniformity correction, image reconstruction

0 引言

对于静止轨道空间对地观察, 采用长线列焦平面器件与一维扫描相结合可大大提高载荷的时间分辨率。目前, 国内外的主要焦平面器件研发机构都在为一些空间对地观察系统研制线列及超长线列红外焦平面器件, 长线列的红外焦平面器件已经成为大规模焦平面技术的重要发展方向之一。

目前, 在多波段遥感探测领域, 某些波段并没有达到光学衍射极限, 因此可通过亚像元排列探测器进

收稿日期: 2012-08-13.

作者简介: 李真真 (1988-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事红外目标探测方面的研究。

基金项目: 中科院院重大创新项目。

行过采样来提高系统的空间分辨率。可见光波段 SOPT5^[1]卫星通过亚像元探测技术获得了 2.5 m 分辨率的高分辨率图像, 如图 1 和图 2 所示。

当然, 除了上述的线列焦平面的排列方式, 也可以用特殊方式排列的传感器形成过采样探测。如图 3 所示, 欧联的第二代静止轨道气象卫星 MSG 采用了菱形排列的焦平面过采样传感器件, 减小了行与行、列与列之间的距离, 增加了在水平和垂直轴两个方向的采样率。

本文主要给出了中波红外探测器进行过采样探

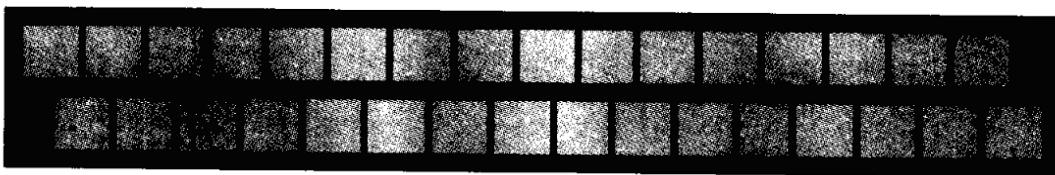


图1 SPOT-5 卫星上的线阵图像传感器

Fig.1 Line array sensor in SPOT-5

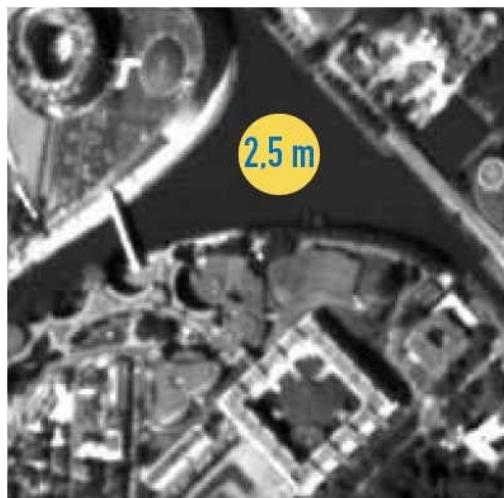
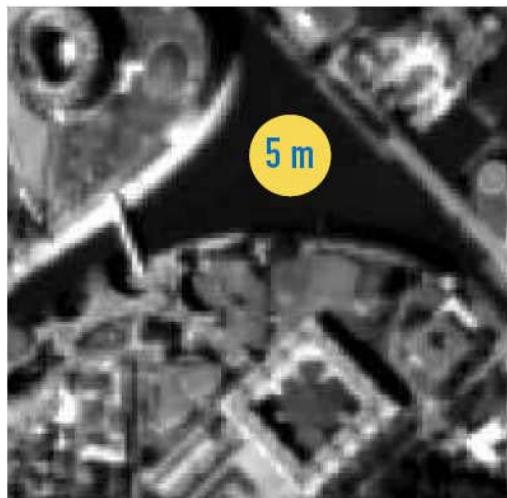


图2 SPOT-5 初始获得图像与重构图像
Fig.2 Original and reconstructed images of SPOT-5

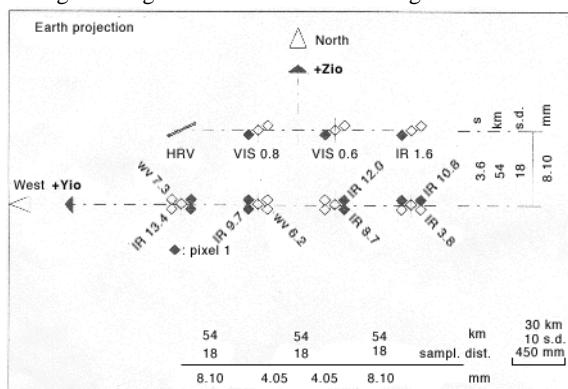


图3 MSG 扫描辐射计的焦平面器件结构
Fig.3 FPA structure of MSG scanning radiometer

测的系统的设计方法，其中主要包括光学系统、探测器杜瓦，以及设计开发了一套集时序控制、偏置电源、前置放大、滤波、模数转换、数模转换、数据接口以及电源为一体的电路系统。

1 系统方案综述

中波红外亚像元探测系统由光学系统、探测器、杜瓦、信息获取电路、数据采集系统组成。目标与背景信息经过大气吸收后到达光学系统，通过光学系统汇聚到探测器焦平面上，探测器对空间分布的光信号进行光电转换，探测器在驱动时序的控制下将图像信号串行的以模拟电压形式输出，模拟电压信号经信号调理后通过AD转换器转换为数字信号，经采集系统进入计算机^[2]。空间中波红外线列过采样探测系统的基本组成如图4所示。

1.1 光学系统

光学系统的设计采用出瞳与冷阑匹配的方式，光学系统的弥散斑小于系统的瞬时视场^[3]，光学系统的主要参数如下：

圆视场：13.68°

口径：φ50 mm

焦距：50 mm

F数：2.0

图像对角线：12 mm

平均穿透率：>80%

工作波段：3~5 μm

后工作距离：12.5 mm

取工作波长为4 μm，光学系统的艾瑞斑尺寸为^[4]：

$$d = \frac{2.44\lambda f}{D} = 9.76 \mu\text{m}$$

光学透镜的传函曲线如图5所示。

1.2 探测器结构

中波红外探测器理论排列方式如图6所示，像元尺寸为28 μm×28 μm，扫描方向（垂直线阵方向）相隔一个像元，线阵方向错位0.5个像元。由于工艺限制，无法做到两个像元之间没有间隙^[5]，以及为了减少像元间的串扰，实际制造时采用品字形排列，如图

7 所示, 探测器工作波段为 $3.5\sim4.8\mu\text{m}$ 。

图 7 中第一排和第三排相当于图 6 中第一排的品字形展开, 图 7 中第二排和第四排相当于图 6 中第二排的品字形展开。

对于遥感相机, 被采样信号上限频率即为光学系统的截止频率。光学系统为低通滤波器, 它的截止频率为 $(1.22\lambda F^{\#})^{-1} = (1.22 \times 3.5 \times 2.0) = (8.54)^{-1}$, $F^{\#}$ 是光学系统 F 数, λ 是中波红外的最小波长。采样频率是探测器的像元采样间距的倒数 $1/P = 1/28$ 。根据采样定理, 如果要不失真地恢复通过光学系统的频谱信息, 那么探测器采样频率和光学系统截止频率的比值

$\lambda F^{\#}/P$ 必须大于或等于 2, 而实际计算值为 $\lambda F^{\#}/P = 8.54/28 = 0.305 < 2$, 满足欠采样条件, 故而可以采用亚像元技术来提高系统的采样率, 从而达到提高分辨率的目的^[1]。

在二维空间, 一维通过提高时间采样频率来提高采样密度, 另一维通过空间错位来提高采样密度。在空间维, 垂直于线阵方向的时间采样频率不改变, 采集 4 列探测器的图像数据, 此时的图像数据量是普通推帚式遥感相机的两倍, 在线阵方向上图像理论空间分辨率提高了 1 倍, 如图 8 所示。

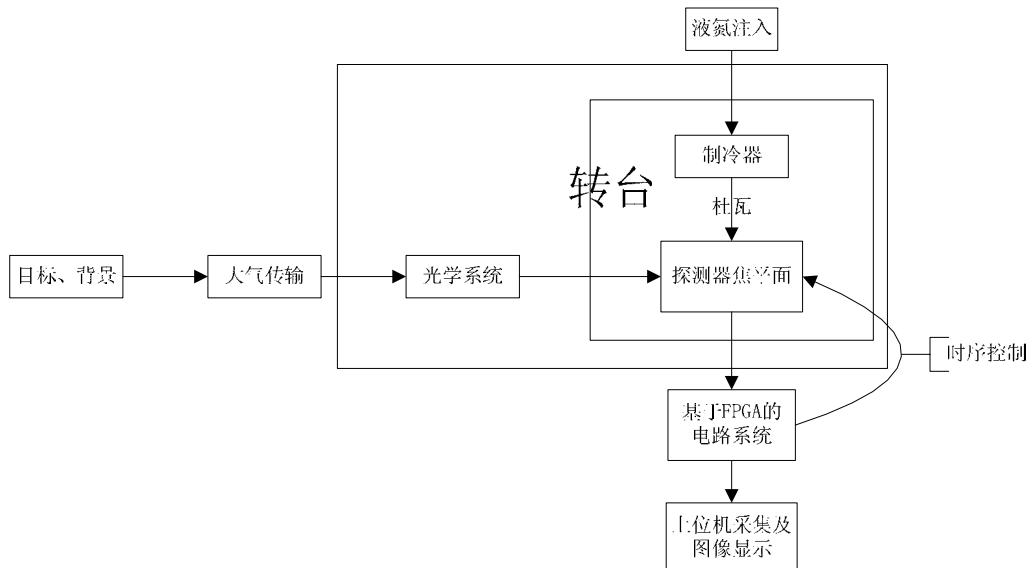


图 4 过采样探测系统

Fig.4 Oversampling detection system

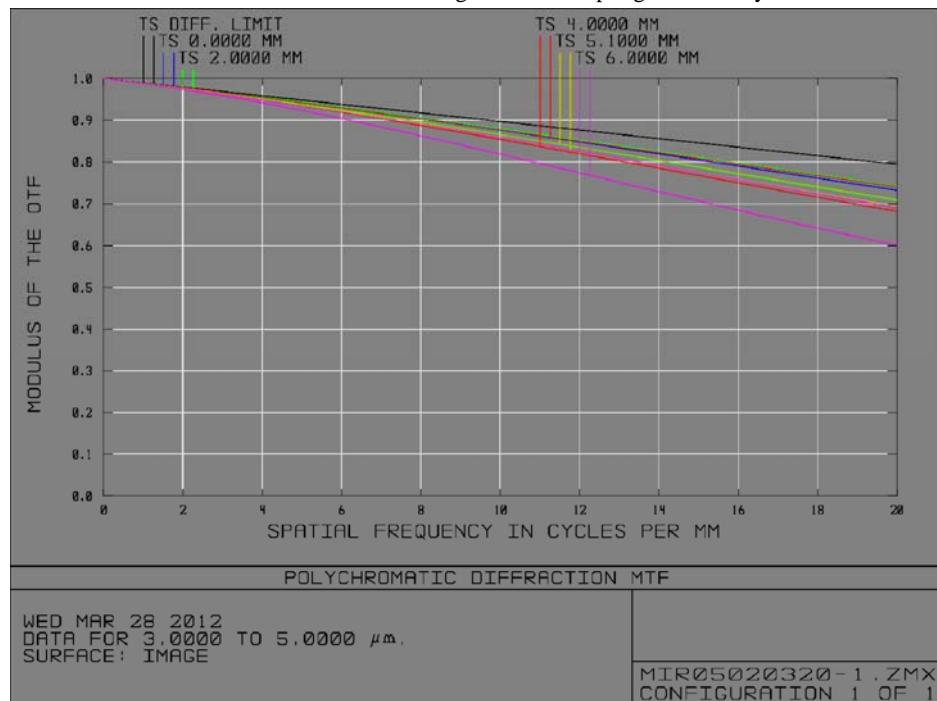


图 5 传函曲线

Fig.5 Transfer function curve

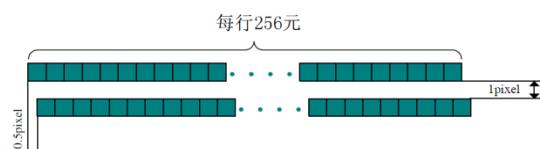


图 6 中波红外探测器理论排列

Fig.6 Principle arrangement of mid-wave infrared sensors

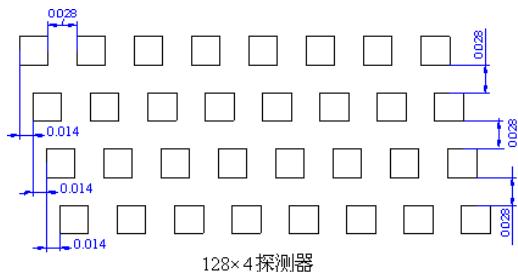


图 7 亚像元探测器实际制造排列

Fig.7 Factual arrangement of sub-pixel sensors

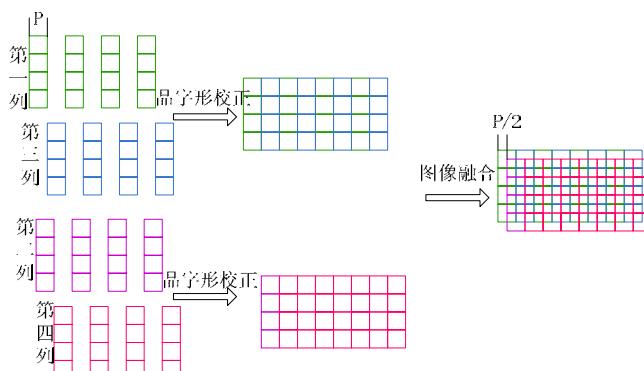


图 8 空间过采样原理

Fig.8 Theory of space over-sampling

为了达到更低的噪声和更高的绝对精度,探测器的读出电路采用了相关双采样。相关双采样实际上对每个像素进行了两次采样,分别在积分开始时和积分结束后,最终输出两次采样的差值,有效减少、消除了固定图案噪声。

1.3 杜瓦结构

探测器采用储存式制冷,即将液氮装在绝热良好的杜瓦瓶中以待制冷所用,可将探测器制冷至77 K。探测器的感光区域大小为7.14 mm×0.182 mm,取几何中心为光抽位置。为了与探测器焦平面及镜头匹配,杜瓦中的冷阑位置为如图9所示,可得到光抽方向投影的示意图如图10所示。

镜头与杜瓦冷阑以及焦平面结合在一起的设计如图11所示。

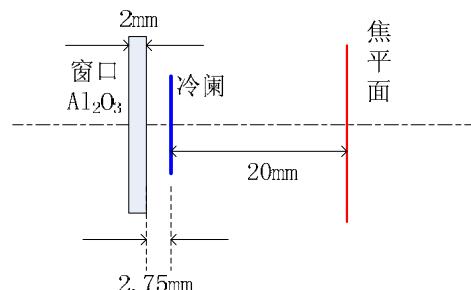


图 9 冷阑位置

Fig.9 Cold diaphragm position

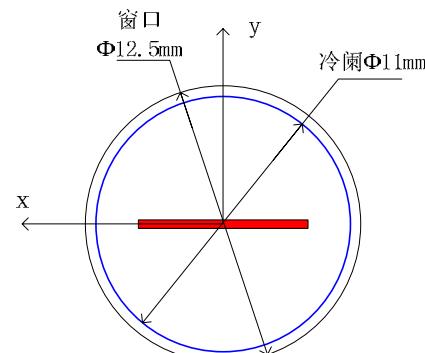


图 10 光抽方向投影示意图

Fig.10 Schematic diagram of optical pumping projection

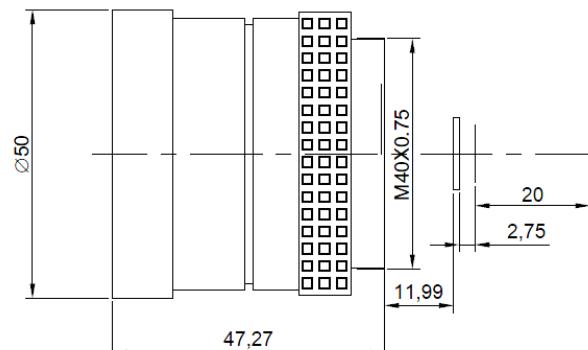


图 11 镜头、冷阑、焦平面相对位置

Fig.11 The relative position of lens, cold diaphragm and focal plane

1.4 信息处理电路

电路系统的功能包括为焦平面探测器提供数字驱动和偏置电源,采集探测器输出的模拟信号,进行放大滤波,再通过模数转换(ADC)转换成数字信号,数字信号在FPGA中处理之后通过数字接口电路(USB)传输给终端计算机处理和显示^[6],同时通过数模转换(DAC)转换成模拟信号传输到放大电路进行背景去除。系统如图12所示。

亚像元探测器的结构相比于普通线列探测器,就

是把常规焦平面上一排线列变成两排且错开 0.5 个像元,由于采用品字形排列后则增加为 4 列,探测器的输出由原来的 1 路变为 4 路,数据量增加了 1 倍,数据率变为原来的 4 倍。在信息处理电路中,采用了并列结构,则也需将模拟信号调整模块及模数转换模块增加为 4 路,如图 12 所示。在 FPGA 中,需要对 4 路数据进行整合成一路,这一路数据通过 USB 传输到 PC 机以待显示和处理。

2 试验结果

2.1 图像处理

我们在一块多层电路板上实现了信息处理电路的硬件,并配合光学系统以及软件,通过一维转台转动进行了目标成像试验。图 13 是利用该系统拍到的目标图像。图 14 是对原始图像进行非均匀校正之后的图像。

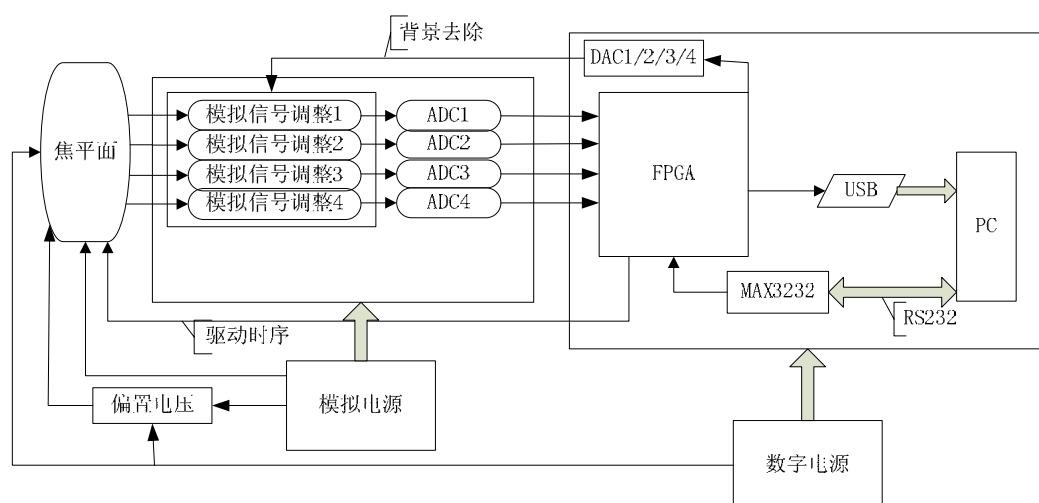


图 12 信息处理电路

Fig.12 Information processing circuit



图 13 第 1 路原始图像

Fig.13 Original image from the first channel

由图 14 可以看出,同一行探测器扫描出来的图像进行非均匀性校正效果较好,非均匀性校正采用基于黑体标定的和基于场景的校正方法均可以获得较好的结果。

对原始图像进行非均匀性校正后,需要对 1、3 路和 2、4 路分别进行品字形校正,校正的图像如图 15、16 所示。

非均匀性校正后的两幅图像需进行配准后再采用不同的重建方法进行重建,品字形校正后的两幅图像进行配准的结果如图 17 所示。

基于此配准对两幅图像采用插值法进行亚像元重建,重建后的图像结果如图 18 所示。

2.2 效果分析

下面首先对采用不同方法处理的结果给出局部放大的比较,如图 19 所示,然后再从图像频谱来对其进行分析比较,如图 20 所示。

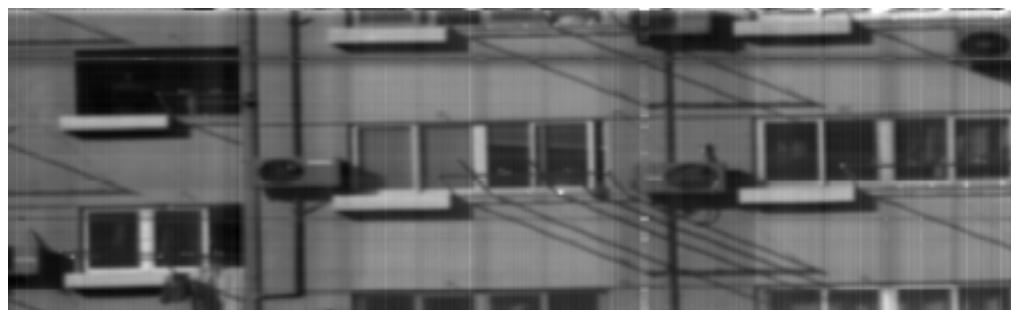


图14 第1路原始图像进行非均匀性校正

Fig.14 After non-uniformity correction



图15 第1、3路品字形校正后图像

Fig.15 Image from the first and third channel after triangle correction

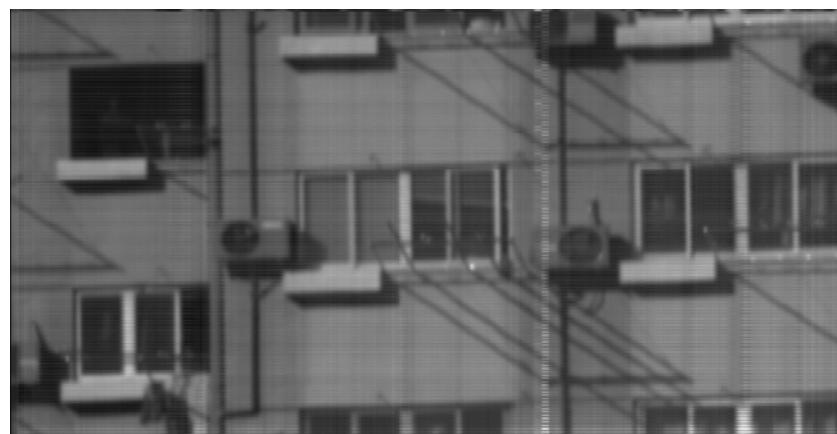


图16 第2、4路品字形校正后图像

Fig.16 Image from the second and fourth channel after triangle correction



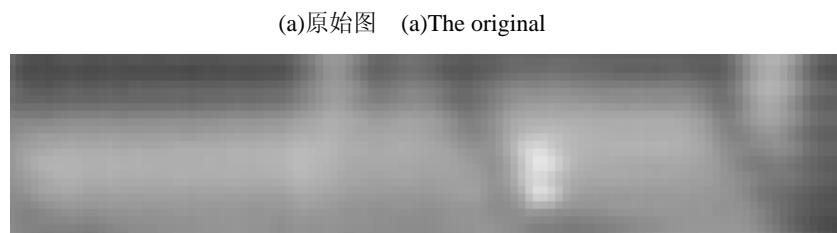
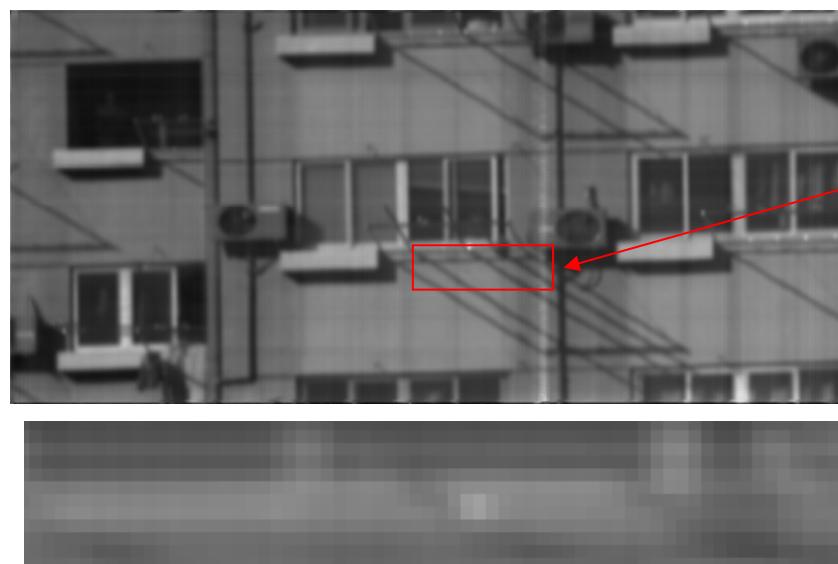
图17 品字形校正后图像配准结果

Fig.17 Image reposition matrix after triangle correction

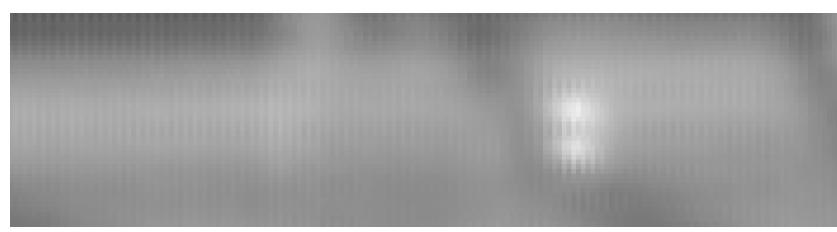


图 18 插值重建后的图像

Fig.18 Sample image after interpolating reconstruction



(b) 品字校正图 (b) After triangle correction



(c) 插值重建图 (c) After interpolating reconstruction

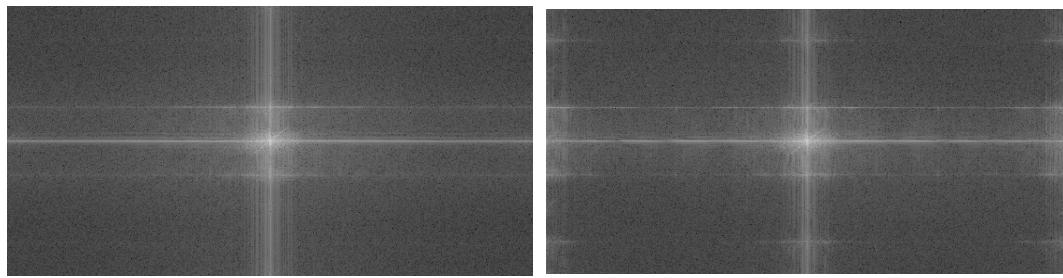
图 19 处理图的局部放大效果

对图 19 的图像放大部分进行分析可得, 相对于品字形校正后的单路图像, 晾衣杆的两个反光点经直接插值后分辨的更加清晰一些。

下面对整幅图像进行 FFT 变换, 对其频谱进行分

Fig.19 Amplify part of the image

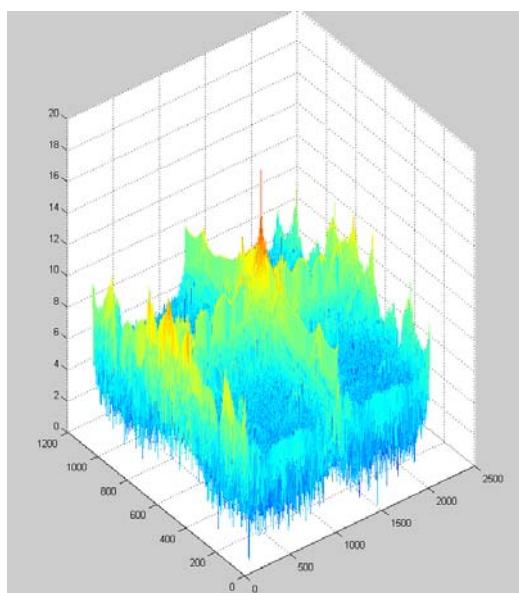
析, 如图 20、21 所示。从变化前后的频谱信息可以看出, 直接插值重建后, 高频信息得到了进一步加强, 提高了空间分辨率。



(a) 原始图 (b) The original image

(b) 插值重建图 (b) Image after interpolating reconstruction

图 20 图像的 FFT 变换



(a) 原始图 (a) The original image

(b) 插值重建图 (b) Image after interpolating reconstruction

图 21 图像频谱图 Fig.21 Spectrum map of the images

3 结束语

我们用中波红外亚像元探测器为对象, 开发了一套空间中波红外线列过采样探测系统。该系统能完成图像的采集、传输、实时显示和存储, 为分析空间过采样探测提供了一个平台, 并为下一步的研究工作打下了基础。

参考文献:

- [1] 周峰, 王世涛, 王怀义. 关于亚像元成像技术几个问题的探讨[J]. 航天返回与遥感, 2002, 23(4): 26-33.

- [2] 许元男, 赵远, 斯辰飞, 等. 一种成像型星载激光告警系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(增刊): 357-360.
- [3] 张才根. 自动检测运动物体的红外探测系统[J]. 应用光学, 2000(S1): 29-32.
- [4] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 中科院上海技术物理研究所, 2010.
- [5] 吴诚, 苏君红, 潘顺臣, 等. 对中波与长波红外焦平面热成像的一些探讨[J]. 红外技术, 2002, 24(2): 6-8.
- [6] 赖雪峰, 潘鸣, 裴云天. 中波红外焦平面凝视电路系统的设计与实现[J]. 红外技术, 2005, 27(3): 202-206.
- 学与计算机, 2003(增刊): 68-70.
- [5] E. Mikkola, B. Vermeire, H. J. Barnaby, et al. SET Tolerant CMOS Comparator[C]//Proceedings of IEEE, IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, 51(6): 3609-3614
- [6] 陈桂梅, 许仲德, 苏秀娣. IC 抗辐射加固的方法[J]. 微处理机, 1998 (4): 18-19

(上接第 708 页)

- [2] 姜立娟, 许仲德. CMOS 集成电路抗单粒子加固技术[C]//第九届全国抗辐射电子学与电磁脉冲学术年会论文集, 2007: 194-197.
- [3] 江军, 雷昕, 赵璐, 等. 一种抗辐射加固隔离反馈发生器的研制[C]//第十届全国抗辐射电子学与电磁脉冲学术年会论文集, 2009: 35-40.
- [4] 张小平, 雷天民, 样松, 等. CMOS 集成电路的抗辐射设计[J]. 微电子