

星地激光通信 ATP 系统探测相机的坏点校正

钱 锋 贾建军 张 亮 王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

摘要 阐述了星地激光通信捕获、跟踪、瞄准(ATP)系统中光斑探测相机的作用。当相机的探测器上存在坏点时, 光斑探测相机的虚警率和定位精度将受到影响。分析了面阵探测器的坏点种类与来源以及星地激光通信 ATP 系统光斑探测相机的特点。依据相机的特点提出了对应的实时坏点检测及校正方法。设计了基于 STAR1000 探测器的光斑探测相机, 并在该相机中应用了实时坏点校正方法。对该校正方法进行了实验验证, 实验结果表明该算法能够有效抑制坏点像元, 并纠正其灰度值。由于该校正方法处理延时小且能够有效降低存在坏点时相机的定位误差, 非常适用于星地激光通信 ATP 系统。

关键词 光通信; 坏点校正; 梯度检测; ATP 系统

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0505007

Defective Pixel Correction of Spot-Detecting Camera in Satellite-to-Ground Laser Communication ATP System

Qian Feng Jia Jianjun Zhang Liang Wang Jianyu

(Key Laboratory of Space Active Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract The function of spot-detecting camera in satellite-to-ground laser communication acquisition, tracking, pointing (ATP) system is expounded. When defective pixels exist on the detector, the false alarm rate and positioning accuracy of spot-detecting camera will be affected. The kinds and sources of defective pixels on matrix detector are analyzed. The characteristics of spot-detecting camera in satellite-to-ground laser communication ATP system are also analyzed. According to these characteristics of camera, the real time method of defective pixel check and correction is explained. A spot-detecting camera based on STAR-1000 sensor is designed, which also uses the correction method. Some tests are carried out to verify the correction method. The results show that the real time correction method can restrain defective pixels effectively and the gray value of defective pixels will be corrected. Because this method has short delay and it can reduce the positioning error when the camera has defective pixels, it can well apply to the satellite-to-ground laser communication ATP system.

Key words optical communications; defective pixel correction; gradient detection; ATP system

OCIS codes 060.2605; 120.1880; 110.2970; 040.5160

1 引言

在远距离的星地激光通信中, 用于建立通信链路的信标光发散角很小, 通常只有几十微弧度, 而且卫星平台始终处于运动及振动之中。因此, 必须有一个捕获、跟踪、瞄准(ATP)系统来建立并稳定激光通信链路。ATP 系统通过跟踪通信对方信标光的位置来实现对视轴的稳定。系统通常需要具备高跟瞄精度、宽的干扰抑制带宽以及探测微弱信号

的能力。而光斑探测相机正是实现这些系统性能的关键部件。光斑探测相机通过探测激光通信链路中的信标光方向, 从而为 ATP 系统获得通信终端的位置信息^[1]。

现在世界上已有多个实用化的星载 ATP 系统, 它们的光斑探测相机通常采用的探测器是 CCD、互补金属氧化物半导体(CMOS)以及四象限雪崩管探测器(QAPD)^[1-2]。而作为面阵探测器的

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-11-18

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KGCX1-YW-16)

作者简介: 钱 锋(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光束精跟瞄等方面的研究。E-mail: qianfeng19861026@126.com

导师简介: 王建宇(1959—), 男, 博士, 研究员, 主要从事物理电子学、量子通信系统技术等方面的研究。

E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

CCD 和 CMOS 无论是在制造过程中还是在使用过程中,都不可避免地会产生坏点问题。而坏点的存在必将影响相机对目标位置的准确探测。如果探测器应用于实时性要求不高的图像获取任务,其获得的数据可通过各种复杂的算法做后期处理,从而得到校正后的优质图像。但在 ATP 系统中,为了有效配合系统的执行机构,用于位置探测的相机必须有很高的实时性,所以现有较为成熟的后期坏点处理方法均不适用于该类探测相机^[3]。同时,目前已有的多种基于中值滤波的实时处理方法,容易丢失原始图像的边缘信息^[4],对于目标精确探测的系统来说会进一步产生误差。

本文分析了探测器坏点的种类与来源,给出了适用于激光通信 ATP 系统的实时校正算法以及基于 STAR1000 探测器(CMOS 探测器)可实时坏点校正的相机系统结构,并通过实验验证了校正效果,提高了相机存在坏点时的定位精度,对发展基于 CMOS 探测器的 ATP 系统具有一定的参考价值。

2 探测器坏点的种类与来源

面阵探测器通过芯片上为数众多感光像元来实现成像,其中某个感光像元由于各种原因受到损坏而导致工作不正常或者不能工作的时候,就成为了一个坏点。探测器通常存在三种坏点:亮点,像元能感光,但只有恒定的输出值;暗点,像素不能感光,没有输出值;色点,像素能够感光,但是输入输出关系与正常像元不同且区别较大,具体表现为响应值太高或太低,一般此类色点可在坏点校正时归于亮点或暗点来处理。

导致坏点产生的原因有很多,从芯片制备前期的材料生长,到工艺制备环节,再到后期封装过程等都会产生坏点。其中主要原因有:1) 材料缺陷,当材料的缺陷正好落在光敏元上,可以造成器件暗电流过大,信号变小,出现坏点;2) 光刻图形失真,造成这种现象的原因主要是样品表面的污染物残留背盖在光刻胶下,或者光刻胶涂胶后产生气泡;3) 延伸电极脱落,产生无信号的暗像元;4) 部分材料残留,造成多个光敏元互连,在光电转换时表现为信号过大,产生过亮像元^[5]。而在面阵探测器的使用过程中,如果探测器受到强激光照射,像元的半导体材料电学参数发生改变或其材料被热效应所损坏,也同样会产生坏点^[6]。坏点一旦产生便不能通过硬件加以消除,只能在获取的图像中利用相应的算法来校正。

3 坏点对激光通信 ATP 系统的影响

3.1 激光通信 ATP 系统中光斑探测相机的特点

星地激光通信 ATP 系统为解决单一控制环路范围和精度互为矛盾的问题,通常采用粗跟踪环嵌套精跟踪环的复合轴形式,而精跟踪系统的精度是 ATP 系统的最终精度。由于星载激光通信系统处于卫星这样的运动平台之上,卫星的运动及自身振动干扰,要求它的精跟踪系统具有很高的干扰抑制带宽,往往需要上百赫兹^[7]。因此相机的采样频率必须很高,达到上千赫兹。这样高的帧频,使得相机在驱动控制、图像采集、数据处理和结果输出等所有过程中必须达到高度的实时性,任何环节的延时都应该保持在最小程度。

为了实现低延时的快速处理,基于 CMOS 的光斑探测相机一般采用现场可编程门阵列(FPGA)作为核心处理器件,利用 FPGA 独特的并行操作能力,完成对探测器的滚筒式曝光控制、图像采集、数据处理、定位计算和对外通信等功能。在目标光斑位置提取算法的选择上,光斑探测相机常用质心算法。

质心算法基于平面几何中求质心的原理,探测系统将算得的光斑质心位置作为信标激光光斑的能量中心。该算法精度高、稳定性好、处理时间短,因此在 ATP 系统中应用广泛。探测器光敏面上图像光强分布为 $v(x, y)$, 其中 (x, y) 表示图像像元在探测器焦平面坐标系中的位置,通过(1)式计算得到的图像灰度质心 (C_x, C_y) , 即目标光斑的能量中心为^[8]

$$\begin{cases} C_x = \frac{\sum_{(x,y) \in S} x \cdot W(x,y)}{\sum_{(x,y) \in S} W(x,y)} \\ C_y = \frac{\sum_{(x,y) \in S} y \cdot W(x,y)}{\sum_{(x,y) \in S} W(x,y)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $W(x, y)$ 为质心计算过程中的权重,在激光通信时信标光的光斑灰度值应大于背景灰度值,可用阈值来区分背景与光斑。则权重 $W(x, y)$ 的计算方式为

$$W(x, y) = \begin{cases} v(x, y) - T, & v(x, y) \geq T \\ 0, & v(x, y) \leq T \end{cases} \quad (2)$$

式中 T 为区分光斑和背景而设置的阈值。

在探测器驱动同步信号控制下, FPGA 依照(1)~(2)式分别使用累加器对图像数据的亮度进行累计、亮度与坐标加权累计,在每帧数据结束时执行除法运算即可计算得到光斑质心的 X 坐标和 Y 坐标,延时极低。

3.2 坏点对光斑探测相机的影响

由质心算法可知,当探测器存在坏点时,坏点输出的灰度值 $v(x, y)$ 将不再准确反映真实的图像。这将对光斑探测相机的虚警率和定位精度造成影响。

当坏点像元是有恒定高输出值的亮点时,它会对相机的虚警率产生干扰。相机单帧探测的虚警率 $\overline{F_{AR}}$ 可表示为

$$\overline{F_{AR}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \exp\left(-\frac{i_t^2}{2i_n^2}\right), \quad (3)$$

式中 $i_t = i_s + i_n$ 为阈值电流, i_s 为信号电流, i_n 为均方根噪声电流。一般 $R_{SN} = i_s/i_n = 7$ 时, 既(2)式中的阈值 T 为均方根噪声的 8 倍, 虚警率可减低到 $\overline{F_{AR}} = 10^{-5}$ 。但因亮点的存在, 它的输出一旦大于阈

值 T , 便会被错误地判定为目标信号, 导致虚警。这对用于目标跟瞄的 ATP 系统来说是不可容忍的。

当图像中同时存在坏点和目标信号, 由于坏点的灰度值 $v(x, y)$ 不能反映正确的图像信息, (1) 式的计算结果将会产生严重偏差。当探测器存在多个亮点或暗点, 其质心计算结果与此前无坏点时的比较如图 1 和图 2 所示。有亮点和暗点存在时, 质心计算结果偏差分别为 $(E_{RRx}, E_{RRy}) = (2.94 \text{ pixel}, 3.4 \text{ pixel})$ 和 $(E_{RRx}, E_{RRy}) = (0.16 \text{ pixel}, 0.14 \text{ pixel})$, 严重影响了光斑探测相机的定位精度。

4 坏点校正方法

4.1 坏点检测原理

探测器存在坏点时, 可以利用人工或自动方法来消除。人工干预的方法: 通过事先对探测器坏点进行鉴别, 在相机的处理器中存储每个坏点的位置, 在此后的图像处理程序中利用坏点相邻近的像素来进行替换。但对于星载相机来说, 不能排除在轨工作过程中会出现坏点增加的情况, 因此这种事先存储的方法并不能解决问题。星载 ATP 系统需要一种自动且实时的坏点检测与校正方法。在每一帧获取的图像中自动寻找坏点, 在利用相应的插值方法进行数据纠正。

由于坏点一般情况下都是独立的像元, 且与周围正常像元输出有较大突变, 因此可通过检测梯度的方式来寻找坏点。像元灰度值用 $v(x, y)$ 表示, 其梯度公式为^[9]

$$\nabla v = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

在探测器上目标光斑所成图像的边缘是不会发生突变的, 亮斑周围的像元都会有一定亮度, 一维方向上的分布如图 3(a) 所示。当坏点类型为高输出值的亮点时, 如图 3(b) 所示, 单个亮点相对于周围暗背景有突出的亮度, ∇v 值较大。一般一个孤立像元的

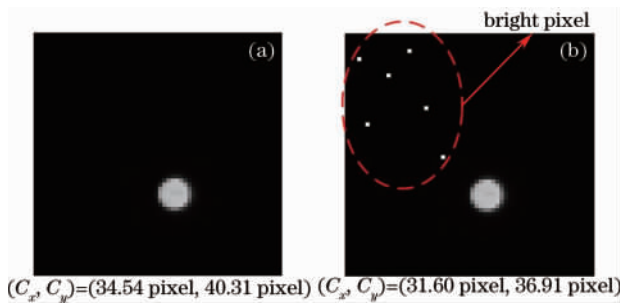


图 1 亮点像元对质心计算的影响。

(a) 原始图像; (b) 存在亮点

Fig. 1 Bright pixels have effect on centroid calculation.

(a) Original image; (b) with bright pixels

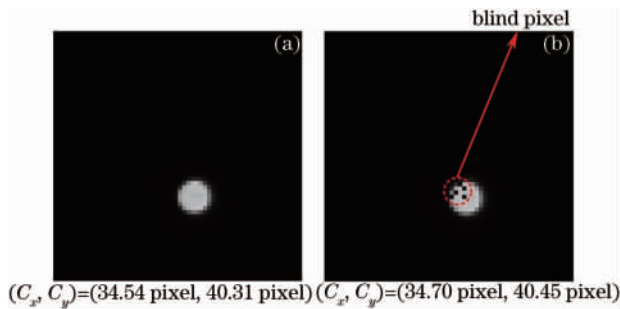


图 2 暗点像元对质心计算的影响。

(a) 原始图像; (b) 存在暗点

Fig. 2 Blind pixels have effect on centroid calculation.

(a) Original image; (b) with blind pixels

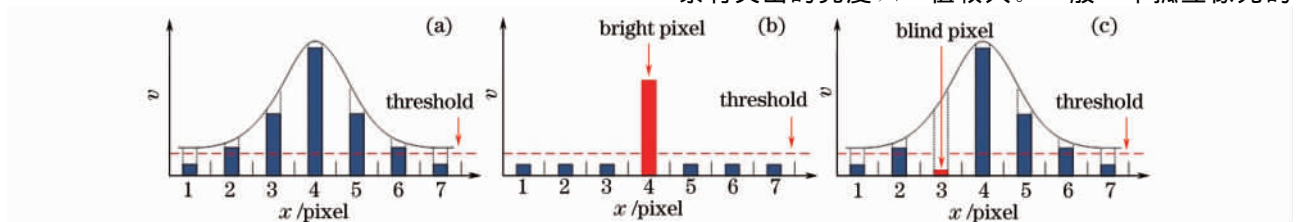


图 3 图像灰度值分布。(a) 无坏点; (b) 有亮点; (c) 有暗点

Fig. 3 Intensity distribution of image. (a) No defective pixel; (b) with bright pixel; (c) with blind pixel

$v(x, y)$ 超过阈值 T , 而周围像元灰度值均低于阈值 T , 可将其判为亮点。暗点像元的情况如图 3(c) 所示, 其梯度极性会发生骤变。从一维上看暗点处的 ∇v 为负值, 下一个像元处 ∇v 又变为正值。而正常图像相邻像元的梯度极性应该一致, 即使在目标光 STAR1000。相机通过光学系统(图 4 接口 1)在探测器阵面上成像, 图像数据在 FPGA 内部完成各种预处理后再进行质心计算, 整个控制及处理过程采用滚筒方式循环进行。从外部获得的直流电压(图

斑的峰值处, 梯度变化也应该是由正值变为负值。因此可以依据这个特性来检测暗点。

4.2 实时坏点校正的相机系统结构

采用的相机系统结构如图 4 所示。相机采用 ON Semiconductor 公司生产的 CMOS 探测器 4 接口 2) 经过电平转换后为相机系统提供各种所需电压。相机的反馈参数及指令通信均通过 422 接口实现(图 4 接口 3)。图像数据则通过低压差分信号技术(LVDS)接口向外传输(图 4 接口 4)。

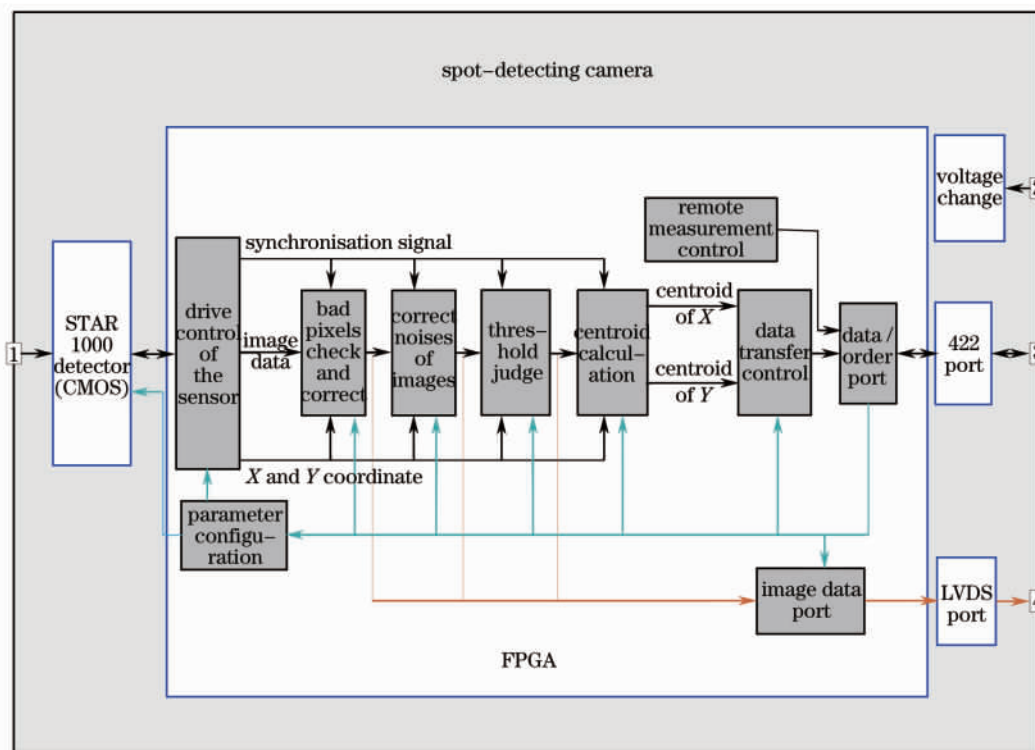


图 4 光斑探测相机的系统结构

Fig. 4 Diagram of spot-detecting camera

4.3 实时坏点校正的实现方法

根据坏点检测原理中所述的坏点固有特性, 可以采用一个 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 的坏点检测窗口对图像进行实时检测。如图 5 所示, 原始图像的一个像元及其周围邻近的八个像元数据依次为 m_{11} 、 m_{12} 、 m_{13} 、 m_{21} 、 m_{22} 、 m_{23} 、 m_{31} 、 m_{32} 和 m_{33} 。根据窗口中这 9 个像元的灰度值对被检测像元 m_{22} 进行实时坏点检测和校正。

由于采用了 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 的检测窗口, 相机需要先缓存两行的图像数据, 直到 FPGA 获取 m_{33} 像元数据时才能对被检测像元 m_{22} 进行坏点检测和处理。因此, 原始图像将会被延时一行时间后再做处理并输出, 对于上千赫兹帧频的探测速度来说这个延时不到 $20 \mu\text{s}$, 可忽略。同时, 为检测和处理整

个开窗区域, 相机需要多采集上下两行及左右两列像元的图像, 增加了相机的数据采集量。但以 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 开窗的 CMOS 相机为例, 数据采集量增加约 3%, 相机探测速度并不会因此降低太多。所以这种实时校正方法是可行的。

具体的坏点检测方法如下: 设定坏点检测阈值 T_{bad} ($T_{\text{bad}} \geq T$), 1) 亮点检测, 若 m_{22} 周围八个像元灰度值均低于 T_{bad} , 且唯独 m_{22} 高于 T_{bad} , 则将 m_{22} 判为亮点类坏点, 储存坏点地址, 并进行坏点校正; 2) 暗点检测, 若 $(m_{22} + T_{\text{bad}})$ 灰度值同时小于 m_{21} 、 m_{23} , 或同时小于 m_{12} 、 m_{32} , 或同时小于 m_{11} 、 m_{33} , 或同时小于 m_{13} 、 m_{31} , 则将其判为暗点类坏点, 储存坏点地址, 并进行坏点校正。

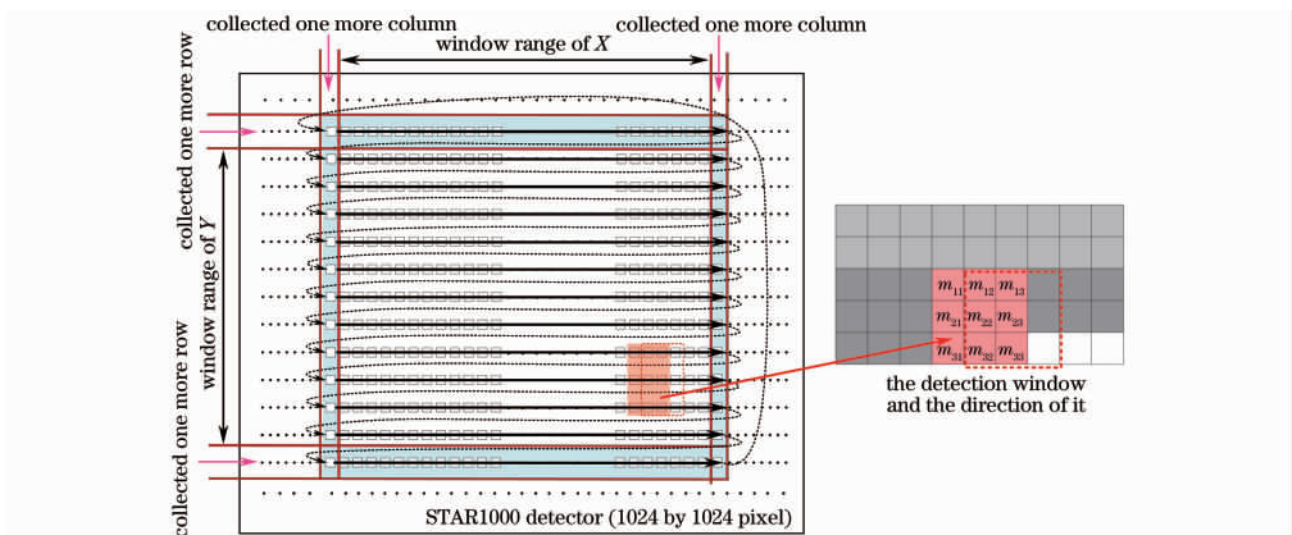


图 5 坏点校正算法实现示意图

Fig. 5 Diagram of defective pixel correction

具体的坏点校正算法如下：当像元 m_{22} 被判为坏点，比较周围八个像元的灰度值，并由小到大排序为 $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7$ 和 M_8 ，像元 m_{22} 的灰度值校正计算公式如(5)式所示，将 m'_{22} 作为坏点校正后的灰度值替换 m_{22} ：

$$m'_{22} = \left(\sum_{i=1}^8 M_i \times i \right) \div 36. \quad (5)$$

FPGA 内坏点检测及校正的流程如图 6 所示。随着相机滚筒式的曝光控制，坏点检测窗口不断向前推进，可校正整个开窗范围内的坏点像元，并能存储坏点地址，为后续图像所用。此种实时校正方法在实现坏点自动检测及校正的同时，又有效地融入了人工干预方式的思想，具有一定的处理优势。同样，对于

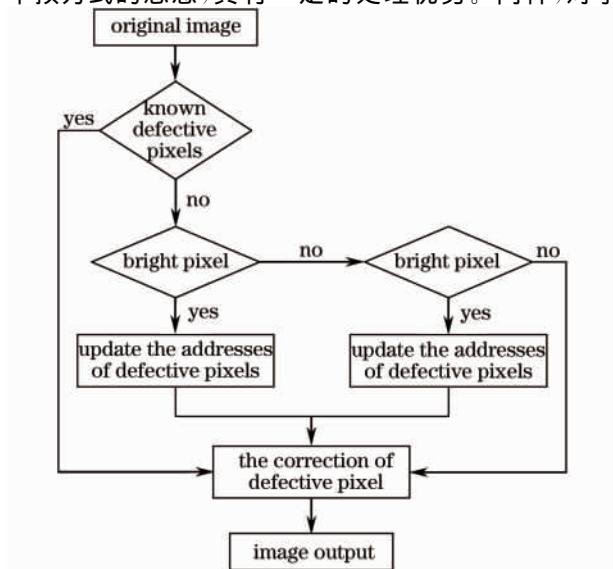


图 6 FPGA 内坏点校正工作流程图

Fig. 6 Procedure for defective pixel correction in FPGA

使用彩色探测器的目标探测相机来说，只要将彩色像元的三原色数据换算成对应的单个灰度值，便一样可以使用所述的坏点校正方法实现检测和处理。

5 坏点校正效果

5.1 亮点校正效果

实时坏点校正对亮点像元的校正效果如图 7 所示。图 7(b)中的检测窗口从周围暗背景里成功识别出孤立的亮点，并按照(5)式进行校正。校正后的灰度值与该像元原始数值一致，避免了虚警的产生。可见所述的坏点校正方法对暗背景中的孤立亮点有很好的检测及校正效果。

5.2 暗点校正效果

实时坏点校正对暗点像元的校正效果如图 8 所示。图 8(b)中的检测窗口从光斑里成功识别出灰度值突变的暗点，并按照(5)式进行校正。比较图 8(a)和(c)，可见校正后的灰度值与该像元原始数值已大为接近，所述的坏点校正算法有较好的数据恢复能力。

5.3 坏点校正后的探测精度改善

由图 7 可见，暗背景中存在亮点时，质心计算结果与正常图像有较大偏差，误差达到 $(E_{RRx}, E_{RRy}) = (3.30 \text{ pixel}, 1.92 \text{ pixel})$ 。由于坏点像元的数据校正后恢复到了原始值，质心计算的偏差被消除，获得了正确的光斑定位信息。

同样，从图 8 可见，因光斑中存在暗点像元，质心计算结果偏差了 $(E_{RRx}, E_{RRy}) = (0.08 \text{ pixel}, 0.10 \text{ pixel})$ 。而坏点像元的灰度值在校正后，质心

计算结果与原始图像相比, 计算误差已下降到 $(E_{RRx}, E_{RRy}) = (0.01 \text{ pixel}, 0.01 \text{ pixel})$ 。有效抑制

了暗点像元对质心计算的干扰, 提高了相机存在暗点时的定位精度。

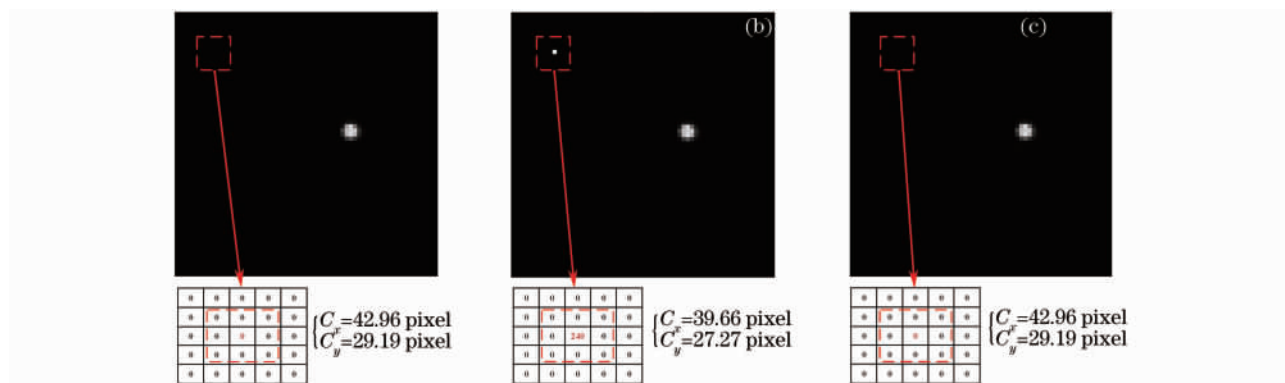


图 7 亮点校正效果。(a) 原始图像; (b) 有亮点; (c) 亮点校正后

Fig. 7 Correction effect of bright pixels. (a) Original image; (b) with bright pixels; (c) after correction

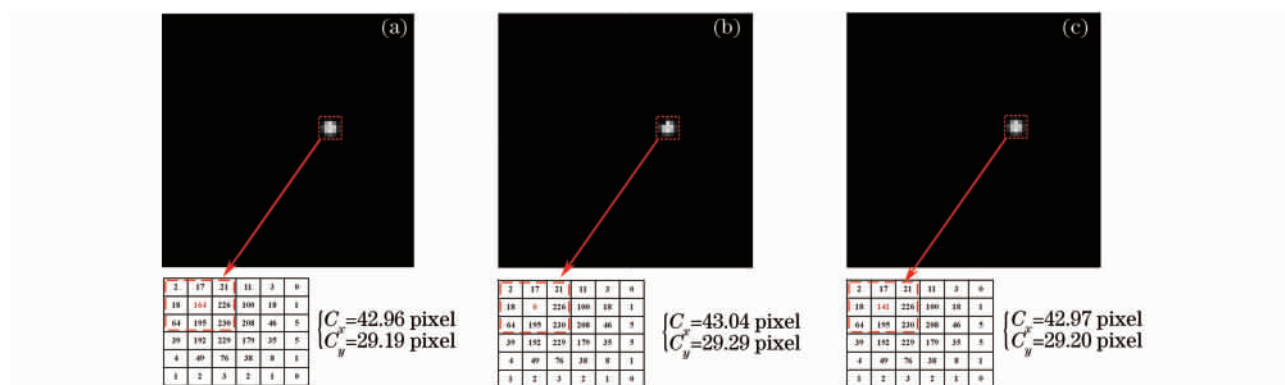


图 8 暗点校正效果。(a) 原始图像; (b) 有暗点; (c) 暗点校正后

Fig. 8 Correction effect of blind pixels. (a) Original image; (b) with blind pixels; (c) after correction

6 结 论

从星载光斑探测相机的特点出发, 提出了适用于星地激光通信 ATP 系统的实时坏点校正方法。设计了基于 STAR1000 探测器的光斑探测相机, 并利用该相机对校正算法进行了实验验证。实验结果表明, 所提出的实时坏点校正方法适用于 CMOS 相机, 该校正方法延时小、坏点数据恢复能力强, 且能够有效提高存在坏点时相机的定位精度。这对星地激光通信 ATP 系统的光斑探测相机设计, 具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(1): 3—20.
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 3—20.
- Liu Liren. Laser Communications in space II test and verification techniques on the ground[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 149—155.
刘立人. 卫星激光通信 II 地面检测和验证技术[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 149—155.
- Yang Minghui. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. 30—35.
杨明辉. 制冷红外摄像仪视频图像处理系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. 30—35.
- Hu Yueli, Ji Huijie, Wu Pin, *et al.*. Research on image filtering algorithm and its FPGA implementation [J]. Computer Measurement and Control, 2008, 16(11): 1672—1675.
胡越黎, 计慧杰, 吴 频, 等. 图像的中值滤波算法及其 FPGA 实现[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(11): 1672—1675.
- Deng Honghai. Study on High-Performance Planar InGaAs Short Wavelength Infrared Detector[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. 29—31.
邓洪海. 高性能平面型 InGaAs 短波红外探测器研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013. 29—31.
- Lin Junyang, Shu Rong, Huang Genghua, *et al.*. Study on threshold of damage to CCD and CMOS image sensors[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(6): 475—478.
林均仰, 舒 嵘, 黄庚华, 等. 激光对 CCD 及 CMOS 图像传感器的损伤阈值研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(6): 475—478.
- Zhang Liang, Wang Jianyu, Jia Jianjun, *et al.*. Design and performance of fine tracking system based on CMOS for quantum communication[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0205008.
张 亮, 王建宇, 贾建军, 等. 基于 CMOS 的量子通信跟踪系统设计及检验[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0205008.
- Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, *et al.*. The research on positioning accuracy of spot-detecting camera in ATP system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205007.

钱 锋, 贾建军, 张 亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205007.

9 Dou Jianglong. The Design of Microscope Image Processing and Analyzing System Based on CMOS Sensor [D]. Hangzhou:

Zhejiang University, 2012. 20-21.

窦江龙. 基于 CMOS 传感器的显微图像处理分析系统设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. 20-21.

栏目编辑: 何卓铭

210 W 全光纤结构单频、单偏振掺铥光纤激光器

近年来,随着高亮度半导体抽运源输出功率的提高以及大模场面积双包层掺铥光纤的出现,连续掺铥光纤激光器输出功率已经达到了千瓦量级,已广泛应用于激光医疗等领域,然而在激光雷达、中红外非线性频率转换等领域,迫切需要窄线宽输出的单频掺铥光纤激光器。

最近,本课题组研制出了全光纤主振荡功率放大(MOPA)结构的平均输出功率为 210 W 的单频、单偏振连续掺铥光纤激光器,该高功率单频、单偏振掺铥光纤激光器由低功率的单频分布式反馈(DFB)半导体激光种子源和四级全光纤结构包层抽运掺铥光纤放大器组成。单频 DFB 半导体激光器最大平均输出功率为 3.5 mW,输出激光线宽小于 2 MHz,中心波长为 2000.9 nm。进行高功率放大前种子源的平均功率被两级保偏(PM)掺铥光纤预放大器放大到了 5 W。其中,25/400 μm 的大芯径保偏双包层掺铥光纤作为激光增益介质,中心波长为 793 nm 的高功率多模半导体激光器作为抽运源,最后一级掺铥光纤功率放大器总的抽运功率

为 300 W。图 1(a)为第一个大模场面积保偏掺铥光纤功率放大器平均输出功率随抽运功率变化的关系图,在抽运功率增加到 135 W 时,最大平均输出功率为 75 W,相应的斜率效率为 55%;图 1(b)为第二个大模场面积保偏掺铥光纤功率放大器平均输出功率随抽运功率变化的关系图,当最大抽运功率为 300 W 时,掺铥光纤激光器最大平均输出功率达到了 210 W,相应的斜率效率为 53%,此时,测得输出激光的偏振消光比大于 17 dB;图 1(c)采用分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪测得 3 dB 光谱线宽小于 0.05 nm;图 1(d)测得该高功率线偏振掺铥光纤激光器工作在单频状态。实验中还监测了掺铥光纤功率放大器中的受激布里渊散射(SBS)效应,反向输出功率没有明显的增加,最大输出功率仅为 5 mW,表明光纤放大器工作在 SBS 阈值之下。该百瓦级全光纤单频、单偏振掺铥光纤激光器可作为理想的抽运源抽运非线性光学晶体、中红外拉曼光纤、中红外高非线性光纤以实现高功率的中红外激光输出。

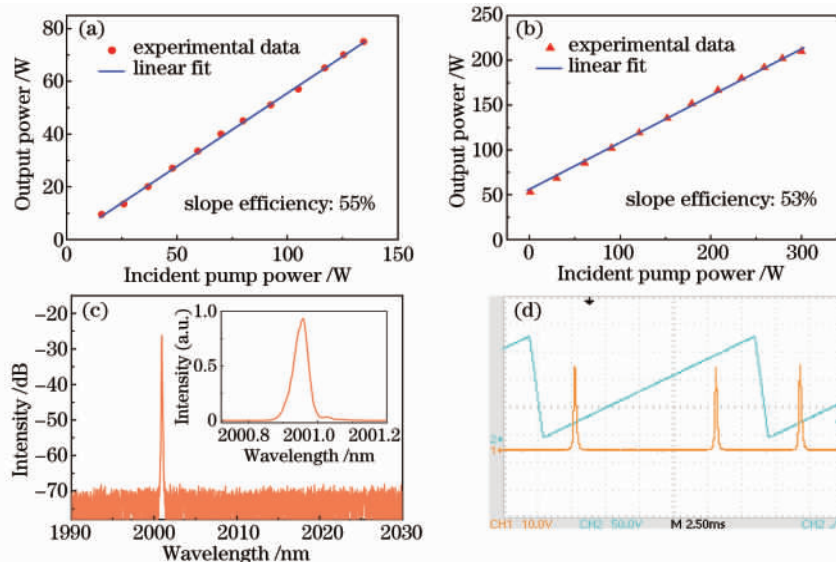


图 1 (a) 第一个保偏掺铥光纤功率放大器的输出功率; (b) 第二个保偏掺铥光纤功率放大器的输出功率;

(c) 掺铥光纤激光器输出功率为 210 W 时的光谱; (d) 掺铥光纤激光器的扫描法布里-珀罗干涉光谱

Fig. 1 (a) Average output power of the first PM thulium-doped fiber power amplifier; (b) average output power of the second PM thulium-doped fiber power amplifier; (c) optical spectrum of the thulium-doped fiber laser at output power of 210 W; (d) scanning Fabry-Perot interferometric spectrum of the thulium-doped fiber laser

刘 江 师红星 刘 昆 侯玉斌 王 璞

(北京工业大学激光工程研究院 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

* E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn

收稿日期: 2014-03-17; 收到修改稿日期: 2014-03-24