

基于量子点短波红外焦平面探测器的 二氧化碳成像系统研究^{*}

姜 杨 刘 辉 王默涵 薛 旭 刘 向

(南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要: 短波红外气体成像技术受探测器工艺,读出噪声等因素影响,红外图像存在非均匀性与大块盲元,成像质量低,导致气体轮廓提取错误。针对以上局限,开展了基于量子点短波红外焦平面探测器的二氧化碳成像系统研究,配合超连续谱激光器以及单色仪输出 1 200 nm 和 1 578 nm 短波激光,实现基于可调谐二极管激光吸收光谱技术的气体吸收光谱成像。利用相关双采样技术去除探测器复位与低频噪声,采用差分两点校正算法降低图像非均匀性至 4.91%,采用基于空间补偿的相关像元补偿算法有效去除图像的成块盲元与单点盲元,盲元率 0.006%,后采用背景减除法提取气团轮廓。实验表明该系统可在 1 s 内实现不同流速下 2% 二氧化碳气团的成像探测。

关键词: 量子点焦平面探测器;短波红外气体成像;非均匀性校正;盲元检测

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1060

Research on carbon dioxide imaging system based on quantum dot short-wave infrared focal plane detector

Jiang Yang Liu Hui Wang Mohan Xue Xu Liu Xiang

(School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Short-wave infrared (SWIR) gas imaging technology is affected by factors such as detector fabrication processes and readout noise, which result in non-uniformity and large clusters of blind pixels in infrared images. These issues degrade the imaging quality, leading to errors in gas contour extraction. To overcome the aforementioned limitations, a CO₂ imaging system based on a quantum dot short-wave infrared focal plane detector was developed. The system, integrated with a supercontinuum laser and monochromator, generates short-wave infrared laser wavelengths at 1 200 nm and 1 578 nm. This configuration facilitates gas absorption spectral imaging using tunable diode laser absorption spectroscopy. Correlated double sampling technology was employed to remove reset and low-frequency noise from the detector. A differential two-point correction algorithm was used to reduce image non-uniformity to 4.91%. Additionally, a spatial compensation-based correlated pixel compensation algorithm was implemented to effectively eliminate both clustered and isolated blind pixels, achieving a blind pixel rate of 0.006%. Finally, background subtraction was applied to extract the gas plume contours. Experimental demonstrates that the system is capable of imaging and detecting 2% CO₂ gas plumes at different flow rates within 1 s.

Keywords: quantum dot focal plane detector; short-wave infrared gas imaging; non-uniformity correction; blind pixel detection

0 引言

红外气体成像技术是一种基于气体红外吸收峰的非接触式的气体检测方法,在气体泄漏^[1],温室气体探测等领域

具有广泛应用。

红外气体成像可分为基于背景辐射吸收被动式成像与基于对光源辐射吸收的主动式成像^[2],被动式成像无需辐射源,主要通过判断气体与其背景的温差进行远距离,多种

收稿日期:2024-12-17

^{*} 基金项目:国家重点研发计划(2022YFB4401301)、苏州市姑苏创新创业领军人才计划(ZXL2021303)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX24_1498)资助

类气体成像^[3],但是当两者温差较小时,图像的对比度低,信噪比差。区别与被动式成像,主动成像技术采用激光器等主动光源来照射待测气体区域,通过接收反射光与散射光进行成像,具有抗干扰能力强,图像分辨率高的优势。例如差分吸收激光雷达技术(differential absorption lidar, DIAL)^[4],可调谐二极管激光吸收光谱技术(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)^[5],差分吸收光谱技术(differential optical absorption spectroscopy, DOAS)^[6]等。

目前现有的红外气体成像技术多基于锑铟探测器,但由于其成本高,工艺复杂,随着像元尺寸与阵列面积的增大,其信号耦合难度继续增加,无法实现大规模,大阵列的应用^[7]。

量子点探测器作为新兴的红外焦平面探测器,具有响应波段可调,灵敏度高,工艺简单,可实现红外气体探测与成像。2023年, Lee 等^[8]提出了一种结合石墨烯量子点(graphene quantum dots, GQDs)和 SnO₂ 纳米穹顶的探测器,用于检测二氧化氮。同年, Hu 等^[9]提出了一种基于量子点的场效应晶体管(field effect transistor, FET)气体探测器,采用 PbS 胶体量子点来增强灵敏度,可实现 PPB (parts per billion, PPB)级别的二氧化氮探测。

但目前量子点短波红外气体成像主要存在以下问题: 1)受制于探测器工艺影响,探测器每个像素的输出波形只有一段时间为有效信号,其他时间为复位信号,探测器输出信号易受到复位噪声^[10]影响。2)气体图像存在非均匀性^[11]与盲元^[12],由于读出电路等因素影响,在均匀光照射下,每个像元的响应值不完全一致,图形会出现竖状条纹与黑白色盲元,极大的影响图像质量与气体边缘轮廓提取。

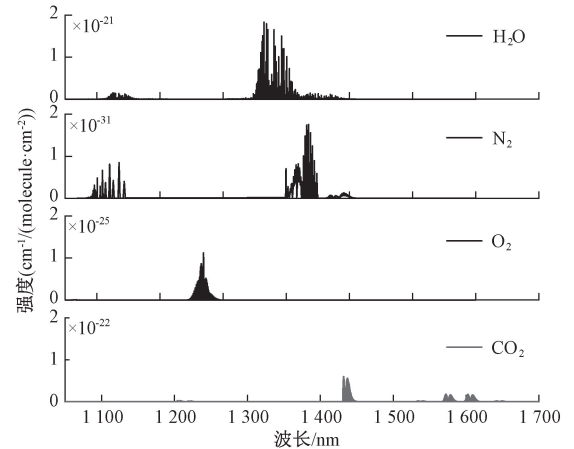
针对以上不足,本文基于 Pbs 量子点焦平面探测器设计了短波红外二氧化碳成像系统。采用模拟与数字端相结合的相关双采样技术进一步去除输出信号的复位噪声,部署基于气体图像的差分两点校正算法提高图像均匀性,利用基于空间补偿的相关像元补偿算法去除单点与块状盲元,结合基于背景减法^[13]的双波段差分技术实现二氧化碳成像。

1 系统整体方案设计

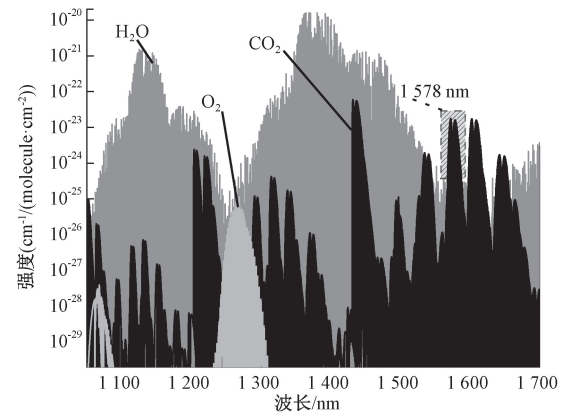
1.1 二氧化碳红外成像原理

气体分子在吸收特定波长的激光后,会发生能级跃迁,其价电子从基态跃迁到激发态,由于不同气体分子结构不同,导致其能级跃迁方式也并不同,直观表现为不同的气体具有不同的吸收光谱^[14]。图 1 给出了根据高分辨率传输分子吸收数据库^[15](high resolution transmission molecular absorption database, HITRAN)模拟的在 1 000~1 700 nm 的大气常见气体吸收谱线,图 1(a)给出了大气中常见 4 种气体在 1 000~1 700 nm 的吸收情况,可以看出二氧化碳在 1 430、1 578、1 610 nm 附近具有较强吸收峰,同时考虑到大

气中气体存在相互干扰问题,其吸收谱线存在重叠情况,如图 1(b)所示,二氧化碳在 1 430 nm 的吸收峰与水气产生重叠,选用该波段会导致绝大部分的红外光会被水气吸收。而二氧化碳在 1 578 nm 与 1 610 nm 的吸收强度远高于水气,氧气等两个数量级,同时考虑到 1 610 nm 比较接近探测器的极限探测波段,故选择 1 578 nm 作为二氧化碳的探测波段进行气体成像实验。



(a) 气体吸收谱线对比
(a) Gas absorption line comparison



(b) 吸收谱线重叠情况
(b) Overlap of absorption lines

图 1 气体吸收谱线

Fig. 1 Gas absorption spectrum

比尔朗伯定律^[16]展示了光强衰减与气体吸收特性之间的关系,当频率为 ν , 光强为 I_0 的入射光照射到光程为 L 的待测气体时,光强会由于气体分子的吸收作用会发生衰减,通过检测反射光的光强衰减程度,可以得到气体的种类与浓度信息,如式(1)所示。

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp(-\sigma(\nu)cL) \quad (1)$$

式中: $I(\nu)$ 为透射光的强度, $I_0(\nu)$ 为入射光的强度, c 为待测气体浓度, L 为光程, $\sigma(\nu)$ 为介质在频率为 ν 时的吸收截面。

当激光器的人射光波长 λ_1 处于二氧化碳的吸收峰位置时,入射光被二氧化碳气体吸收,后照射到背景板发生散

射,光强发生改变。入射光 λ_2 不处于二氧化碳的吸收峰位置时,入射光直接照射背景板向后发生散射,光强基本不变。然后由后续的成像系统分别获得两幅红外图像,采用背景减除法,使用两幅红外图象进行像素级差分运算,从而得到排放二氧化碳气体的几何形态信息。

1.2 成像系统整体设计

量子点短波红外成像系统主要包括量子点探测器,探测器外围电路,短波红外(short wave infrared, SWIR)镜头,超连续谱激光光源,滤光系统和上位机等部分,成像系统框图如图 2 所示。

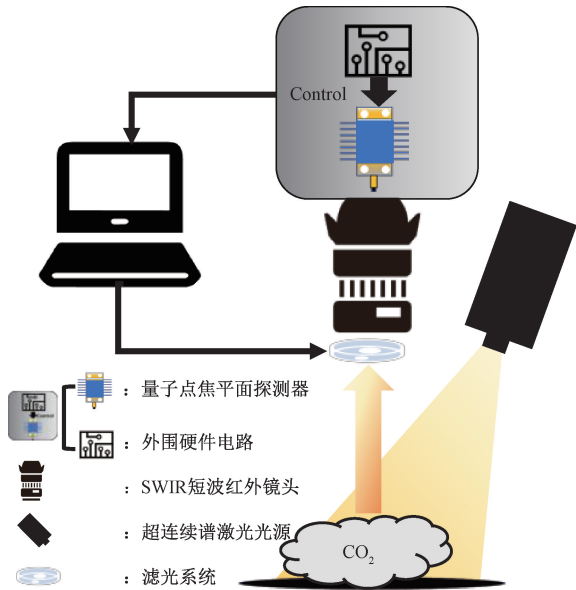


图 2 成像系统框图

Fig. 2 Block diagram of the imaging system

本文采用的核心探测器分辨率为 512×640 , 响应波段为 $900 \sim 1700 \text{ nm}$, 探测率为 $5 \times 10^{11} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 量子效率 30%, 四路模拟信号输出, 读出方式为先积分在读出/边积分边读出可选, 探测器工作的主时钟频率为 10 MHz, 探测器主要性能指标如表 1 所示。

表 1 量子点焦平面探测器主要参数

Table 1 Main parameters of quantum dot focal plane detector

参数	性能
尺寸	640×512
响应波段	0.9~1.7 μm
量子效率	30%
探测率	$5 \times 10^{11} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$
像素尺寸	15 $\mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$
曝光方式	快照
读出方式	先积分在读出/边积分边读出
可操作像元数	>99%

系统采用的镜头为 SWIR 镜头, 响应波段为 $900 \sim 1700 \text{ nm}$, 红外镜头的存在极大排除了可见光对成像效果的干扰。光源采用超连续谱激光光源, 配合单色仪, 分别发射 1578 nm 与 1200 nm 的激光照射二氧化碳气团, 二氧化碳气体对 1578 nm 的激光具有较强的吸收峰而对 1200 nm 的激光几乎没有任何吸收, 从而获得两个波段下的红外图像进行差分运算, 通过背景减除法获得气体的形状与位置信息, 实现二氧化碳成像。

2 系统设计

2.1 系统硬件设计

本系统的关键在于 Pbs 量子点焦平面探测器驱动与二氧化碳原始图像数据的处理。主要包括 3 部分: 1) 探测器驱动与信号调理电路, 为探测器提供工作的 6 类偏压, 同时对气体信号进行调理, 提高信号质量。2) 信号处理电路, 主要包括单端转差分^[17]与模数转换(analog to digital converter, ADC)电路。3) FPGA(field programmable gate array, FPGA)处理单元, FPGA 作为主控核心, 控制外围电路同时进行数据处理。系统硬件框图如图 3 所示。

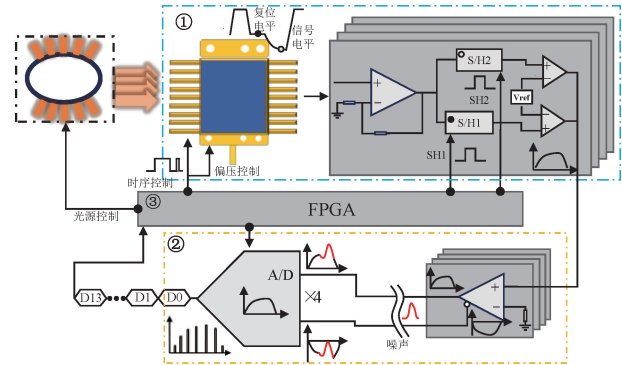


图 3 量子点气体成像硬件框图

Fig. 3 Quantum dot gas imaging hardware block diagram

FPGA 电路包括 FPGA 芯片, 储存芯片, 视频流芯片及其外围电路等, 作为系统的处理核心将图像传输到上位机显示。

相较于普通的红外成像, 系统为了获得二氧化碳气体的几何形状信息, 需要对两幅红外图形进行帧间像素级差分运算, 此时探测器输出的复位噪声会影响输出信号, 从而影响到二氧化碳气团的几何边缘, 因此需要对复位噪声信号进行额外的处理已保证图像的准确性。

量子点焦平面的探测器的工作时序由 FPGA 给出, 输出像素信号, 由于工艺的影响, 输出的信号包含复位电平与信号电平, 如图 4 所示, 影响原始气体数据的准确性。本文采用相关双采样电路解决复位噪声与低频噪声对输出信号的影响。系统首先分别采样复位电平与信号电平, 由于在一个信号周期内完成了两次信号采样, 复位电平与信号电平包含的噪声电压几乎相等。后续将两次采样值相减, 得

出有效信号,从而排除探测器复位噪声与低频噪声对输出信号的影响。

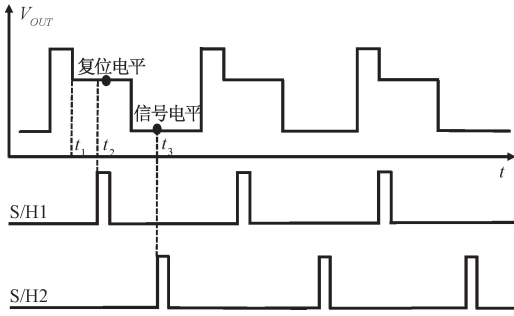


图 4 气体数据双采样时序图

Fig. 4 Gas data dual sampling timing diagram

图 5 给出了探测器输出电路的模型,当读出像元电荷时,首先会对 MOS 管进行复位,复位脉冲到来时,复位管导通,导通电阻为 R_{ON} ,其产生的电阻热噪声加载了输出保持电容 C 两端。整个复位过程可以等效为 MOS 管的通过电阻对 R_{ON} 对电容 C 充电,故产生复位噪声电压 $V_N(t)$,当复位结束,此时沟道截止电阻为 R_{OFF} ,由于 $R_{OFF}C$ 较大,电容 C 上仍然保留了部分复位噪声电压,其噪声电压均方根 $\overline{V_N(t)^2}$ 为:

$$\overline{V_N(t)^2} = \frac{KT}{C} e^{-2\Delta t_2/R_{OFF}C} (e^{-2\Delta t_1/R_{OFF}C} - 1) \quad (2)$$

式中: K 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度, Δt_2 为 $t_2 - t_1$, Δt 为两次采样间隔 $t_3 - t_2$ 。

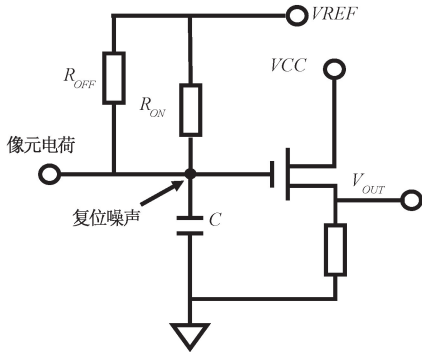


图 5 探测器输出电路模型

Fig. 5 Detector output circuit model

由式(2)可看出, Δt 越小,两次采样间复位噪声的相关性越大,输出噪声电压的均方值就越小。因此只要适当选择 Δt ,采用相关双采样抑制复位噪声的效果就更加明显。故本系统没按照传统相关双采样的设计方案,直接使用带有双采样功能的 ADC 芯片,而是通过 FPGA 直接输出采样时序给探测器,而后在数字端将两次采样值相减。此方案不仅能够获得更完整的原始数据,同时可以对采样间隔 Δt 进行更加灵活的微调以获得更强大的抑制复位噪声的能力。

2.2 系统软件设计

系统软件设计以 FPGA 为处理核心完成了系统的驱动与红外图像的处理显示,主要包括:探测器驱动模块, A/D 驱动模块,信号调理模块,差分校正模块,盲元检测模块,差分运算模块,图像显示与指令控制模块等,如图 6 所示。

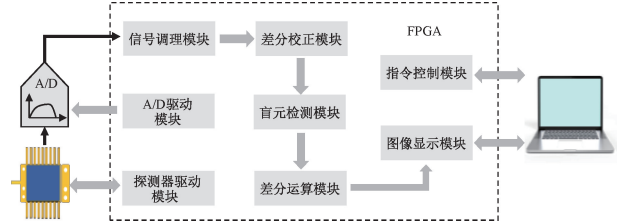


图 6 气体成像系统软件流程框图

Fig. 6 Gas imaging system software block diagram

系统首先对量子点探测器进行驱动,探测器正常工作会以四路模拟信号的形式输出气体图像数据,数据通过差分放大电路后进入模数转换电路,同时采用单端转差分电路提高信号抗干扰能力。模数转换芯片将四路模拟数据转化为四路 14 位低压差分信号 (low voltage differential signal, LVDS) 数字信号,信号调理模块对前文双采样的两次气体数据相减以提取出有效数据提供给后续的图像处理模块。调理过的数据通过差分校正模块降低气体图像的非均匀性,去除竖状条纹,通过盲元检测模块去除图像盲元,提高图像质量。最后将在 1 578 nm 与 1 200 nm 激光照射下连续采集的二氧化碳图像数据进行差分运算,通过背景减法得到二氧化碳气团的形状与位置信息,替换原始图像中的相关像素,最终实现二氧化碳成像。

1) 气体探测差分两点校正算法

理想情况下,量子点探测器在受到均匀光照射时,其各个像元的响应值应完全一致,像素点的响应曲线应该完全重合。但是受到半导体材料,读出电路,制备工艺,工作环境等因素^[18]的影响,探测器各个像元输出的值不一致,即红外图像具有非均匀性。探测器非均匀性带来的图像噪声会造成二氧化碳气团几何形状的误判,同时影响图像质量,直观表现为红外图像会出现规律的竖状条纹。

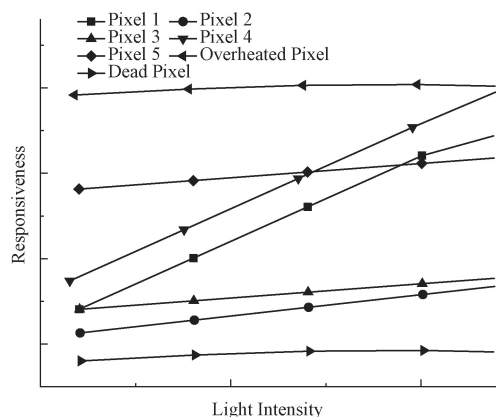
国标中定义红外图像非均匀性 NU 如式(3)所示。

$$NU = \frac{1}{V} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (V_{ij} - \bar{V})^2} \quad (3)$$

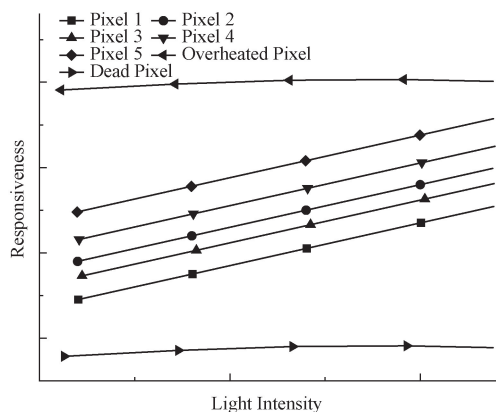
式中: NU 为非均匀大小,其表示各个像元输出电压的均方根误差, V_{ij} 为单个像元输出电压值, \bar{V} 为所有像元输出电压平均值。

在本系统中,针对探测器的成像系统提出了两点校正算法,校正流程如图 7 所示,原始的响应响应曲线各异,如图 7(a) 所示,随后需要根据图像的增益矩阵与偏移矩阵,通过增益与偏移矩阵将输入图像每个像素的响应值逐步校正到同一曲线,如图 7(b) 和 (c) 所示。

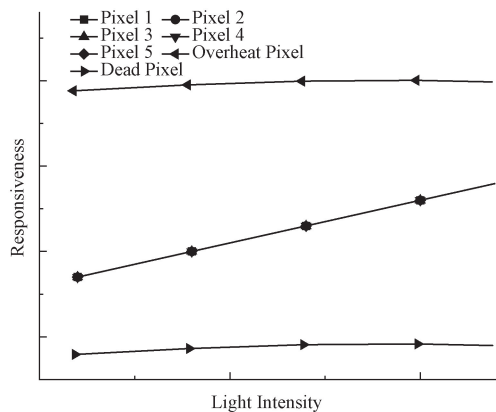
图像的增益矩阵与偏移矩阵可根据探测器在高低温背



(a) 原始像元响应曲线
(a) Original pixel response curve



(b) 增益校正后像元响应曲线
(b) Pixel response curve after gain correction



(c) 偏移校正后像元响应曲线
(c) Pixel response curve after offset correction

图 7 非均匀校正前后探测器像元响应值

Fig. 7 Detector pixel response values before and after non-uniformity correction

景下的响应值得出,首先在高温 T_1 和低温 T_2 背景下,分别采集成像系统在均匀辐射背景下的输出:

$$Y_{i,j}^{T_1} = G_{i,j} X_{i,j}^{T_1} + O_{i,j}$$

$$Y_{i,j}^{T_2} = G_{i,j} X_{i,j}^{T_2} + O_{i,j} \quad (4)$$

式中: Y^T 是在某一温度整个区域阵列的平均响应; $G_{i,j}$ 和

$O_{i,j}$ 分别是这个像素的增益和偏移系数矩阵。系数 $G_{i,j}$ 和 $O_{i,j}$ 可以根据式(5)得出。

$$\begin{cases} G_{i,j} = (Y_{i,j}^{T_2} - Y_{i,j}^{T_1}) / (X_{i,j}^{T_2} - X_{i,j}^{T_1}) \\ O_{i,j} = Y_{i,j}^{T_1} - G_{i,j} X_{i,j}^{T_1} \end{cases} \quad (5)$$

后续每一帧的图像 $X_{i,j}$ 与增益、偏移矩阵进行线性运算如式(6)所示。

$$Y_{i,j} = G_{i,j} X_{i,j} + O_{i,j} \quad (6)$$

算法流程如图 8 所示,算法部署在 FPGA 内,对图像进行实时校正,可以看出校正后图像竖纹明显减少,图像质量得到提升。

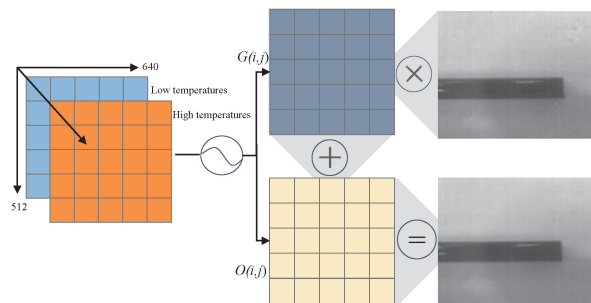


图 8 两点校正算法流程

Fig. 8 Two-point correction algorithm process

2) 气体图像的盲元检测与校正

在量子点焦平面探测器中,由于工艺条件的局限性,在均匀光照的情况下,部分像元可能会失效或表现出极大的响应值。这些异常像元在最终成像过程中无法准确反映入射光强的变化,从而在短波红外图像中形成盲元,表现为突兀的黑点或者白点。盲元出现的位置与大小具有随机性,在 1 578 nm 与 1 200 nm 激光照射下像元响应值相同,单点盲元对气体图像的影响较小,但成块盲元若出现在气团中间位置,在进行图像差分运算时像素值为零,呈现在气体图像上会出现固定的大块白点,若出现在气体边缘位置,则会造成气团边缘形状的误判。

在盲元的检测与校正方面现阶段主要使用空间补偿中值滤波算法去除盲元,即使用同一帧图像相邻的上下左右 4 个像元的平均值作为补偿值去替换盲元,这种算法方法保留了更多的图像信息但是在成块盲元的处理上效果较差,不适合气体成像的应用场景。因此本文提出了一种基于空间补偿的相关像元补偿算法,能够更好在处理出现在气团位置的成块盲元。如图 9 所示,该算法的核心思想为:

- (1) 确定盲元的位置;
- (2) 确定相关像元的位置;
- (3) 计算相关像元与盲元的相关度;
- (4) 使用盲元补偿值替换盲元。

采集系统在 1 578 nm 和 1 200 nm 下的输出 $Y_{i,j}^{T_1}$ 和 $Y_{i,j}^{T_2}$, 计算各个像元的高低温响应差值,如式(7)所示。

$$Y_{i,j}^T = Y_{i,j}^{T_1} - Y_{i,j}^{T_2} \quad (7)$$

随后判断盲元,确定盲元的位置,若像元响应 $Y_{i,j} < \sigma$,

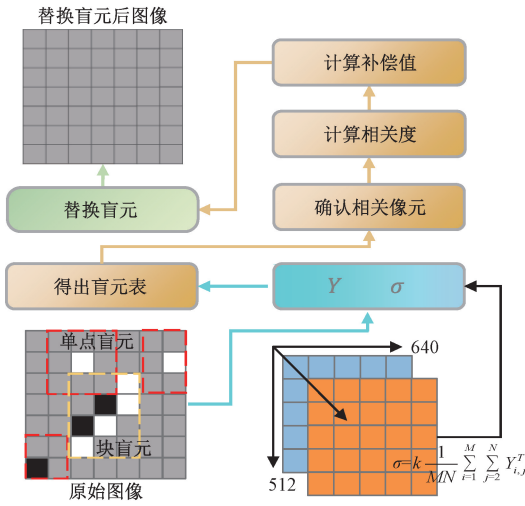


图 9 盲元检测与校正流程图

Fig. 9 Blind pixel detection and correction flow chart

则判断该像元为盲元,如式(8)所示。

$$\sigma = k \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=2}^N Y_{i,j}^T \quad (8)$$

式中: k 为经验值,一般根据实验确定,这里取 0.6, MN 为探测器的分辨率为 640×512 ,最终得到盲元表。

在确定盲元位置后,需要确定盲元对应的上、下、左、右 4 个方位的相关像元位置,记为 Y_u, Y_d, Y_l, Y_r 。假设盲元的位置为 $Y(i, j)$,以正上方为例,判断 $Y(i-1, j)$ 是否为盲元,如果 $Y(i-1, j)$ 依旧为盲元,判断 $Y(i-2, j)$ 是否为盲元,该过程持续到判断 $Y(i-a, j)$ 不为盲元,记为 $Y(i, j)$ 相关像元 Y_u ,与 $Y(i, j)$ 的距离 L_u 为 a ,重复以上步骤,得到盲元 $Y(i, j)$ 的 4 个相关像元位置与距离。最后得出 4 个相关像元与盲元的关系度 $\lambda_u, \lambda_d, \lambda_l, \lambda_r$,计算过程如式(9)所示。

$$\lambda_u + \lambda_d + \lambda_l + \lambda_r = 1$$

$$L_u \cdot \lambda_u = L_d \cdot \lambda_d = L_l \cdot \lambda_l = L_r \cdot \lambda_r \quad (9)$$

联立两式可得 $\lambda_u, \lambda_d, \lambda_l$ 和 λ_r 的值,对盲元的 $Y(i, j)$ 的补偿值 $Y'(i, j)$ 为:

$$Y'(i, j) = Y_u \cdot \lambda_u + Y_d \cdot \lambda_d + Y_l \cdot \lambda_l + Y_r \cdot \lambda_r \quad (10)$$

最后使用盲元补偿值替换盲元,完成盲元检测与校正。

3 基于短波红外的二氧化碳成像测试

3.1 实验平台搭建

系统实验平台包括量子点短波红外成像系统,滤光片系统,超连续谱激光光源,待测气体,测试上位机等部位,二氧化碳成像系统如图 10 所示。超连续谱激光光源配合单色仪通过激光扩束镜发射 1578 nm 与 1200 nm 激光,上位机控制滤光片系统进行对应波段滤光片切换,成像系统收集待测气体的特征信号进行成像,图像分辨率为 640×512 。

3.2 二氧化碳气体成像实验

由前文可知,复位噪声电压均方根 $\overline{V_N(t)^2}$ 的大小直接

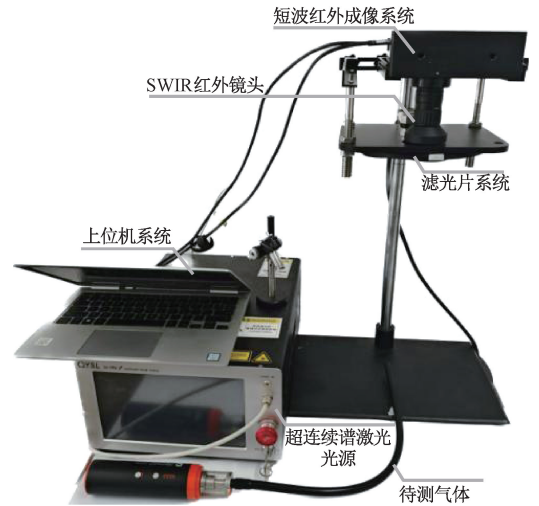


图 10 成像系统实物

Fig. 10 Imaging system pictures

表明了系统抑制复位噪声的能力,但由于探测器的沟道截止电阻 R_{OFF} ,输出保持电容 C 等参数未给出,所以为验证本系统对复位噪声的抑制能力,本文直接对比了均匀光照下没有经过相关双采样,在模拟端进行相关双采样与在数字端进行相关双采样的图像数据,测试结果如图 11 所示。

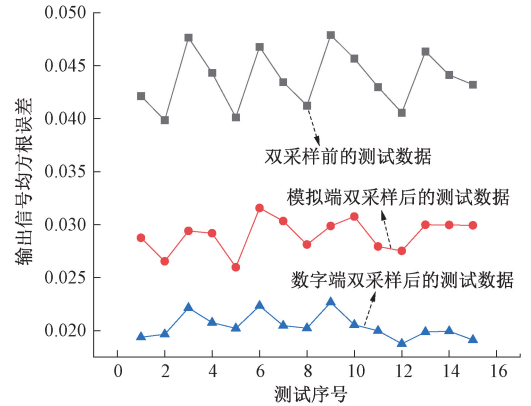


图 11 双采样前后输出信号均方根误差对比

Fig. 11 Comparison of RMS error of output signals before and after double sampling

可以看出在合理的选择双采样间隔后,本系统所采用方案的输出信号均方根误差相比没有采样双采样,直接采样双采样芯片(AD9945)得到了明显改善,即对探测器复位噪声进行了明显抑制。

针对双采样后的图像数据,本文将校正前后图像的每一列像元的响应值之和进行对比来进行定量分析,图 12(a)为校正前的像元响应值,图 12(b)为校正后的像元响应值。图 12 中过高或过低的数据为对应列存在盲元,可以看出在进行两点校正前正常像元的响应值误差较大,数据的方差较大,而进行校正后,正常像元的响应值近似为一条直线,数据的方差近似为零,图像的非均匀性得到明显改善。主

观上则表现为校正后红外图像的竖状条纹明显减少,如图 8 所示。

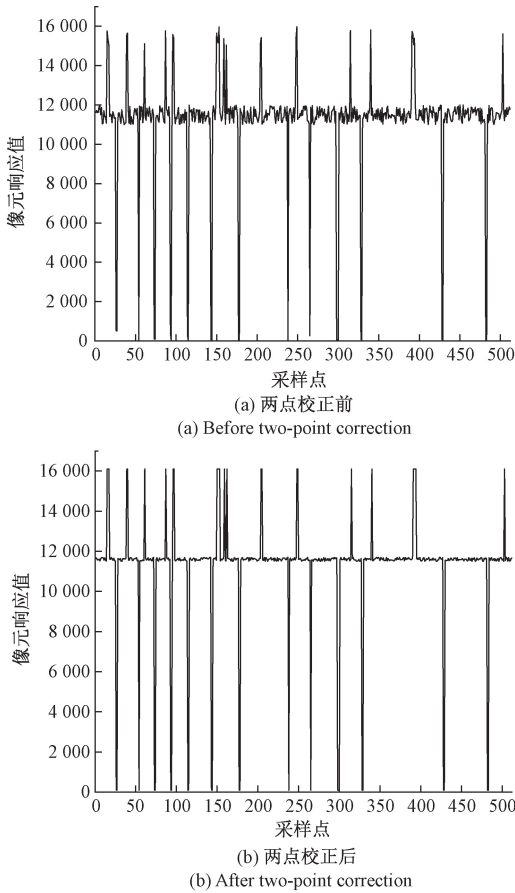


图 12 两点校正前后像元响应值对比

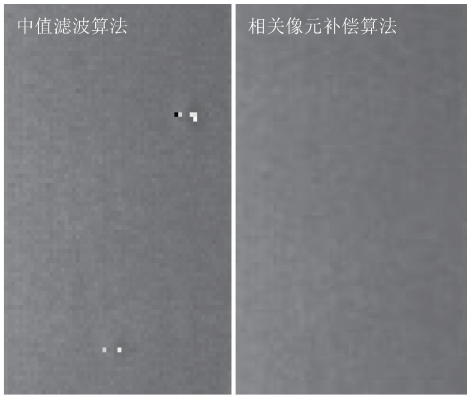
Fig. 12 Comparison of pixel response values before and after two-point correction

参考式(3),最终计算得出该图像在进行两点校正后,图像非均匀度由原始的 12.38%降低至 4.91%,图像非均匀性得到明显改善。

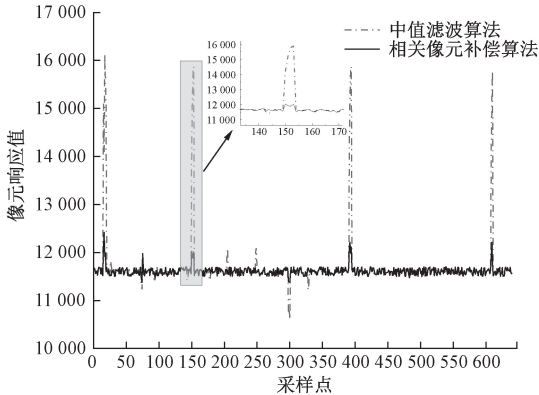
图 13 给出了传统中值滤波算法与基于空间补偿的相关像元补偿算法处理块状盲元的效果对比。如图 13(a)所示,本文使用的相关像元补偿算法不仅能对单点盲元进行校正,同时能在更大程度上对块状盲元进行校正替换。为了定量分析两种算法对盲元的校正能力,图 13(b)给出了不同算法处理后采集的一系列像元响应值对比,本文采用的算法在对块状盲元进行补偿时,盲元补偿值更接近理论数据。

算法最终检测的盲元数为 198,盲元率 0.006%。

图 14 给出了进行气体差分校正与盲元检测前后的提取的气体轮廓对比图,图 14(a)中由于图像的非均匀性的存在,提取出的轮廓边缘被竖状分割,同时部分盲元出现在气体区域内部,形成数个不规则黑点,出现在轮廓边沿的盲元更是破坏了气体原本的轮廓。经过相应的图像处理后,



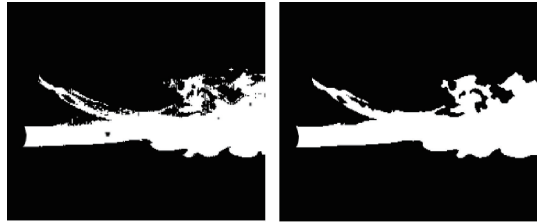
(a) 补偿效果对比
(a) Compensation effect comparison



(b) 像元响应值对比
(b) Pixel response value comparison

图 13 中值滤波与相关像元补偿算法效果对比
Fig. 13 Comparison of median filtering and correlated pixel compensation algorithms

如图 14(b)所示,上述情况得以明显改善。



(a) 处理前
(a) Before processing
(b) 处理后
(b) After processing

图 14 气体轮廓对比

Fig. 14 Gas profile comparison

图 15 给出了 2%浓度的二氧化碳气体分别在不同流速下进行气体成像实验。可以看出气体的轮廓被较为完整的呈现出来,同时随着气体流速的增大,气体的运动面积逐渐增大。

表 2 给出了不同视频长度下进行二氧化碳成像实时性监测结果,本文需要在两个波段下分别连续采集多帧图像以获得较好的边缘提取效果,但归因于系统的高帧率成像,系统可在 1 s 内完成二氧化碳成像,系统的实时性良好。

体浓度信号,同时扩展可检测气体的种类。

参考文献

[1] 李泉成,曹江涛,姬晓飞. 光流增强的红外成像气体泄漏检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 50-56.
LI Q CH, CAO J T, JI X F. Infrared imaging gas leak detection method with optical flow enhancement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2023, 37(3): 50-56.

[2] 沈英,邵昆明,吴靖,等. 气体光学检测技术及其应用研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(4): 3-18.
SHEN Y, SHAO K M, WU J, et al. Optical gas detection: Key technologies and applications review [J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(4): 3-18.

[3] SELIMOVIC V, YOKELSON R J, WARNEKE C, et al. Aerosol optical properties and trace gas emissions by PAX and OP-FTIR for laboratory-simulated western US wildfires during FIREX [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(4): 2929-2948.

[4] 梅亮,孔政,林宏泽,等. 基于沙氏成像原理的激光雷达技术研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3): 19-35.
MEI L, KONG ZH, LIN H Z, et al. Recent advancements of the lidar technique based on the Scheimpflug imaging principle(Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(3): 19-35.

[5] 李卢丹,姜宏伟,蒋红娜. 基于 TDLAS 的飞机燃油箱氧浓度测试技术研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(7): 187-191.
LI L D, JIANG H W, JIANG H N. Research on oxygen concentration measurement technology of aircraftfuel tank based on TDLAS [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(7): 187-191.

[6] 张之栋,谢品华,李昂,等. 基于车载差分吸收光谱技术的唐山 SO₂ 和 NO_x 污染分布及排放研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(5): 1651-1660.
ZHANG ZH D, XIE P H, LI ANG, et al. Study of SO₂ and NO_x distribution and emission in Tangshan base on mobile DOAS technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(5): 1651-1660.

[7] LIU J, LIU P L, CHEN D Y, et al. A near-infrared colloidal quantum dot imager with monolithically integrated readout circuitry[J]. Nature Electronics, 2022, 5(7): 443-451.

[8] LEE J, PARK M, SONG Y G, et al. Role of graphene quantum dots with discrete band gaps on SnO₂ nanodomes for NO₂ gas sensors with an ultralow

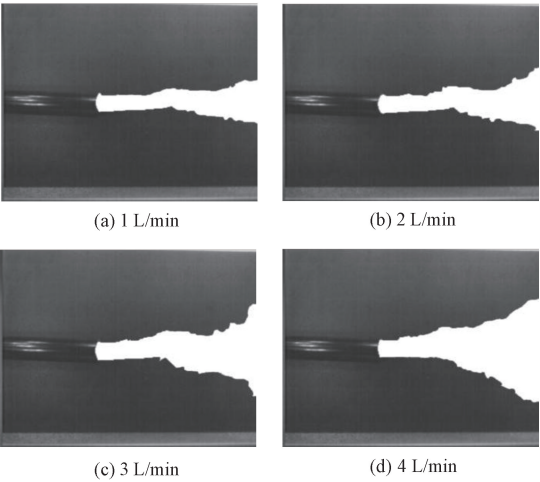


图 15 不同流速度下二氧化碳成像图

Fig. 15 Carbon dioxide imaging at different flow velocities

表 2 成像系统实时性测试

Table 2 Imaging system real-time test s

视频时间	13	11	8	7	6	5
检出时间	0.54	0.63	0.41	0.52	0.44	0.62

表 3 给出了短波红外成像系统的相关参数,系统具有高帧率,低功耗的优势,可在低非均匀性与盲元率下实现 2%浓度二氧化碳成像。

表 3 量子点短波红外成像系统参数

Table 3 Quantum dot shortwave infrared imaging system parameters

参数	性能
分辨率	640×512
非均匀性	4.91%
盲元率	0.006%
视频帧率	75 Hz
探测气体	CO ₂
功耗	<50 W

4 结 论

本文基于量子点短波红外焦平面探测器进行二氧化碳气体成像探测,结合背景减除法提取二氧化碳气团的几何位置信息。通过相关双采样电路在硬件端去除探测器输出复位与低频噪声,保证图像信号质量,针对气体图像采样差分两点校正算法降低图像非均匀性降低至 4.91%,采用基于空间补偿的相关像元补偿算法有效去除了图像的成块盲元,进一步提高图像质量与气团边缘提取的准确性。目前系统提取出二氧化碳气体的轮廓,未来将针对不同浓度的气体进行测试,基于比尔-朗伯定律,在现有图像上添加气

- detection limit[J]. *Nanoscale Advances*, 2023, 5(10): 2767-2775.
- [9] HU ZH X, ZHOU L CH, LI L, et al. Quantum dots-sensitized high electron mobility transistor (HEMT) for sensitive NO₂ detection[J]. *Chemosensors*, 2023, 11(4): 252.
- [10] 乔柏全, 汪鸿伟, 景松, 等. 一种高灵敏度大动态范围的红外焦平面异形读出电路的设计[J]. *半导体光电*, 2024, 45(3): 463-468.
- QIAO B Q, WANG H Y, JING S, et al. Design of an infrared focal plane special shaped readout circuit with high sensitivity and dynamic range[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2024, 45(3): 463-468.
- [11] CHANG S T, LI ZH. Single-reference-based solution for two-point nonuniformity correction of infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 101: 96-104.
- [12] 陈相洪, 黄文刚, 黄晓宗, 等. 基于红外焦平面电路智能算法研究与测试验证[J]. *国外电子测量技术*, 2023, 42(2): 120-129.
- CHENG X H, HUANG W G, HUANG X Z, et al. Research and test verification of intelligent algorithm based on infrared focal plane circuit [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2023, 42(2): 120-129.
- [13] 刘仲民, 何胜蛟, 胡文瑾, 等. 基于背景去除法的视频序列运动目标检测[J]. *计算机应用*, 2017, 37(6): 1777-1781.
- LIU ZH M, HE SH J, HU W J, et al. Moving object detection based on background subtraction for video sequence[J] *Journal of Computer Applications*, 2017, 37(6): 1777-1781.
- [14] 沈晨颖, 吴华坤, 吴琼, 等. 基于激光吸收光谱频时分复用技术的多组分气体测量研究[J]. *光学学报*, 2024, 44(23): 280-289.
- SHEN CH Y, WU H K, WU Q, et al. Measurement of multi-component gases based on laser absorption spectroscopy frequency-time division multiplexing technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(23): 280-289.
- [15] 聂伟, 阚瑞峰, 杨晨光, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 9-29.
- NIE W, KAN R F, YANG CH G, et al. Research progress on the application of tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 9-29.
- [16] XIN F X, LI J, GUO J J, et al. Measurement of atmospheric CO₂ column concentrations based on open-path TDLAS[J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1722.
- [17] 薄姝, 王华, 李涛. 320×256 长波面阵红外探测器焦面电路设计[J]. *电子测量技术*, 2016, 39(9): 20-25.
- BO SH, WANG H, LI T. Design of 320×256 long-wave area array infrared detector focal plane circuit[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(9): 20-25.
- [18] 闫勇刚, 王耿, 彭志勇, 等. 红外焦平面阵列非均匀性校正性能的联合评价[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(7): 170-176.
- YAN Y G, WANG G, PENG ZH Y, et al. Joint assessment of non-uniformity correction performance of infrared focal plane array [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 36(7): 170-176.

作者简介

姜杨, 硕士研究生, 主要研究方向为光电探测与嵌入式开发。

E-mail: 202212180035@nuist.edu.cn

刘向(通信作者), 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为FPGA 短波红外成像技术、窄带多光谱芯片型智能感知器件。

E-mail: xjlx1906@126.com