

文章编号 1004-924X(2025)09-1471-10

CCD 图像快速 Smear 消除算法及 其在星载成像设备地面检测系统上的应用

冯熠斌¹, 王 煜^{1*}, 刘国华¹, 林 方², 张 泉², 胡成睿¹, 张晓莉¹

(1. 安徽大学 物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230000;

2. 中国科学院 合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031)

摘要:星载高光谱成像仪是大气观测卫星的重要载荷,采用帧转移 CCD 获取地球大气成分分布信息。帧转移 CCD 具有 Smear 效应,影响光谱测量精度。针对传统 Smear 消除算法基于矩阵描述二维图像过于复杂,难以满足载荷研制部门地面检测系统实时消除图像中 Smear 效应的现状,根据帧转移 CCD 工作原理使用代数形式描述 Smear 的形成模式,推导出代数形式的 Smear 消除算法。该算法避免了传统矩阵形式 Smear 消除算法的矩阵运算,耗时为矩阵算法的 1/500,适用于实时性要求较高,主要针对静态图像消除的地面检测平台。分析了帧转移 CCD 中的 Smear 成因,基于成因推导出代数形式的 Smear 消除算法,该算法相对于 Eigen 库函数实现的矩阵消除算法,将耗时由 8 s 提升为 16 ms。将该算法应用到星载高光谱成像仪的地面检测系统中,实现了实时消除 Smear 的图像处理功能。

关键词:星载高光谱成像仪;帧转移 CCD;Smear 效应;地面检测系统

中图分类号:TH744.1;TP751 **文献标识码:**A

doi:10.3718/OPE.20253309.1471

CSTR:32169.14.OPE.20253309.1471

Smear quick removing algorithm of CCD image and its application in ground test system for satellite-born imaging devices

FENG Yibin¹, WANG Yu^{1*}, LIU Guohua¹, LIN Fang², ZHANG Quan²,
HU Chengrui¹, ZHANG Xiaoli¹

(1. Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230000, China;

2. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

* Corresponding author, E-mail: yuwang@aiofm.ac.cn

Abstract: Satellite-borne high-resolution imaging spectrometers, employed as payloads on atmospheric observation satellites, utilize frame transfer CCDs to measure the concentration and distribution of atmospheric components on Earth. However, the Smear effect inherent in frame transfer CCDs compromises the accuracy of spectral measurements. Traditional Smear removal algorithms, which rely on matrix representations of 2D images, are computationally complex and unsuitable for implementation in ground test systems requiring real-time performance. This study proposes an algebraic Smear removal algorithm by modeling the Smear process in accordance with the operational principles of frame transfer CCDs. The al-

收稿日期:2024-11-26;修订日期:2025-01-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41705016, No. 42305140)

gorithm eliminates the need for matrix operations inherent in conventional methods, reducing processing time to 1/500th of that required by matrix-based approaches. It is particularly well-suited for ground test platforms that demand high real-time performance and focus on Smear removal in static images. The paper begins by analyzing the causes of Smear in frame transfer CCDs and subsequently derives an algebraic Smear removal algorithm based on this analysis. Compared to the matrix-based algorithm implemented using the Eigen library, the proposed method reduces processing time from 8 s to 16 ms. The algorithm has been successfully applied to the ground test system of a satellite-borne imaging spectrometer, enabling real-time Smear removal during image processing.

Key words: satellite-borne imaging spectrometer; frame transfer CCD; Smear effect; ground test system

1 引 言

星载高光谱成像光谱仪通过采集地球大气层的光谱图像获得不同气体成分的浓度数据和地理分布,为气象环保和大气研究提供数据。温室气体卫星的成像光谱仪载荷使用帧转移面阵 CCD 作为焦面探测器,分辨率为 $1\,024 \times 1\,024$, 型号为 E2V 公司的 CCD275^[1]。光谱仪的光谱分辨率为 1 000 采样点;垂直飞行方向的地理分辨率为 1 000 采样点,沿轨方向的地理分辨率由 CCD 的帧频决定^[2]。帧转移面阵 CCD 分为成像区和存储区两部分。每幅图像的曝光时间内,在成像区完成电荷积分,然后通过连续 1 024 次行转移将成像区的电荷转入存储区,存储区为遮光区域,当 $1\,024 \times 1\,024$ 像元移入存储区后,再将该图像逐行读出,每行读出的过程是存储区的一次行转移加 1 024 次水平读出。连续完成 1 024 次行读出,即读出了一幅完整图像。图像读出只对存储区操作,此时成像区静止,处于曝光周期。这样,帧转移 CCD 就可以利用图像读出时间进行曝光,具备边曝光边读出的特点,且无需机械快门,这一特征非常适合沿轨推扫式成像设备连续拍摄的需要^[3]。一个成像周期由帧转移时间和图像读出时间组成。

Smear 效应是一种在帧转移 CCD 成像过程中出现的图像失真现象。在帧转移过程中,像元积累的电荷与其在曝光期间积累的电荷叠加,导致图像出现垂直拖光效应的现象。帧转移时间在成像时间中的占比越大,Smear 效应越明显。在光谱测量中,Smear 效应会影响光谱的测量精度。我国第一代星载成像光谱仪使用的 CCD 器件曝光时间最短 250 ms(帧频为 4 frame/s),帧转

移时间为 2.5 ms,帧转移时间相对曝光时间占比较小(不超过 1%),Smear 效应不明显。随着探测器和集成电路工艺的提高,第二代星载光谱仪采用速度更高、阱深更大的 CCD 帧转移器件(E2V 公司的 CCD275),其最短曝光时间达到 62.5 ms(帧频为 16 幅/秒),对应的帧转移时间也缩短到 2 ms。帧转移时间在整个积分周期内占比变大,达到 3%,Smear 效应更加明显。在微弱光谱信号测量中,这个占比无法忽略。我国第二代星载成像光谱仪于 2019 年启动研制,对应的地面检测台研制工作也同期展开。地面检测台是配合卫星载荷研制的设备,在调试和测试阶段模拟卫星平台向载荷设备提供指令、辅助数据等信号,同时接收载荷下传的数据。其中,一个重要功能是接收载荷的图像数据,并存储、显示和分析。载荷研制人员在光学装调过程中能够实时地观测消除 Smear 后的光谱图像,以提高调试和测试的效率。

目前,图像处理领域常用的消除 Smear 方法是使用矩阵形式表达面阵 CCD 图像,并通过对矩阵的运算消除 Smear。这方面研究比较成熟,如英国国王学院的 Powell Keith^[4]、安徽光学精密机械研究所的李扬^[5]、西北核技术研究所的刘璐^[6]、西安光学精密机械研究所的陈铁桥^[7]、中国科学技术大学的张泉^[8]等均采用矩阵算法进行 Smear 消除。矩阵算法具有通用性强、便于扩展的优点,但是计算复杂。地面检测台通常使用普通计算机,如果运用目前通用的矩阵算法,计算将过于缓慢,无法实现图像的实时处理。即使在对图像实时性要求不高的天文观测领域,使用者也困扰于矩阵算法消耗机时过长的的问题。为此,孙瑾秋等提出了基于截尾均值滤

波技术获取暗背景的Smear消除算法以解决矩阵算法耗时过长的问题^[9]。Young Seok Han等提出使用与亮像元相邻的暗区提取Smear成分进而消除Smear的方法,以缩短图像处理时间^[10]。不过,这类方法都是针对图像中有暗背景的图像,譬如夜晚星空。而星载光谱仪是在白天且太阳高度角大于30°时进行拍摄,整幅图像没有暗区,这类通过暗背景消除Smear的方法不再适用。本文提出了地检平台数据处理软件快速Smear消除算法,根据Smear效应的原理,设计了适合星载光谱仪地面检测平台应用的Smear消除算法。

2 原 理

星载高光谱成像光谱仪的观测方式如图1所示,地面的太阳反射光由狭缝入射后,经光栅分光聚焦于探测焦面。面阵CCD探测器安装于焦面位置,沿CCD的行方向(光谱维)获取光谱分布信息,沿CCD列方向(地理维)获取地理分布信息。可以看出,卫星在轨飞行时成像光谱仪相当于使用多个线阵CCD在不同的谱线上同时对地推扫,推扫过程即可形成二维地理图像。

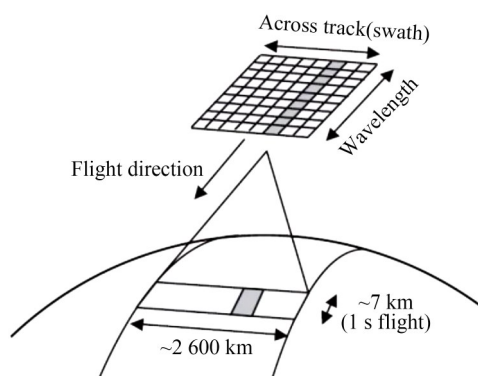


图1 光谱仪对地观测方式

Fig. 1 Earth observation method of spectrometer

帧转移是将成像区像元电荷搬运至存储区的过程,是整行转移,相对较快;图像读出是指图像逐像元从存储区输出到CCD输出端口的过程,相对较慢。虽然帧转移时间远小于整幅的读出时间,但帧转移过程同样存在短时间的曝光,

会叠加额外的积分时间。当像元电荷包垂直移动从成像区进入存储区时,相当于扫过曝光面,对整个焦面积分。在图像上呈现出沿CCD列方向贯穿整幅图像的Smear现象,在暗弱背景下更加明显。图2为一幅暗弱背景的天文图像。



图2 含有Smear效应的天文观测的星空图

Fig. 2 Astronomical sky image with Smear effect

地面检测系统的工作原理如图3所示,该系统主要由光源、帧转移CCD、成像电路和地检平台组成。其中,CCD和成像电路是成像光谱仪的组成部分。光源提供稳定的光照,帧转移CCD负责捕捉图像,图像信息通过成像电路传输到地检平台,最后通过地检软件进行图像接收、显示、存储和分析。

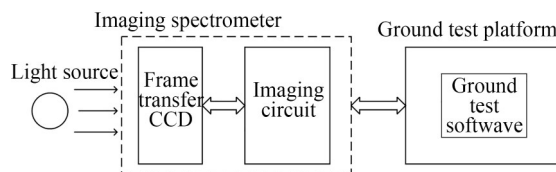


图3 地面检测系统的工作原理

Fig. 3 Working principle of ground test system

地面检测平台通常用于电子学调试和光学调试。调试的光源通常为稳定的平场、暗场、已知光谱的点光源、星点及鉴别率板等,相对于本文所述CCD275每秒16幅图像的帧频,可以认为是固定不变的。因此,地面检测平台主要是针对静态图像的Smear消除设计的。

3 Smear效应成因及消除原理

3.1 Smear效应产生的物理过程

Smear效应发生在帧转移CCD成像过程中。帧转移CCD分为上部分感光的成像区和下部分不感光的存储区,两者尺寸相同,这两个区域的像元一一对应。本文使用的CCD275结构如图4所示。

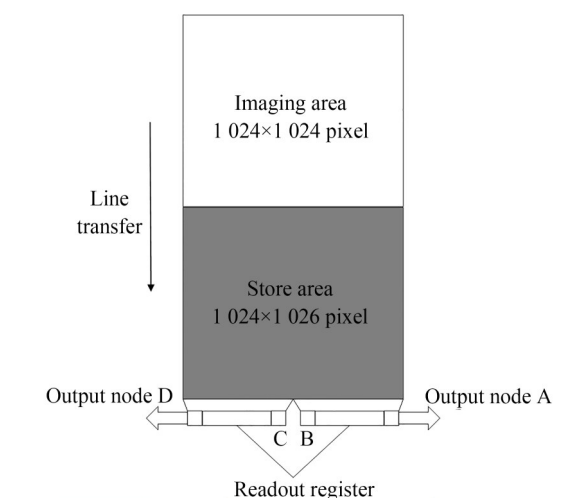


图4 CCD的结构

Fig. 4 Schematic diagram of CCD

帧转移CCD的工作原理一般分为曝光、转移和读出3个过程。曝光时成像区接收光信号,光子通过光电效应转换为电荷。曝光结束后,通过帧转移将曝光时间段积分的信号电荷沿垂直方向转移到存储区(1 024次行转移),原存储区内的电荷被清空。然后,成像电路将存储区的图像逐行读出,同时在成像区生成下一帧图像。由

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 1 & \cdots & 1 \\ 0 & \frac{1}{2} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{1,start} \\ F_{2,start} \\ \vdots \\ F_{n,start} \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \frac{1}{2} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{1,end} \\ F_{2,end} \\ \vdots \\ F_{n,end} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: F_i 表示该列第*i*行像元的在整个曝光周期的平均产生率,是单位时间积分获得的数值,与光强,该像元量子效率、电路增益,以及A/D转换成正比; $F_{i,start}$ 为起始曝光时刻的数值产生

于无光敏面的存储区的存在,图像读出和下一幅图像曝光同时进行。将曝光、转移和读出合并为两个时间段:帧转移时间,曝光/读出时间。

CCD275有4个读出端口,如图4中的A/B/C/D 4个读出端口,读出一行的时间为61 μ s,读出整幅的时间为62 ms。一幅图像的曝光结束和整幅读出之间是帧转移过程,CCD275垂直转移一行的时间是2 μ s,一个完整的帧转移时间为2 ms。根据CCD的结构可知,在帧转移的2 ms时间内,像元仍在持续曝光(积累电荷),只是不是针对固定目标而是扫过整个视场,因此,图像上会呈现前后亮线的现象。单幅图像的帧转移过程中,最下一行像元没有扫过整个曝光焦面,而最上一行(距离存储区最远)扫过了整个焦面。因为帧转移CCD是连续拍摄,前一个成像周期的帧转移过程中,最后一行的像元已经扫过了整个焦面对应的一列。也就是说,帧转移过程对同一列不同行的像元来说,都扫过了整个焦面上对应的列。因此,Smear效应显示出的垂直亮线的强度在整个一列上是一致的。这一点不同于CCD的彗尾效应,后者是饱和溢出的结果,只在亮点转移方向之后形成亮条,而且逐渐减弱。

3.2 基于矩阵形式的Smear算法

目前,在图像精细测量领域中,主要使用矩阵形式的算法消除Smear^[8]。这类算法将一幅二维CCD图像中的某一列用 $n \times 1$ 的矩阵表示, C_n 为这一列中第*n*行像元的数值。这个数值包括3个部分,曝光时间内积分的电荷信号,帧转移期间在上一帧保留的电荷信号和帧转移期间在当前帧图像产生的电荷信号。那么一列像元的表述如下:

率, $F_{i,end}$ 为结束曝光时刻的数值产生率; t 为行转移时间。可以看出,式(1)的后两项就是Smear成分。

为了简化运算,假设光条件在相邻成像帧

不变,即曝光起始和结束时信号数值的产生率相等,也即 $F_{\text{start}}=F_{\text{end}}=F_n$ 。因此式(1)可以简化为:

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T+t & t & \cdots & t \\ t & T+t & \cdots & t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t & t & \cdots & T+t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix}. \quad (2)$$

令 $C = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{pmatrix}$, $A = \begin{pmatrix} T+t & t & \cdots & t \\ t & T+t & \cdots & t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t & t & \cdots & T+t \end{pmatrix}$, $F = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix}$, 实际获取的信号为: $C = A \times F$ 。其

中,曝光时间 T 是已知的,行转移时间 t 是已知的,每个像元数值 C_n 也是已知的,所以只需要进行矩阵运算即可求得 F 矩阵,最后与 T 相乘即可得到消除 Smear 后的有效的像元数值矩阵。本文将这种基于矩阵运算的 Smear 处理方法称为矩阵算法。

计算机完成矩阵算法,对于一个 $1\,024 \times 1\,024$ 的面阵 CCD 图像,使用 C++ 语言编写算法程序,统计发现程序需要执行 $1\,048\,576$ 次乘法和 $2\,097\,152$ 次加法。

矩阵算法存在消耗机时过大的问题。检测台的操作系统为 Windows11,计算机配置为 i5-12400F,使用矩阵算法对 CCD275 产生的 $1\,K \times 1\,K$ (16-bit 精度) 图像做处理,平均耗时为 8 秒/幅。使用 Eigen 库函数进行计算耗时也是相同的。光谱仪的成像帧频是 16 幅/秒,显然矩阵形式的算法不能在检测台上实现消除 Smear,为此需要一个运行速度更快的 Smear 处理方案。

3.3 Smear 效应的代数形式描述及消除原理

本文使用更直接的代数形式去描述 CCD 成像过程。一个像元的电荷数量由两段积分时间相加得到:曝光时间+帧转移时间。一个 $m \times n$

的面阵 CCD (m 列, n 行) 对焦面成像时,相当于将焦面的图像离散为 $m \times n$ 个单元进行采样。设第 m 列第 n 行的像元的单位时间内入射光子数为 $P_{(m,n)}$,与该点光强成正比。该像元在曝光时间内积分的电荷数为:

$$Q_{(m,n)} = K \times P_{(m,n)} \times T_{\text{int}}, \quad (3)$$

式中: $Q_{(m,n)}$ 为第 m 列第 n 行像元曝光期间积累的电荷数, K 为像元的光子转化效率, T_{int} 为曝光时间。

曝光时间完成后,帧转移时间像元积累的电荷包向存储区转移,转移过程中仍然在积累电荷。这部分电荷可以表示为:

$$Q'_{(m,n)} = \frac{K \times \sum_{n=1}^N P_{(m,n)} \times T_{\text{trans}}}{N}, \quad (4)$$

式中: $Q'_{(m,n)}$ 为帧转移期间成像面第 m 列第 n 行像元积分的电荷, T_{trans} 为帧转移时间, N 表示 CCD 的列数。

Smear 效应是帧转移过程中额外的曝光时间形成沿列方向呈现的条线,可以认为每一列的 Smear 效应是相互独立的。这样仅分析其中一列的成像过程即可。由式(4)可以看出,一列中每个像元的 Smear 成分是一样的, $Q'_{(m,n)}$ 只与 m 有关,与参数 n 无关。也就是说,同一列中不同行的像元的 Smear 成分一样。因此,可以推出 CCD 不同列上(以第 m 列为例)各个像元的 Smear 成分可表示为:

$$Q'_{(m)} = \frac{K \times \sum_{n=1}^N P_{(m,n)} \times T_{\text{trans}}}{N}. \quad (5)$$

一幅原始图像中,每个像元的电荷数由其曝光时间内积分的电荷和帧转移过程中积分的电荷组成,即:

$$Q''_{(m,n)} = Q_{(m,n)} + Q'_{(m)}, \quad (6)$$

式中 $Q''_{(m,n)}$ 表示每个像元的总的电荷数。由式(3)和式(5)可以得到,每一列所有像元(第 m 列为例)的电荷总量为:

$$\begin{aligned} Q''_{\text{total}(m)} &= \sum_{n=1}^N Q''_{(m,n)} = \sum_{n=1}^N Q_{(m,n)} + N \times Q'_{(m)} = K \times \sum_{n=1}^N (P_{(m,n)} \times T_{\text{int}}) + K \times N \times \frac{\sum_{n=1}^N P_{(m,n)} \times T_{\text{trans}}}{N} = \\ &= K \times \sum_{n=1}^N P_{(m,n)} \times (T_{\text{int}} + T_{\text{trans}}) = T_{\text{trans}} \times K \times \sum_{n=1}^N P_{(m,n)} \times \left(\frac{T_{\text{int}}}{T_{\text{trans}}} + 1 \right) = N \times Q'_{(m)} \times \left(\frac{T_{\text{int}}}{T_{\text{trans}}} + 1 \right). \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可得:

$$Q'_{(m)} = \frac{Q''_{\text{total}(m)}}{N \times \left(\frac{T_{\text{int}}}{T_{\text{trans}}} + 1 \right)}. \quad (8)$$

那么,对于一幅图像,只要在其原始数据基础上,每列所在的像元都减去对应的 $Q'_{(m)}$ 即可得到消除 Smear 后的图像数据。这个推导的前提是拍照画面是静止的,因为每个像元进入存储区之前积累的 Smear 电荷实际上是来自当前帧和前一帧,根据该像元所在行不同,当前帧和前一帧对像元的 Smear 成分的贡献不一样。检测台是为地面研制工作服务的,在调试和测试阶段,通常使用已知光谱信息的固定点光源或平场光源调试设备,画面可以认为是静止的。

实际工程中,检测台获得的图像数据是数值形式,每个像元由一个 16 bit 的数值表示,是像元读出放大器把像元对应电荷转换为电压,再由成像电路的模数转换器转为数字,像元满阱电荷对应 16 bit 全“1”(65535)。成像电路将数字化的图像数据文件传输给卫星平台,在载荷研制阶段,文件传送给检测台。文件中像元的数值正比于像元电荷数。数值形式的像元信息用“C”表示, $C_{(m,n)}$ 表示第 m 列第 n 行像元曝光期间产生的数值, $C'_{(m,n)}$ 表示帧转移期间产生的数值, $C''_{(m,n)}$ 表示曝光期间和帧转移期间产生的总的数值。原始图像文件中的像元数值是 $C''_{(m,n)}$ 。

根据式(5),第 m 列各项元 Smear 成分的数值表示为:

$$C'_{(m)} = \frac{K_1 \times \sum_{n=1}^N P_{(m,n)} \times T_{\text{trans}}}{N}, \quad (9)$$

式中: K_1 表示光子转化为数值的比例, $C'_{(m)}$ 为第 m 列各个像元的 Smear 的数值成分。

根据式(7),每一列像元(第 m 列)的电荷总量对应的数值为:

$$C''_{\text{total}(m)} = N \times C'_{(m)} \times \left(\frac{T_{\text{int}}}{T_{\text{trans}}} + 1 \right). \quad (10)$$

由式(10)可以推导出:

$$C'_{(m)} = \frac{C''_{\text{total}(m)}}{N \times \left(\frac{T_{\text{int}}}{T_{\text{trans}}} + 1 \right)}. \quad (11)$$

光谱仪的原始图像数据由包头和图像数值序列构成。其中,包头包含温度、时间、轨道参数

和曝光时间等参数。图像数值序列是一幅图像像元(16-bit)数值序列。检测台在收到一幅图像后,从包头中获取曝光时间(T_{int}),根据式(11)即可由原始数据计算得到一幅图像中各列的 Smear 数值成分 $C'_{(m)}$ 。式中的其他参数 T_{trans} 为 2 ms; $C''_{\text{total}(m)}$ 是原始数据中 m 列所有像元的数值累加和,从图像数值序列获得; N 为 1 024。然后,整个图像文件每个像元原始值减去其所在列的 Smear 数值成分,得到:

$$C_{(m,n)} = C''_{(m,n)} - C'_{(m)}. \quad (12)$$

由此可得到消除 Smear 后的图像。这种通过代数形式推导出的 Smear 消除算法,本文称为代数算法。

4 软件设计及实验结果分析

4.1 代数算法的软件设计

在 Windows 开发环境下,本研究基于 C++ 语言编写了代数算法的 Smear 消除程序。为了便于观察调试,制作了一幅带有 5 个不同长度白色胶带的黑色纸板,并将光谱仪的光学部件替换为普通镜头,即可得到一架标准相机对纸板拍摄。原始图像如图 5(a)所示。因为镜头的视场小于 CCD 成像面,CCD 像面中间圆形区域为镜头形成的图像,外围是暗场。白色条带在沿 CCD 列方向形成了贯穿整幅图像的浅色条纹,模板上白色条带越长,浅色条纹亮度越高,这些浅色的条纹即 Smear 现象。

经过代数算法处理得到的图像如图 5(b)所示,可以看到 Smear 已经消除。将原始文件和消

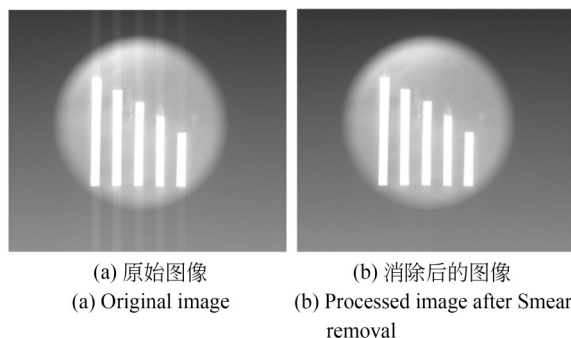


图 5 代数算法处理前后的图像

Fig. 5 Images processed without and with algebraic algorithm

除Smear的图像文件中第一行的数据导入Origin,结果如图6所示。

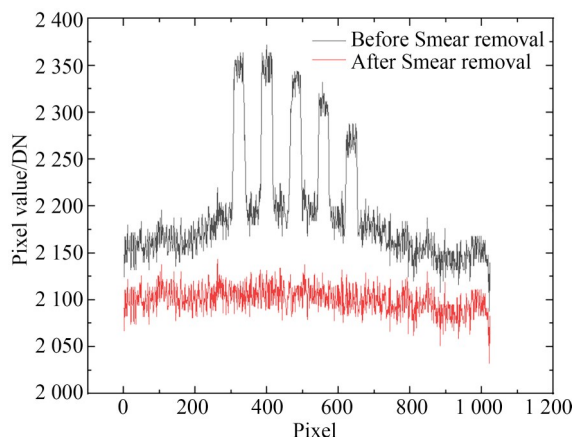


图6 Smear消除前后图像对比

Fig. 6 Comparison of pixel value before and after Smear removal

与CCD暗场图像对比,发现经过Smear消除,该行数值已符合同样曝光视场的暗场图像。

星载光谱仪的光学测试中,经常使用已知光谱信息的点光源或平场光源作为标准参考。图7是调试过程中使用氙灯点光源拍摄的图像。

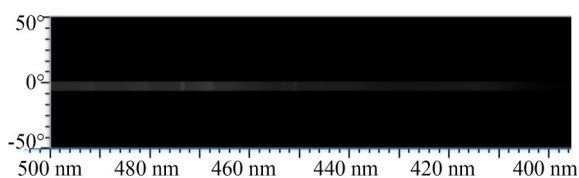


图7 氙灯光谱

Fig. 7 Spectrum of xenon lamp

该图像使用4-Bin格式输出(每4行叠加后输出),所以图像的沿列方向(垂直方向)比沿行方向(水平方向)短^[11]。沿列方向是地理维,对应 $-50^{\circ} \sim +50^{\circ}$ 的视场角;沿行方向是光谱维,对应395~500 nm的光谱。点光源宽度占据26像元,放置在物方视场中间,在中间部分形成光源经光栅分光后的光谱(图中亮条)。

每个像元都以16-bit的数值表示,图像以8位灰度图显示,图7所示的光谱图像为高8位显示。中间亮条以外的区域无入射光,应该为暗场,但根据Smear原理,暗场区域应该有Smear效应造成的光影,只是亮度不足以通过高8位显示。

此时,通过灰度放大,显示像元数值的低8位,可以显示暗弱光线。然而,灰度放大后,高亮度图像已经饱和,失去了灰度梯度,全部显示为白色,如图8所示。从图中能够看到Smear效应在亮点上下贯穿全幅图像的亮线和亮带,就是氙灯光谱沿CCD列方向形成的Smear图样。如果在不同的视场角放置多个光源,测量会引入Smear误差。而实际调试时,经常在视场两端放置光源。

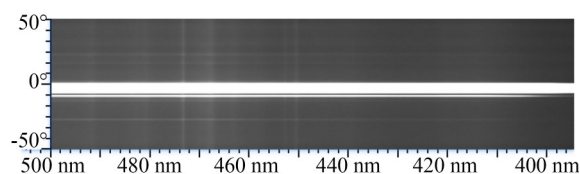


图8 消除Smear之前的光谱

Fig. 8 Spectrum before Smear removal

使用代数消除算法,根据式(12)消除Smear后得到的图像如图9所示。可以看到,图像暗场部分已经没有光条。进一步分析图像数值,取视场角 $+25^{\circ}$ 的一行数据,以16位像元值为纵坐标,横坐标仍为图像列数(对应光谱),如图10所示。

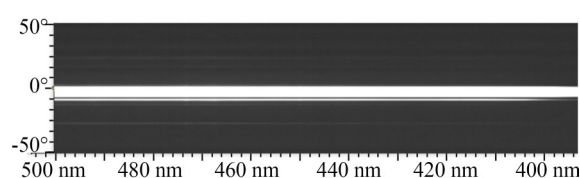


图9 消除Smear之后的光谱

Fig. 9 Spectrum after Smear removal

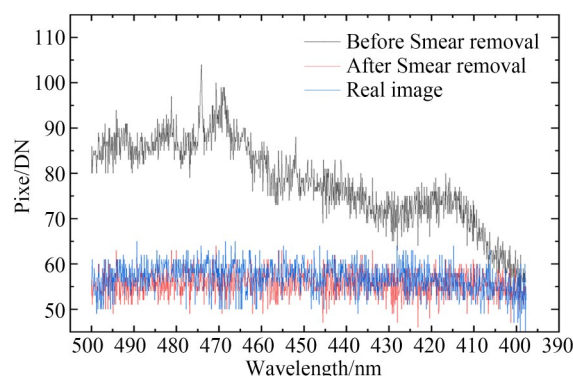


图10 Smear消除前后图像对比

Fig. 10 Comparison of pixel value before and after Smear removal

图中可见 Smear 消除的效果明显。同样,在不同视场角取消除 Smear 后的行数据发现,消除 Smear 的数据与真实暗场数据的差值与图像噪声和本底不均匀性大体相当。也就是说,代数算法消除 Smear 后的暗场与真实暗场一致。

4.2 与矩阵算法的对比

在完成代数算法的软件编写后,使用业内普遍使用的矩阵算法又编写了一个 Smear 处理程序。对同一图像文件进行处理,将使用两种算法处理后的图像逐像元相减,相减后的值都为 0。由此可知,代数算法和矩阵算法的结果完全一致,但是两者的效率不一样。

在计算机配置同样为处理器 Intel(R) Core (TM) i5-12400F,内存为 16 GB,操作系统为 Windows11 的情况下,统计两种算法的运行速度,矩阵算法耗时 8 s,代数算法耗时 16 ms,前者耗时是后者的 500 倍。在处理 $1\,024 \times 1\,024$ 的图像时,传统矩阵算法的时间复杂度为 $O(n^3)$,代数算法的时间复杂度则为 $O(n^2)$,代数算法更适合地面检测平台的应用环境。进一步分析发现,矩阵算法和代数算法对于每个像元的计算结果虽然一样,但计算过程不一样。矩阵算法访问图像存储区的次数是代数算法近 500 倍。

4.3 代数算法在地面检测台上的应用

成像光谱仪最短的曝光时间是 62.5 ms,为了压缩星地数据传输的数据量,采用 4 幅叠加的方式,将 4 幅图像逐点相加取平均发往地面。这样实际接收的图像是每秒 4 幅。因此,地面检测台要在 0.25 s 内完成图像的接收、解码、显示、存盘和一些简单的数据处理。矩阵算法耗时过长,代数算法的效果通过实验来获得,将 Smear 消除算法嵌入检测台程序,整体流程如图 11 所示。

当按下 Smear 消除按钮后进行 Smear 的消除,否则跳过 Smear 处理。代数形式进行 Smear 消除的耗时仅为 16 ms,理论上不影响检测台的实时运行。但是,实际效果还取决于代码效率,操作系统的资源分配等情况。

程序完成后,打开 Smear 消除功能,统计接收的帧数计数,计数值由 CCD 电路生成,检测台接收图像并显示后,检查其连续性。长期使用中没有发现丢帧现象。

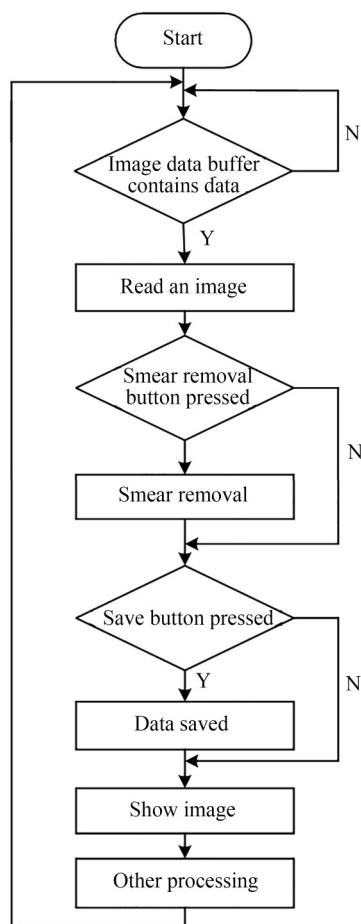


图 11 Smear 消除算法的整体流程

Fig. 11 Overall flowchart of Smear removal algorithm

实际卫星图像处理时,地面景物随着推扫过程变化,矩阵算法在处理动态图像时,需要加入帧间计算。以矩阵形式描述图像更方便与已有的图像算法库对接,完成滤波,预判等复杂帧间计算,而代数方法不能和现有其他图像处理软件对接^[12-14]。使用卫星遥感数据的业务部门通常对实时性要求不高,但对数据处理精度要求更高。在气象、环保领域,矩阵算法更为适合。代数算法是针对地面检测平台应用,为研制部门需求而设计的快速算法。在处理更复杂的图像处理,不能替代矩阵算法。

5 结 论

本文讨论了 CCD 的 Smear 形成过程,针对已有算法的不足,使用代数形式建立了 Smear 过程的模型,设计了基于代数描述的 Smear 消除算法

及程序,完成了实时在线消除Smear的检测台程序。实验结果表明,代数算法适合星载光谱仪的地面检测台使用,其运算速度远高于现有的矩阵算法,可以实时在线地消除图像Smear。代数形式的Smear消除算法在运行速度上满足光谱仪设备研制阶段的使用需求。

在处理更高精度的图像时,需要考虑CCD的像元响应非一致性。因为星载光谱仪作为测量设备而非图像设备,使用的是高精度的科学级CCD,其像元响应非一致性(PRNU)很低,通常小于1%。出厂检测报告显示,CCD275像元响应标准差为0.57%。在代数算法的推导过程中,式(3)使用统一的 K 值代替存在PRNU的 $K_{(m,n)}$,由此引入的误差也约等于0.57%,满足研制过程的使用要求。矩阵算法只要将CCD的像元响应参数做成一个 $1\text{ K}\times 1\text{ K}$ 的矩阵,即可方便地代入现有的矩阵算法,完成Smear成分地PRNU校正。使用代数算法就要对不同行使用不同参数,数学表述上不如矩阵算法直观清晰,但是代数方法具有速度的优势,因为代数算法是每一列像元统一计算出一个Smear分量,而矩阵算法是每个像元都重复一遍Smear分量的计算。

代数算法是为了解决地面检测平台实时消

除Smear的速度问题,但这个新的算法适用于其他需要高速消除Smear的场合。目前的软件是针对CCD275研制的,但该算法也适用于其他帧转移CCD器件。未来将进一步拓展该算法的通用性,计划在当前软件的基础上将算法写成链接库的函数形式,兼容不同CCD器件。因为不同的CCD器件的图像行列数不同,曝光时间和帧转移时间的调节范围也不同。函数的接口参数中,将增加行数、列数、曝光时间和帧转移时间作为输入参数。这样用户的应用软件就可以根据不同CCD和不同使用条件方便的调取这个快速Smear消除函数。

作者贡献说明:

冯熠斌:算法研究,工程实施,论文构思和撰写;

王煜:算法指导和工程实施,研究过程监督,论文审阅与修改;

刘国华:实验结果优化;

林方:实验数据支持;

张泉:实验数据分析;

胡成睿:数据整理和分析;

张晓莉:研究方法指导。

参考文献:

- [1] NIMO Back Illuminated High Performance CCD Sensor [Z]. Datasheet.
- [2] 王煜,陆亦怀,周海金,等. 星载高动态范围差分吸收成像光谱仪成像电路设计及实现[J]. 光学精密工程, 2024, 32(13): 2017-2028.
WANG Y, LU Y H, ZHOU H J, *et al.* Design and implementation of imaging circuit for satellite-borne high dynamic range differential optical absorption spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(13): 2017-2028. (in Chinese)
- [3] 林方,刘文清,王煜,等. CCD满阱自动化检测系统及其在相机研制中的应用[J]. 光子学报, 2023, 52(11): 199-210.
LIN F, LIU W Q, WANG Y, *et al.* Automatic CCD full-well test system and its application in camera development[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(11): 199-210. (in Chinese)
- [4] POWELL K, CHANA D, FISH D, *et al.* Restoration and frequency analysis of smeared CCD images [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(8): 1343-1347.
- [5] 李扬,骆冬根,孙亮,等. 帧转移型面阵CCD相机拖尾评价标准和校正方法[J]. 光子学报, 2022, 51(4): 143-157.
LI Y, LUO D G, SUN L, *et al.* Evaluation criteria and correction method of frame transfer CCD camera smearing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(4): 143-157. (in Chinese)
- [6] 刘璐,罗通顶,李斌康,等. 异步Binning高帧频CCD相机的拖尾校正[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 217-223.
LIU L, LUO T D, LI B K, *et al.* Smear correction of asynchronous binning high frame rate CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 217-223. (in Chinese)
- [7] 陈铁桥,胡炳樑,刘学斌,等. 环境减灾二号A/B卫星高光谱成像仪CCD的Smear效应快速校正方法[J]. 航天器工程, 2022, 31(3): 71-76.
CHEN T Q, HU B L, LIU X B, *et al.* Fast smear

- correction method for CCD of hyperspectral imager on HJ-2A/B satellites[J]. *Spacecraft Engineering*, 2022, 31(3): 71-76. (in Chinese)
- [8] 张泉. 大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱图像数据校正方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- ZHANG Q. *Study on Data Correction of Environmental Trace Gas Monitoring Instrument*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [9] 孙瑾秋, 周军, 朱宇, 等. 天文观测 CCD 相机中 Smear 效应的消除[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(10): 2526-2532.
- SUN J Q, ZHOU J, ZHU Y, *et al.* Smear removal of CCD camera in astronomic observation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2526-2532. (in Chinese)
- [10] HAN Y, CHOI E, KANG M. Smear removal algorithm using the optical black region for CCD imaging sensors[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(4): 2287-2293.
- [11] 王煜, 陆亦怀, 赵欣, 等. 星载差分吸收光谱仪 CCD 成像电路的设计及实施[J]. *激光与红外*, 2015, 45(6): 663-668.
- WANG Y, LU Y H, ZHAO X, *et al.* Design and implementation of CCD imaging circuit for satellite-borne DOAS spectrometer[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(6): 663-668. (in Chinese)
- [12] 李恺文. 光学相干断层成像系统软件与图像处理新技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- LI K W. *Research on New Technologies of Optical Coherence Tomography System Software and Image Processing*[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024. (in Chinese)
- [13] 朱辉. 高光谱数据处理软件的开发[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- ZHU H. *Research and Development of Hyperspectral data Processing Software* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023. (in Chinese)
- [14] 张浩. 基于图像处理的钢丝绳缺陷识别方法研究及软件开发[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- ZHANG H. *Research and Software Development of Wire Rope Defect Recognition Method Based on Image Processing* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2022. (in Chinese)

作者简介:



冯熠斌(2001—),男,江西抚州人,硕士研究生,2022年于江西农业大学获得学士学位,主要从事温室气体卫星 CCD 图像处理及其星载成像设备地面检测系统上的应用。E-mail: 1976312909@qq.com

通讯作者:



王煜(1971—),男,北京人,博士,研究员,1993年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2005年于英国斯特莱斯科莱德大学获得博士学位,中科院“百人计划”成员,主要从事航空、航天遥感设备的电子系统研发工作。E-mail: yuwang@aiofm.ac.cn