21050000158006 25 闫钧华. fbd
第 42 卷 第 5 期 仪 器 仪 表 学 报 Vol. 42 No. 5
2021 年 5 月 Chinese Journal of Scientific Instrument May 2021

DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2107446

复杂场景机械交错拼接遥感相机在轨相对定标*

闫钧华[1,2],倪 越[1,2],姜 宇[3],范君杰[1,2],张 寅[1,2]

(1. 南京航空航天大学空间光电探测与感知工业和信息化部重点实验室 南京 211106;
2. 南京航空航天大学航天学院 南京 211106; 3. 中国空间技术研究院遥感卫星总体部 北京 100094)

摘 要:为了实现机械交错拼接型(TDICCD)遥感相机高频次、高精度相对辐射定标,本文提出一种面向复杂场景的在轨非均匀性校正方法。该方法在相机绕偏航轴旋转前后进行正交二次成像,利用所获取的偏航成像数据、常规成像数据分别对阵列内、阵列间探元进行相对定标;结合复杂场景宽辐射动态范围的特点,利用多点曲线拟合的方法实现相对定标参数解算,最终达到非均匀性校正的目的。利用仿真成像数据对均匀场景以及复杂场景进行相对辐射定标试验,结果表明,在非均匀场景中经复杂场景正交二次成像定标(OSICCS)后图像非均匀性 NU 系数相较于常用方法定标后图像非均匀性 NU 系数降低了 0. 499 1% 以上,条纹条带噪声以及残余条带噪声得到有效去除。

关键词: 交错拼接型相机;复杂场景;正交二次成像定标;在轨非均匀性校正

中图分类号: TH744 TP751. 1 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 420. 2040

On-orbit relative calibration of mechanical interlaced stitching cameras in complex scenes

Yan Junhua[1,2], Ni Yue[1,2], Jiang Yu[3], Fan Junjie[1,2], Zhang Yin[1,2]

(*1. Key Laboratory of Space Photoelectric Detection and Perception, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 3. General Department of Remote Sensing Satellites, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*)

Abstract: Proposes an on-orbit non-uniformity correction method for complex scenes, in order to achieve high-frequency and high-precision relative radiation calibration for mechanically interleaved stitching time delay integration charge coupled device (TDICCD) cameras on orbit. This method performs orthogonal secondary imaging before and after the camera rotates around the yaw axis, and uses the side slither imaging data and conventional imaging data to respectively calibrate the probe elements within and between arrays. Combining the characteristics of the wide radiation dynamic range of complex scenes, the method of multi-point curve fitting is used to calculate relative calibration parameters and finally achieve the purpose of non-uniformity correction. By using simulation imaging data to perform relative radiometric calibration experiments on uniform scenes and complex scenes, these results show that the image non-uniformity NU coefficient which is processed by the orthogonal secondary imaging calibration of the complex scene (OSICCS) in the non-uniform scene is 0. 499 1% lower than that after the common calibration method, meanwhile, the noticeable striping artifact and residual noise are removed effectively.

Keywords: mechanical interlaced stitching cameras; complex scenes; orthogonal secondary imaging calibration; on-orbit non-uniformity correction

收稿日期:2021-01-27 Received Date: 2021-01-27

*基金项目:中央高校基本科研业务费(NJ2020021)、中央高校基本科研业务费(NT2020022)、国家自然科学基金(61705104)、江苏省自然科学基金(BK20170804)资助

0 引 言

遥感卫星发射过程振动、空间环境变化等造成光学相机在轨工作的响应性能发生明显改变。因此,通过地面定标试验获取的定标参数已无法满足高精度在轨相对定标需求,一般需要定期开展在轨定标试验[1]。常用的在轨相对定标方法包括星上标准源定标[2-5]、统计定标[6-8]和场地定标[9-11]。场地定标中,对于具有一定姿态机动能力的推扫式光学遥感卫星,可以将相机线阵绕卫星偏航轴旋转90°对地成像,使得阵列内探元依次经过地面相同地物,以此标定各探元响应模型,此方法也称为偏航定标法(Side-Slither),在 Quickbird-2[9]、Landsat-8 OLI[12]、RapidEye4[13]、Pleiades-HR[14]、YG-9、YG-25 等卫星上已得到有效应用。上述卫星在偏航定标法在轨实际应用中,为了保证相机所有探元在偏航定标成像时推扫过地面相同的地物,会选取沙漠[9,12-13]、冰川[12-13,15]和海洋[16]等均匀性较高区域作为定标场景进行偏航定标,对开展在轨偏航试验的时空要求较高。

目前针对交错拼接型遥感相机在轨相对辐射定标主流的方法是均匀场偏航辐射定标。由于基于均匀场景的偏航辐射定标所选取的定标场景辐射单一化,利用该定标法只能保证一定辐亮度范围内相机非均匀性得到有效校正,无法实现宽动态范围内的在轨相对定标[17-18]。该方法依赖大面积地面均匀场作为定标场景,定标频次较低,不能实现相机在轨高频次定标。

本文为实现机械交错拼接型(time delay integration charge coupled device,TDICCD)遥感相机在轨高频次、高精度的相对辐射定标,提出一种面向复杂场景的在轨相对定标方法。复杂场景使得遥感相机相对辐射定标不依赖于地面均匀场,为在轨高频次定标奠定基础;同时结合复杂场景内辐射动态范围较大的特点,通过多点曲线拟合求解相对定标参数,实现相机宽动态范围高精度相对定标;利用相机绕偏航轴旋转前后进行正交二次成像,分别对片内、片间探元进行非均匀性校正。

1 交错拼接型 TDICCD

为了增大相机视场,以 WorldView 3 为代表的高分辨率遥感相机采用多片 TDICCD 交错拼接的形式,即第 2 行 TDICCD 阵列在图像积分方向(卫星飞行方向)上正好填充第 1 行 TDICCD 阵列间所形成的间隔。对比棱镜透反式光学拼接,它的优点是不会引入色差,结构简单可靠。图 1 为某高分辨光学遥感卫星相机焦平面示意图,由 22 片 TDICCD 阵列机械交错拼接而成。该 TDICCD 阵列为四谱合一器件,具备 4 个光谱谱段,分别是红色波段(B1)、绿色波段(B2)、蓝色波段(B3)以及全色波段(PAN)。交错相邻的两片 TDICCD 阵列首尾重叠像元满足拼接要求,拼接探元数为整数,使之在推扫成像时等效为一条长 TDICCD 阵列。

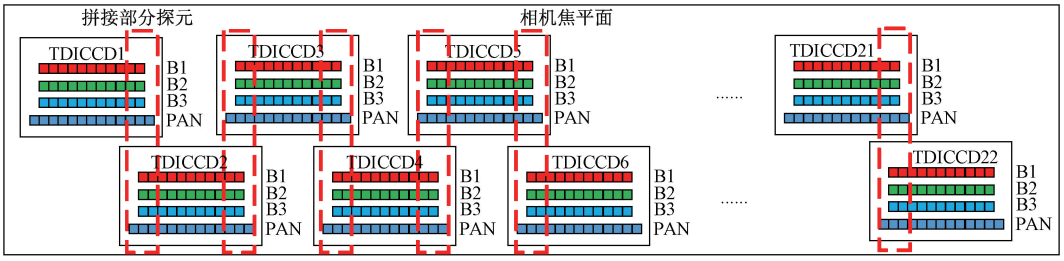


图 1 机械交错拼接型 TDICCD

Fig. 1 The mechanical interlaced splicing TDICCD

2 复杂场景正交二次成像校正方法

2.1 交错拼接相机偏航成像原理

偏航成像要求相机绕偏航轴旋转90°,使得焦平面上探元的排列方向与卫星轨道推扫方向平行,理论上同一阵列内的探元对相同的地面区域进行成像。如图 2 所示为交错拼接型相机偏航成像示意图。图 2(a)为机械交错拼接型相机进行常规推扫和偏航定标时的物方成像过程。图 2(b)为常规推扫成像,多条阵列通过拼接覆盖宽幅场景。图 2(c)为偏航成像,第 1 行阵列上的每个探元依次对地物区域 FGHIJ 成像,第 2 行阵列上每个探元依次对地物区域 ABCDE 成像,同条阵列的探元依次扫过完全相同的地物区域,同一地物区域在偏航定标图像中与沿轨方向的夹角为 45°。

2.2 复杂场景宽动态正交二次成像校正方法

传统偏航定标方法使用均匀地物作为标准辐射源,无法实现相机宽动态范围内的相对定标,同时,由于焦平面阵列机械交错的特殊排布,定标后阵列间存在残留条带噪声。本文提出一种面向复杂场景正交二次成像校

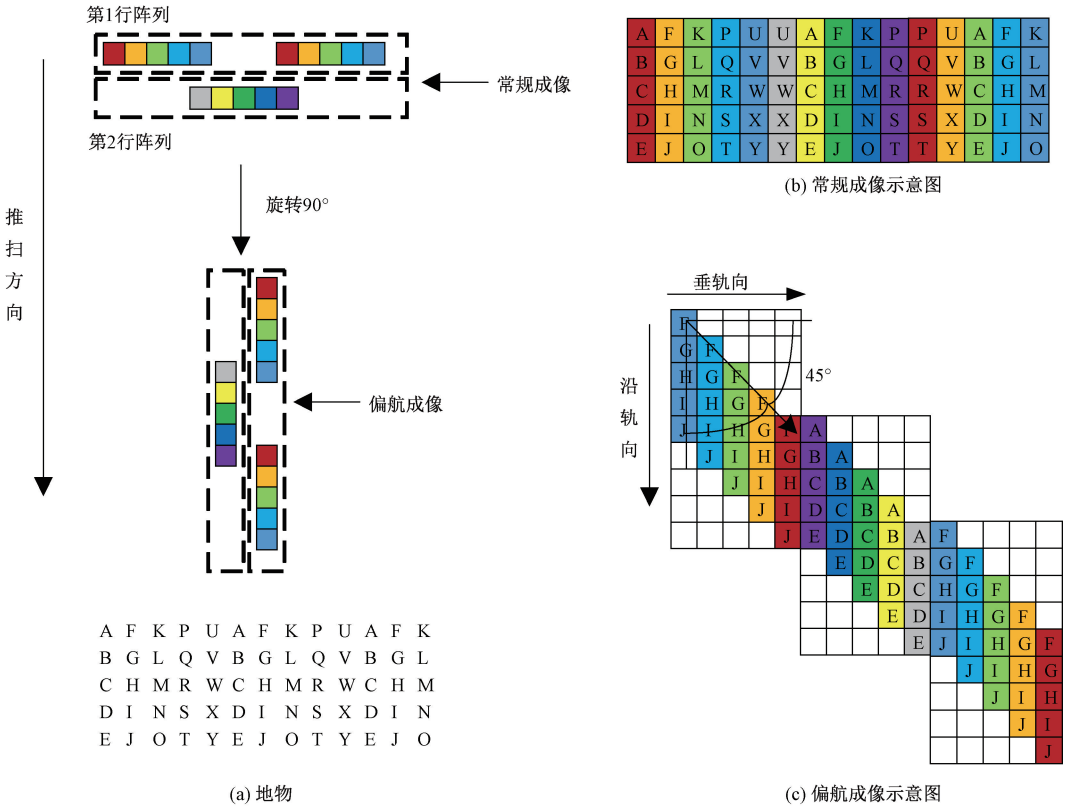


图 2 交错拼接相机成像示意图

Fig. 2 The schematic diagram of mechanical staggered stitching camera imaging

正(orthogonal secondary imaging calibration for complex scenes,OSICCS)的方法:利用复杂场景辐射动态范围较宽的特点,通过多点拟合对探元相对定标系数进行求解;利用相机绕偏航轴旋转前后进行的正交二次成像,实现拼接阵列间的非均匀性校正。

1)复杂场景宽动态多点校正拟合法

相对定标主要用于去除相机探元间响应差异引起的误差,使定标后的探元具有成像一致性。基本校正公式如下:

$$DN' = \sum_{i=0}^{n} A_i \cdot DN^i \tag{1}$$

式中,DN(digital number)为探元实际响应值;DN' 为经过校正后的探元响应值,一般利用多个像元对同一地物的响应均值估计;A_i 为待求的相对辐射定标参数;n 为拟合多项式次数,一般取 1 或 2。

基于地面均匀场景偏航定标对于线性度好的探元校正结果较好,而当探元线性度较差时,该方案不能实现探元的宽辐射动态范围的高精度定标。如图 3 所示,传统偏航定标法选取场景内辐射亮度位于探元辐射动态范围两端处的均匀场景 A、B,通过两点法解直线方程获取探元定标参数。对于线性度较差的探元,当目标辐亮度与定标点辐亮度相差过大时,校正效果难以保证。本文选取复杂场景作为定标对象,同一阵列内所有探元对 A、D、E、C 等不同地物依次成像,利用复杂地物辐射动态范围大、辐射数值覆盖广的特点,通过多点拟合逼近理想校正曲线。不仅可以实现探元宽动态范围内高精度相对定标,同时降低了定标数据获取难度。

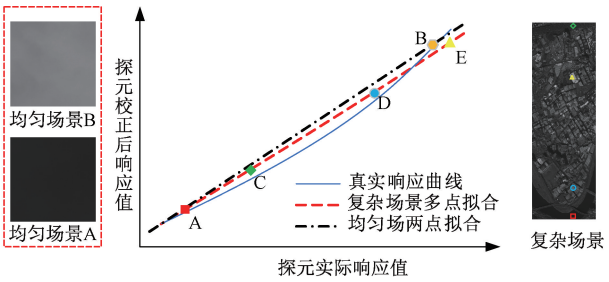


图 3 多点校正原理

Fig. 3 The multi-point correction principle

2)机械交错拼接相机正交二次成像校正

交错拼接型相机进行复杂场景偏航模式成像时,不同阵列扫过的地物不一致,一次复杂场景的偏航定标只能将阵列内探元的非均匀性进行校正,阵列与阵列之间的非均匀性难以有效校正。所以需要将一次复杂场景偏航定标的求解参数应用到常规成像模式数据中,进行阵

列内探元的非均匀性校正,再利用常规成像模式下相邻阵列间重叠部分探元的成像数据求解出相邻阵列整体的校正系数,来校正阵列之间的非均匀性。如图 4 所示,此时可以将偏航定标的求解参数应用到与之正交的常规成像模式成像数据中,通过多点拟合计算拼接部分探元(矩形框区域)二次校正系数 B_i:

$$DN''_p = \sum_{i=0}^{n} B_i \cdot (DN'_p)^i \tag{2}$$

式中:下标 p 表示相邻阵列拼接探元,DN'_p 和 DN''_p 为拼接探元对同一地物的片内校正后响应值和片间校正后响应值。相邻阵列间整体校正系数为 B_i 的平均值:

$$C_i = \overline{B_i} \tag{3}$$

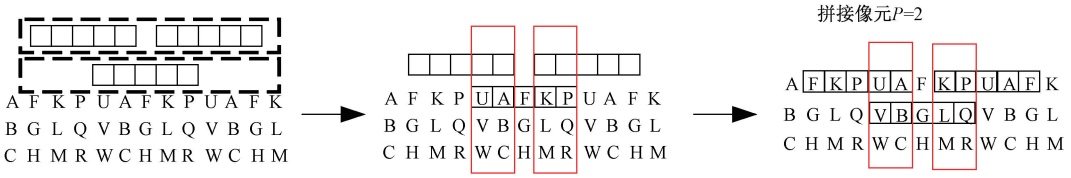


图 4 阵列间校正示意图

Fig. 4 The schematic diagram of calibration between arrays

2.3 复杂场景宽动态正交二次成像校正步骤

OSICCS 法的具体实现步骤如图 5 所示,具体步骤为:

1)获取面向复杂场景的偏航成像数据后,依次对单片阵列偏航成像数据进行规定化[19]。如图 6 所示,规定化后单片阵列偏航图像的每一行为不同探元对同一地物的成像数据,每一列为同一探元对不同地物的成像数据。

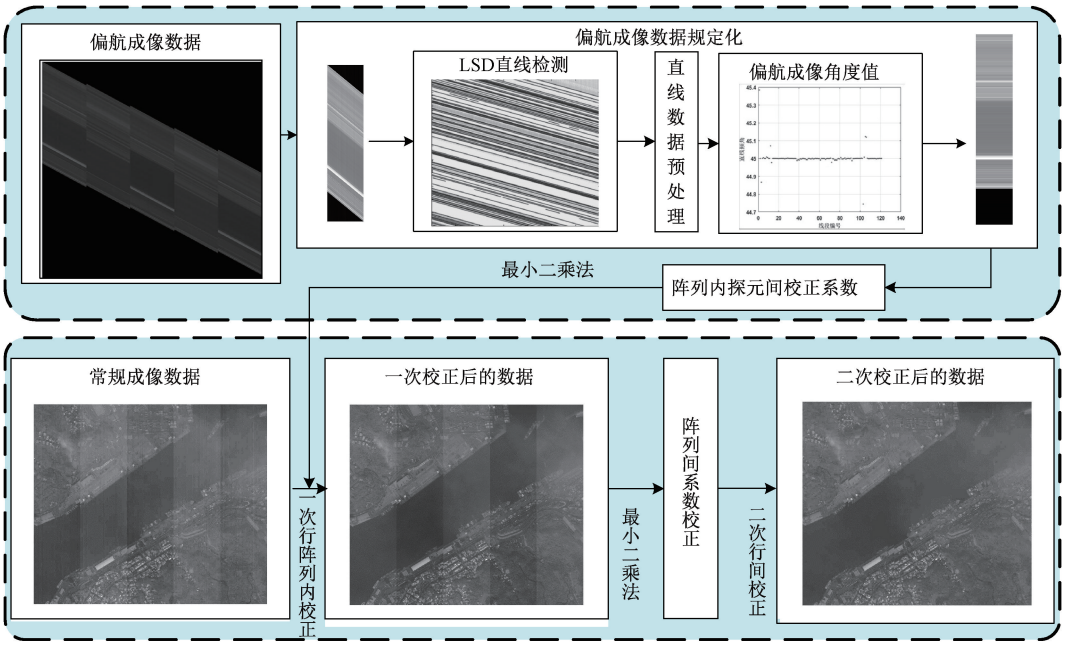


图 5 OSICCS 法实现步骤流程

Fig. 5 The flow of the implementation steps of OSICCS method

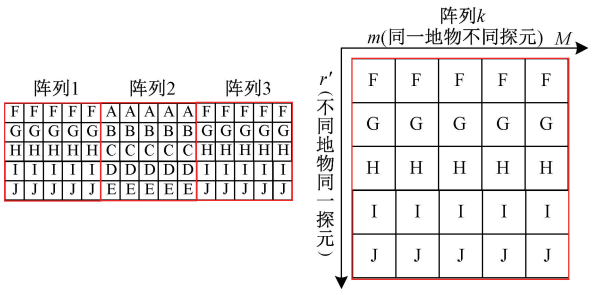


图 6 规定化后偏航成像示意图

Fig. 6 The schematic diagram of yaw imaging after regulation

2)利用规定化后的偏航成像数据,对阵列内的探元用最小二乘法[20]进行校正系数求解:

$$DN'_{(k,r')} = \sum_{i=0}^{1} DN^i_{(k,m,r')} A_{i(k,m)} \tag{4}$$

式中:k 为阵列的编号;m 为阵列内的探元编号;r' 为规定化后图像行编号;$DN^i_{(k,m,r')}$ 为阵列内第 m 个探元第 r' 行像元的响应灰度;$A_{i(k,m)}$ 为校正系数;$DN'_{(k,r')}$ 为阵列内不同探元对同一地物的校正后一致响应,可以通过下式进行估计:

$$DN'_{(k,r')} = \sum_{m=0}^{M} DN_{(k,m,r')}/M \tag{5}$$

式中:M 为阵列内探元总数。

3)将偏航定标校正系数应用到常规成像中,以前一阵列校正后响应为基准,对相邻拼接探元用最小二乘法进行校正系数求解:

$$DN''_{(k,n,r)} = \sum_{i=0}^{1} DN'i_{(k+1,n,r)} B_{i(k+1,n)} \tag{6}$$

式中:k、$k+1$ 为相邻阵列编号;n 为阵列间拼接探元编号;r 为常规成像图像行编号,如图 7 所示。$DN'_{(k+1,n,r)}$ 和 $DN''_{(k,n,r)}$ 分别为拼接探元片内校正后响应灰度和片间校正后响应灰度,$B_{i(k+1,n)}$ 为校正系数。

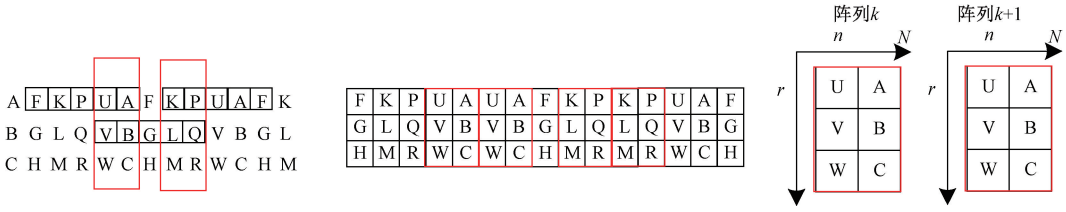


图 7 常规成像示意图

Fig. 7 The schematic diagram of conventional imaging

4)通过拼接探元响应值之间的校正系数 B_i,取平均后得到相邻两片阵列间整体校正系数 C_i,如下所示:

$$C_{i(k+1)} = \sum_{n=1}^{N} B_{i(k+1,n)}/N \tag{7}$$

式中:N 为拼接部分探元的个数,$C_{i(k+1)}$ 为编号 k 与 $k+1$ 阵列之间的校正系数。

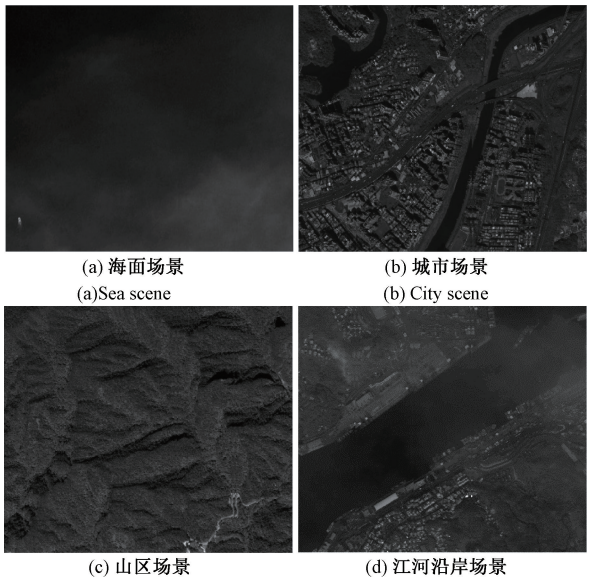
5)将偏航定标所得的阵列内探元校正系数 A_i 以及常规成像下所得到的阵列间校正系数 C_i 应用到常规成像数据中,获得最终非均匀性校正后的图像数据:

$$DN'''_{(k,m,r)} = \sum_{i=0}^{1} DN^{i}_{(k,m,r)} A_{i(k,m)} C_{i(k)} \tag{8}$$

3 实验结果与分析

3.1 实验样本

从 WorldView 3 高分辨率全色遥感图像中选取典型地物场景进行成像数据仿真,场景类型包括海面、城市、山地和江河沿岸,如图 8 所示。



(a) 海面场景 (a)Sea scene
(b) 城市场景 (b) City scene
(c) 山区场景 (c) Mountain scene
(d) 江河沿岸场景 (d) River bank scene

图 8 典型地物场景

Fig. 8 The typical feature scene

实验中为了节约计算成本,设相机焦平面阵列数为 5,单个阵列内探元数为 700,相邻阵列拼接部分探元数为 50。根据交错拼接型相机成像原理,进行成像仿真。交错拼接型相机的噪声主要由阵列间噪声、阵列内条带噪声以及随机噪声组成:

$$DN_{(k,m,r)} = [(L_{(k,m,r)} a_k + b_k) a'_{(k,m)} + b'_{(k,m)}] + c''_{(k,m,r)} \tag{9}$$

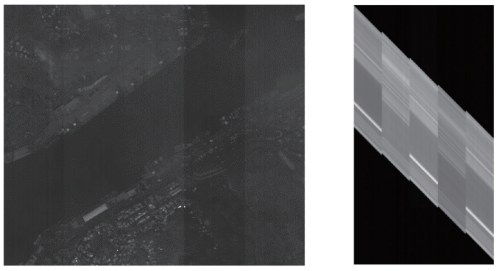
式中:$DN_{(k,m,r)}$ 为仿真图像灰度;$L_{(k,m,r)}$ 为场景灰度;a_k、b_k 分别为阵列间响应的乘性噪声和加性噪声;$a'_{(k,m)}$、$b'_{(k,m)}$ 分别为阵列内探元响应的乘性噪声和加性噪声;$c''_{(k,m,r)}$ 为整幅图像的随机噪声。a_k 设置为均值为 1,方差为 0.01 的高斯分布,b_k 设置为均值为 0,方差为 1 的高斯分布;$a'_{(k,m)}$ 设置为均值为 1,方差为 0.03 的高斯分布,$b'_{(k,m)}$ 设置为均值为 0,方差为 2 的高斯分布;$c''_{(k,m,r)}$ 设置为均值为 0,方差为 0.5 的高斯分布[21]。如图 9 所示,图 9(a)和(b)分别为江河沿岸场景常规成像和偏航成像仿真图像。

3.2 评价指标

针对复杂场景,采用改进后的图像非均匀性 NU (non-uniformity)作为评价指标:

$$NU = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{DN'''_{(i,j)} - L_{(i,j)}}{L_{(i,j)}}\right)^2}{M \times N}} \times 100 \tag{10}$$

式中:$DN'''_{(i,j)}$ 为校正后图像第 i 行第 j 列像元的灰度值;



(a) 常规成像仿真数据
(a) Conventional imaging simulation data

(b) 偏航成像仿真数据
(b) Yaw imaging simulation data

图 9 相机绕偏航轴旋转前后的正交成像仿真

Fig. 9 The orthogonal imaging simulation before and after the camera rotates around the yaw axis

$L_{(i,j)}$ 为原始地物图像第 i 行第 j 列像元的灰度值;M 为成像的行数;N 为成像列数。

3.3 定标效果对比实验与分析

本文的实验主要分为两个部分:第 1 部分为定标效果实验,通过主观视觉对校正过后的图像进行对比评价;第 2 部分为方法性能对比实验,通过利用定量化的评价指标对本文所提算法与常用定标算法进行性能对比与分析。

1)定标效果实验

选取不同场景进行 OSICCS 法校正系数的求解,对经 Side-Slither 法和 OSICCS 法校正后的图像进行主观视觉评价。如表 1 所示,将场景图像中的矩形中的部分进行了局部放大,如每幅图像下面的小条图像所示。

发现经两种方法校正后的图像阵列内非均匀性得到了良好的校正,阵列内条纹条带噪声得到了较好的去除。但是经过传统偏航定标法校正过后的非均匀场景图像还存在明显阵列间的噪声,而经过 OSICCS 法校正过后的图像阵列间的噪声也得到了较好的去除。

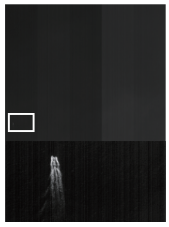
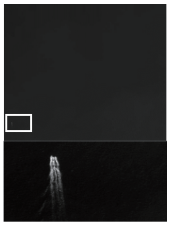
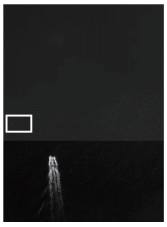
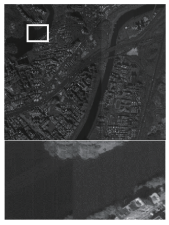
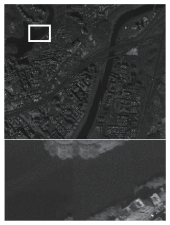
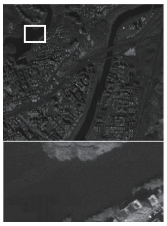
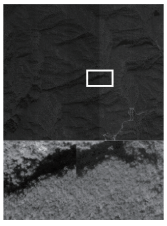
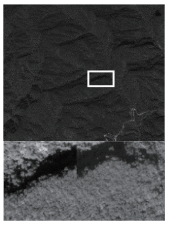
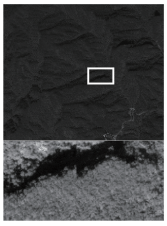
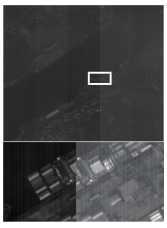
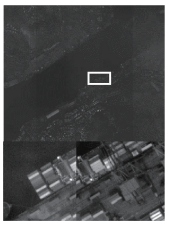
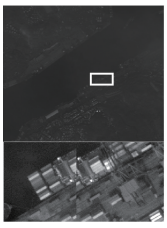
从定量指标分析校正效果,当探元扫过均匀场景时,各个探元的成像的理论值趋于一致,不会有较大波动。通过分析均匀场景校正前后影像列均值的分布情况来检验本文所提算法的非均匀性校正效果。如图 10 所示,选取海面均匀场景,在应用定标系数后整体列均值的变化符合实际海面变化规律,阵列内与阵列间探元响应不一致性得到了较好的校正。

2)性能对比实验

通过设置非均匀性噪声模型参数,仿真得到多组带有相同强度的随机高斯噪声模型场景图像,将本文所提出的 OSICCS 法与时域高通法(temporal high-pass filter nonuniformity correction based on bilateral filter, BFTH-NUC)、神经网络法(nearal-network non-uniformity correction, NN-NUC)以及传统的偏航定标法进行性能对比实验与分析。如图 11 所示,经过不同校正方法校正

表 1 不同方法非均匀性校正效果比较

Table 1 The comparison of non-uniformity correction effects of different methods

场景	校正前	偏航定标	本文方法
海面			
城市			
山区			
江河沿岸			

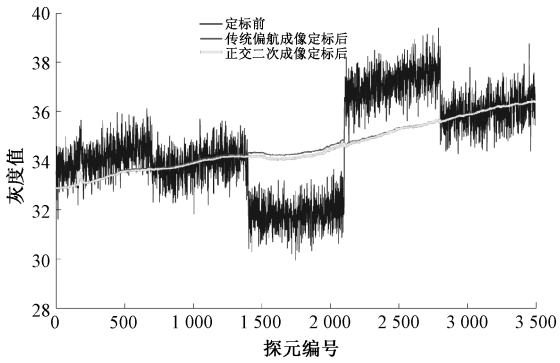


图 10 定标系数应用前后海面场景列均值分布情况

Fig. 10 The column mean comparison with the origin image and corrected image

后的图像非均匀性 NU 系数相比于校正前的图像非均匀性 NU 系数都有了明显的降低。同时可以发现本文所提

算法在非均匀场景中校正效果均优于其余 3 种方法,在均匀场景海面中,本文所提方法校正后的非均匀性 NU 系数与传统偏航定标方法校正后的非均匀性 NU 系数相近,但仍优于时域高通法和神经网络法。与此同时,在非均匀场景校正的实验中,发现实验编号为 2、3、9、11、15 的 5 次实验中,经传统偏航成像法校正后的图像非均匀性 NU 系数与 OSICCS 法校正后的图像非均匀性 NU 系数差距较大,原因是传统偏航成像法所得到的校正系数陷入了局部最优解,对于辐射动态范围大的场景校正效果不好。因此本文所提 OSICCS 法在非均匀场景的校正效果优于时域高通法、神经网络法以及传统偏航定标法。

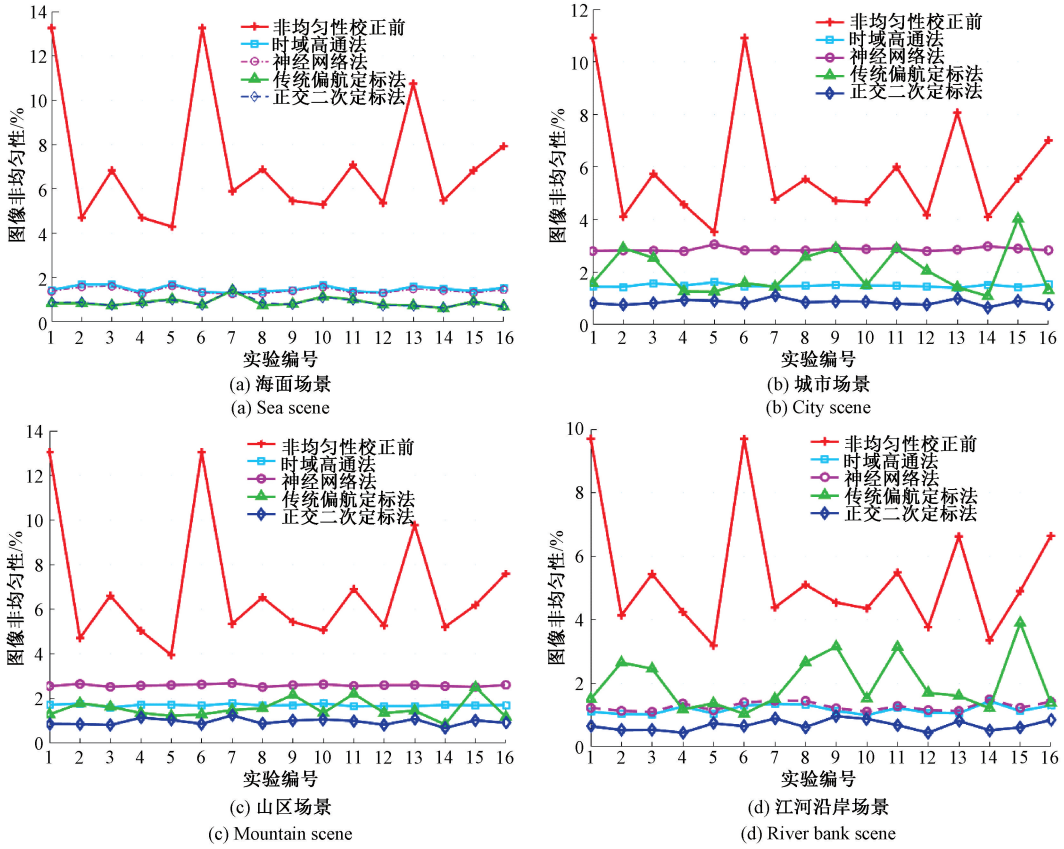


图 11 校正前后非均匀性系数

Fig. 11 The non-uniformity coefficient before and after correction

表 2 分别为校正前和经过时域高通法、神经网络法、传统偏航定标以及本文方法校正后的图像的非均匀性 NU 系数。

表 2 定量指标评价

Table 2 The quantitative index evaluation %

场景	平均图像非均性系数				
	校正前	时域高通	神经网络	偏航定标	本文方法
海面	7.155 2	1.478 8	1.404 9	**0.892 8**	0.898 4
城市	5.894 4	1.483 4	2.861 6	2.019 9	**0.850 4**
山区	6.860 3	1.706 3	2.593 1	1.545 0	**0.957 9**
江河沿岸	5.349 9	1.177 7	1.271 4	2.001 7	**0.678 6**

在均匀场景的实验中,经 OSICCS 法校正后的图像非均匀性 NU 系数均低于经时域高通法和神经网络法校正后的图像非均匀性 NU 系数,与传统的偏航定标效果接近;在非均匀场景中,经 OSICCS 法校正后图像非均匀性 NU 系数相较于其余 3 种方法校正后的图像非均匀性 NU 系数降低了 0.499 1% 以上,能够在宽动态辐射范围内实现对阵列内探元非均匀性和阵列之间非均匀性校正,较好地去除了阵列内、阵列间存在的条纹条带噪声。

4 结 论

针对机械交错拼接 TDICCD 焦平面的遥感卫星相机提出了一种面向复杂场景在轨非均匀性校正的方法,可

实现该类光学遥感相机高频次、高精度相对辐射定标。结合复杂场景内辐射动态范围较大的特点,利用多点拟合的方法求解相对定标参数,满足探元宽动态范围的相对定标;针对交错拼接相机的特点,利用了相邻阵列拼接部分对同一地物成像的特点,对阵列间的非均匀性进行了校正,改善了传统偏航定标阵列间残留的条带噪声。同时在定量分析时,引入了针对复杂场景的非均匀性 NU 系数,较好地从客观角度描述校正的效果。

采用本文方法实现了机械交错拼接的遥感卫星相机的高精度相对定标,试验结果表明:1) OSICCS 法校正后相机探元的平均非均匀性 NU 系数优于 0.957 9%,相较于常用定标法校正后 NU 系数降低了 0.499 1% 以上;2) 图像条纹条带噪声及残余条纹噪声得到很好去除;3) 可实现传感器宽动态范围内相对辐射校正;4) 本文方法优于时域高通法、神经网络法以及传统偏航成像定标法。

参考文献

[1] 张过,蒋永华,李立涛,等. 高分辨率光学/SAR 卫星几何辐射定标研究进展[J]. 测绘学报,2019, 48(12): 1604-1623.
ZHANG G, JIANG Y H, LI L T, et al. Research progress of high-resolution optical/SAR satellite geometric radiom-etric calibration [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019,48(12):1604-1623.

[2] ZHANG Y, CONG M, HAO S, et al. On-orbit calibration data-processing technologies for the space-based infrared camera[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(12):1-13.

[3] 黄文薪,张黎明,司孝龙,等. 基于太阳漫射板的星上定标方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2017,37(3): 952-957.
HUANG W X, ZHANG L M, SI X L, et al. The research of on-orbit calibration method based on solar diffuser [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2017, 37(3):952-957.

[4] MORFITT R, BARSI J, LEVY R, et al. Landsat-8 operational land imager (OLI) radiometric performance on-orbit[J]. Remote Sensing, 2015, 7(2): 2208-2237.

[5] 范斌,陈旭,李碧岑,等. "高分五号"卫星光学遥感载荷的技术创新[J]. 红外与激光工程,2017,46(1): 16-22.
FAN B, CHEN X, LI B C, et al. Technical innovation of optical remote sensing payloads onboard GF-5 satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 16-22.

[6] HORN B K P, WOODHAM R J. Destriping landsat MSS images by histogram modification[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1979, 10(1): 69-83.

[7] SHRESTHA A K. Relative gain characterization and correction for pushbroom sensors based on lifetime image statistics and wavelet filtering [D]. Brookings, SD: South Dakota State University, 2010.

[8] DUAN Y, CHEN W, WANG M, et al. A relative radiometric correction method for airborne image using outdoor calibration and image statistics [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8): 5164-5174.

[9] HENDERSON B G, KRAUSE K S. Relative radiometric correction of QuickBird imagery using the side-slither technique on orbit[C]. Proceedings of SPIE 5542, Earth Observing Systems IX, Denver, CO: SPIE, 2004, 5542: 426-436.

[10] 刘春香,李宁,石俊霞,等. TDICCD 像元非均匀性对图像压缩的影响[J]. 电子测量与仪器学报,2015, 29(3):375-382.
LIU CH X, LI N, SHI J X, et al. Effect of TDICCD pixel non-uniformity on image compression[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(3): 375-382.

[11] MARKHAM B, BARSI J, KVARAN G, et al. Landsat-8 operational land imager radiometric calibration and stability[J]. Remote Sensing, 2014, 6(12): 12275-12308.

[12] PESTA F, BHATTA S, HELDER D, et al. Radiometric non-uniformity characterization and correction of landsat 8 OLI using earth imagery-based techniques[J]. Remote Sensing, 2014, 7(1): 430-446.

[13] ANDERSON C, NAUGHTON D, BRUNN A, et al. Radiometric correction of RapidEye imagery using the on-orbit side-slither method [C]. Proceedings of the SPIE 8180, Image and Signal Processing for Remote Sensing XVII, Prague, Czech Republic: SPIE, 2011,8180: 1-15.

[14] KUBIK, P, PASCAL V. AMETHIST: A method for equalization thanks to histograms[C]. Proceedings of the SPIE 5570, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VIII, Canary Islands, Spain: SPIE, 2004: 256-267.

[15] AARON G, JOHN S, MICHAEL G, et al. An analysis of the side slither on-orbit calibration technique using the DIRSIG model [J]. Remote Sensing, 2014, 6(11): 10523-10545.

[16] 王灵丽,白杨,潘征,等. 视频卫星在轨相对辐射定标方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8):268-273.
WANG L L, BAI Y, PAN ZH, et al. On-orbit relative radiometric calibration method of video satellite [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018,47(8):268-273.

[17] 黄宇,张宝辉,吴杰,等. 自适应多点定标非均匀性校

正算法[J]. 红外技术,2020,42(7):637-643.
HUANG Y, ZHANG B H, WU J, et al. Adaptive multipoint calibration non-uniformity correction algori-thm[J]. Infrared Technology, 2020, 42 (7): 637-643.

[18] 张志强,王萍,于旭东,等. 高精度红外热成像测温技术研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(5):10-18.
ZHANG ZH Q, WANG P, YU X D, et al. Study on high accuracy temperature measurement technology of infrared thermal imager [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2020,41(5):10-18.

[19] 张过,李立涛. 遥感 25 号无场化相对辐射定标[J]. 测绘学报,2017,46(8):1009-1016.
ZHANG G, LI L T. A study on relative radiometric calibration without calibration field for YG-25[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46 (8): 1009-1016.

[20] 武星星,刘金国. 大视场多光谱空间相机在轨自动相对辐射校正研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(1):104-111.
WU X X, LIU J G. Research on on-orbit automatic relative radiometric correction of multi-spectral space camera with large filed of view[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1):104-111.

[21] 宁永慧. 星上高分辨率 TDICCD 相机图像实时预处理研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2013.
NING Y H. Research on the real-time image pre-processing of TDICCD camera with high resolution in space[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics),2013.

作者简介

闫钧华,1993 年于南京航空航天大学获得学士学位,2001 年于南京航空航天大学获得硕士学位,2004 年于南京航空航天大学获得博士学位,现为南京航空航天大学教授,主要研究方向为图像质量评价,多源信息融合,目标检测、跟踪与识别。

E-mail:yjh9758@ 126. com

Yan Junhua received her B. Sc. degree in 1993 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, received her M. Sc. degree in 2001 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, received her Ph. D. degree in 2004 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, now she is a professor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her main research interests include image quality assessment, multi-source information fusion, target detection, tracking and recognition.

倪越,2019 年于南京信息工程大学获得学士学位,现为南京航空航天大学硕士研究生,主要研究方向为光学遥感相机非均匀性校正。

E-mail:melony1997@ nuaa. edu. cn

Ni Yue received his B. Sc. degree in 2019 from Nanjing University of Information Science & Technology, now he is a master candidate in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include non-uniformity correction of optical remote sensing camera.

姜宇,2008 年于北京航空航天大学获得学士学位,2011 年于北京航空航天大学获得硕士学位,现为中国空间技术研究院遥感卫星总体部工程师,主要研究方向为遥感卫星总体设计,有效载荷设计。

E-mail:tiancaijiangyu@ 126. com

Jiang Yu received his B. Sc. degree in 2008 from Beihang University, received her M. Sc. degree in 2011 from Beihang University, now he is an engineer of the General Department of Remote Sensing Satellites, China Academy of Space Technology. His main research interests include the overall design of remote sensing satellite and payload design.

范君杰,2019 年于南京航空航天大学获得学士学位,现为南京航空航天大学硕士研究生,主要研究方向为天基遥感图像仿真。

E-mail:fanjj516@ nuaa. edu. cn

Fan Junjie received his B. Sc. degree in 2019 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, now he is a master candidate in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include space-based remote sensing image simulation.

张寅(通信作者),2009 年于吉林大学获得学士学位,2011 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2016 年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为南京航空航天大学讲师,主要研究方向为光电探测信息仿真与处理,光电探测场景光谱辐射特性。

E-mail:zhangyin1986@ nuaa. edu. cn

Zhang Yin (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2009 from Jilin University, received his M. Sc. degree in 2011 from Harbin Institute of Technology, received his Ph. D. degree in 2016 from Harbin Institute of Technology, now he is a lecturer in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include simulation and processing of photoelectric detection information and spectral radiation characteristics of photoelectric detection scene.