# 视频卫星在轨相对辐射定标方法

王灵丽[1],白 杨[1,2],潘 征[1,2],谷文双[1],武红宇[1]

(1. 长光卫星技术有限公司,吉林 长春 130051;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

**摘 要**:视频卫星利用敏捷姿态性能对地凝视成像,实现对目标的动态监测。为了消除视频卫星获取时序图像中由探测元件响应差异引起的非均匀性,获得清晰的图像和准确的辐射信息,需要针对视频卫星传感器进行相对辐射定标。由于成像机理不同,基于统计的在轨辐射定标方法并不适用于视频卫星,提出采用均匀场景的视频卫星在轨相对辐射定标方法,分别对云层、海洋和沙漠三种典型的均匀场景进行凝视视频成像,解算相对辐射定标系,其中,沙漠场景的处理取得了较好的相对辐射定标系数,校正吉林一号视频单帧影像。该方法能够有效修复图像缺陷,图像的非均匀性由 3.7%降低至 1.2%。

**关键词**:视频卫星; 凝视成像; 在轨相对辐射定标; 均匀场景

**中图分类号**:TH79 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.0817003

# On-orbit relative radiometric calibration method of video satellite

Wang Lingli[1], Bai Yang[1,2], Pan Zheng[1,2], Gu Wenshuang[1], Wu Hongyu[1]

(1. Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130051, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** The video satellite uses the agile attitude performance to stare imaging for ground achieving the dynamic monitoring of the target. In order to eliminate the non-uniformity of sequence images acquired by the video satellite sensor, which was caused by the response difference of the detection element. To obtain the clear image and the accurate radiation information, relative radiometric calibration was needed for video satellite sensors. Because of the different imaging mechanism between video satellite and push-broom satellite, on-orbit radiometric calibration methods based on the statistics were not suitable for video satellite. The uniform scene on-orbit relative radiometric calibration method to video satellite was proposed, through staring imaging for three typical uniform scenes including cloud, ocean and desert respectively to calculate relative radiometric calibration coefficients. Among them, the processing of desert scene had achieved better relative radiometric calibration coefficients, which was used for correcting single frame image of Jilin-1 video satellite. The method could effectively repair the image defects, and the non-uniformity of the image was reduced from 3.7% to 1.2%.

**Key words:** video satellite; staring imaging; on-orbit relative radiometric calibration; uniform scene

**收稿日期**:2018-03-05; **修订日期**:2018-04-03

**基金项目**:吉林省科技发展计划项目(20180201108GX)

**作者简介**:王灵丽(1989-),女,助理研究员,硕士,主要从事图像处理方面的研究。Email:wll920707@sina.cn

## 0 引 言

视频卫星是一种新型的对地观测卫星，具有对地面上的某一区域进行“凝视”观测的能力，通过一定时间间隔的时序图像组成视频，能够对地面上的动态目标进行监测[1-2]。2013~2017 年美国 Skybox 发射的 Skysat 系列卫星(Skysat-1~Skysat-7)能够拍摄 90 s 长 30 帧/s 的视频，图像分辨率为 1.1 m。长光卫星技术有限公司分别于 2015 年 10 月，2017 年 1月先后发射三颗面阵 CMOS 探测器视频卫星[3]，具有凝视、半凝视对地成像能力，可拍摄 120 s 长 10 帧/s 的视频，地面分辨率为 0.92 m。珠海欧比特控制工程股份有限公司于 2017 年 6 月发射两颗视频微纳卫星“珠海一号”，光学分辨率为 1.98 m。

视频卫星采用面阵探测器获取遥感图像，为了准确描述图像的辐射信息，需要进行辐射定标。辐射定标是对传感器探测值进行标定的过程，用以确定传感器入瞳处的准确辐射信息，是进行遥感数据定量化应用的可靠保障。辐射定标包括绝对辐射定标和相对辐射定标，绝对辐射定标是定量地描述传感器探测值与地表实际辐亮度信息的对应关系，其精度直接影响了遥感应用产品的质量。相对辐射定标又称为传感器探测元件的归一化处理，是对各个像元辐亮度信息响应的量化值(*DN*)进行归一化校正的处理，降低或消除传感器各个探测元件响应差异，使探测元件对辐亮度的响应均匀一致[4-6]。

为了消除视频卫星获取时序图像中探测元件响应的不均匀性，获得清晰的图像和准确的辐射信息，需要针对视频卫星进行相对辐射定标。相对辐射定标不仅包括卫星发射前的实验室相对辐射定标，还包括在轨运行阶段的在轨相对辐射定标[7]。由于卫星所处太空环境的影响，探测器镜头成像与地面实验室阶段不同，在轨定期进行相对辐射定标对保证辐射定标数据的可靠性具有重要的意义。目前的相对辐射定标方法主要包括基于图像统计量的直方图均衡法和直方图匹配法，以及均匀场景法。基于图像统计量直方图均衡法，其基本假设为每个探元 *DN* 值的分布概率一致，需要足够多的图像数据或采集均匀场景的图像；直方图匹配法是统计整幅图像的直方图和每个探测器的直方图，以整幅图像的直方图为基准，将每个探测器的直方图与其进行匹配，从而对图像进行相对辐射校正[8-9]。这两种方法需要传感器探测元件获取的图像数据足够多，或逐个探测元件获得数据的灰度直方图与整体图像的直方图分布一致。然而，视频卫星对地观测时，受限于成像帧频和卫星数据存储和数传能力，无法获得单个像元足够的影像数据，因此这两种方法对于视频卫星无法适用。张丽莎等[10]提出一种采用 90°旋转定标和基于场景相结合的自适应校正技术，对高灵敏度长线阵推扫型海洋红外遥感系统进行了非均匀性校正。这种利用卫星敏捷特性的旋转定标对于需要对逐个像元进行校正的面阵视频卫星并不适用。

针对吉林一号视频卫星载荷，分析现有的相对辐射定标的方法，基于视频卫星对目标区域单点凝视成像的模式，文中提出采用均匀场景的视频卫星在轨相对辐射定标方法。卫星在轨运行期间，分别对云层、海洋和沙漠三种典型的均匀场景进行凝视视频成像，并根据获得的视频影像数据，进行相对辐射定标，解算相对辐射定标系数。利用定标系数校正吉林一号视频卫星单帧图像，文中提出的方法能够修复图像中的缺陷，有效改善图像的非均匀性。

## 1 视频卫星辐射定标

### 1.1 视频卫星凝视成像

吉林一号视频卫星凝视成像过程中，卫星利用较高的姿态敏捷能力使光学系统相机始终盯住某一区域，可以连续观察视场内的变化[11]，其成像过程如图 1 所示。

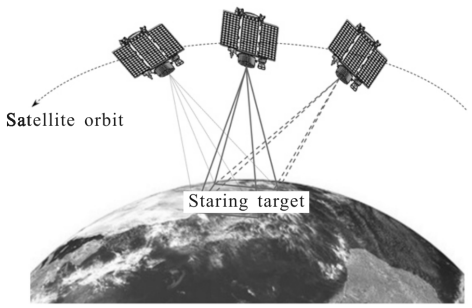



图 1 视频卫星凝视成像模式

Fig.1 Video satellite staring imaging mode

卫星通过高敏捷的机动性能控制相机姿态在成像期间始终指向同一凝视目标区域，在一段时间内

获得时间序列影像,这些时序图像并非完全对准的,需要根据图像中的特征信息,以及地物的地理信息对影像进行配准,最终生成凝视视频[12-13]。为了获得流畅的凝视视频,需要单帧视频图像辐射均匀一致,且帧间图像也需要辐射均匀一致。吉林一号卫星视频相机采用辰芯 CMOS 面阵相机 GMAX1205,利用 Bayer 模板采集 RGB 三个光谱波段的信息,图像量化位数为 8 位,灰度值响应的范围为[0,255]。

视频卫星面阵成像,区别于线阵探测器推扫成像模式。推扫图像中易出现由于单个探测像元响应不均匀引起的沿轨向条带噪声,而视频单帧图像中,探元的响应异常主要包括:(1) 由于面阵成像,相机焦面中间像元响应的探测值高于边缘,在图像的边缘处形成光晕;(2) 由于焦面和滤光片的缺陷,易在图像中形成异常响应的像元;(3) 相机安装、地面振动试验和环境试验中,由于试验环境并非完全洁净,一旦灰尘进入焦面和镜头,会造成像元响应不均匀。这些探元响应的不均匀性均需要通过相对辐射定标进行消除。

### 1.2 均匀场景在轨相对辐射定标

针对视频卫星面阵成像像元响应不均匀性的问题,并依据视频卫星凝视成像模式,分析现有的在轨相对辐射定标方法,基于统计的在轨相对辐射定标方法需要足够的图像数据,并不适用于视频卫星,因此文中采用均匀场景相对辐射定标方法。均匀场景相对辐射定标时,卫星对地物单一的均匀区域进行凝视成像,获得一定时间内时序图像。由于视频卫星采用面阵相机对地成像,能够从时间序列影像中获得逐个探元对均匀区域的响应,根据各个探元的响应进行相对辐射定标。

在均匀场景的选择上,选择场景单一,降水量较少的沙漠、厚云层、以及深海场景,由于这些场景辐亮度信息较为稳定,均可作为伪不变场,且全球分布区域比较多,根据卫星的飞行轨道,比较容易实现这些场景的拍摄。

在采集一段时间序列影像后,对序列图像逐个像元进行平均处理,计算逐个像元的平均灰度响应,通过该方法消除地物的纹理信息引起的像元响应差异,以及相机非稳定性对相对辐射定标的影响。对获取的全部影像取平均值,获得平均灰度响应,根据逐个像元的灰度响应与整体的平均灰度响应解算相对辐射定标系数。

$$\alpha_{i,j}=\frac{\overline{DN}}{\overline{DN_{i,j}}} \tag{1}$$

式中:$\alpha_{i,j}$ 为像元$(i,j)$的相对辐射定标系数;$\overline{DN_{i,j}}$ 为像元$(i,j)$在总帧数为 $n$ 的时间序列图像的平均灰度响应,$\overline{DN_{i,j}}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}DN_{i,j,k}$;$\overline{DN}$ 为图像所有像元的平均灰度响应,$\overline{DN}=\frac{1}{\text{width}\times\text{height}}\sum_{i=1}^{\text{width}}\sum_{j=1}^{\text{height}}\overline{DN_{i,j}}$,width,height 为图像的宽和高。由于拍摄的图像为均匀场景,单个像元的灰度分布近似服从高斯分布,为了保证相对辐射定标系数解算的可靠性,需要将像元响应偏离较大的粗差进行剔除。在具体解算过程中,将单个像元的灰度响应超出其平均灰度响应 $3\sigma$ 的值剔除。

研究图像采集帧数对相对辐射定标的影响,在均匀场景在轨相对辐射定标算法中,需要足够多的图像数据消除图像高频纹理,使得平均图像反映相机在均匀光照射下的灰度分布,从而保证解算相对辐射定标系数的精度。为了定量说明图像帧数的影响,描述图像中整体像元响应的一致性,采用图像的非均匀性进行衡量,非均匀性是指传感器在外界均匀光照射时,各探测元件响应的不一致性,这里用非均匀性系数表征:

$$\text{PRNU}=\frac{\text{std}}{\overline{DN}} \tag{2}$$

式中:std 为图像的方差;$\overline{DN}$ 为图像的平均灰度。理论上,随着图像帧数的增加,平均图像的非均匀性系数逐渐降低,选择非均匀性稳定后的帧数作为相对辐射定标采集图像帧数。

## 2 在轨验证

为了对吉林一号视频卫星进行在轨相对辐射定标,分别拍摄均匀场景深海、云层和沙漠,具体拍摄时间、拍摄地点,以及拍摄时的相机参数等如表 1 所示。

拍摄三种均匀场景,获得图像的原始图像数据,深海、云层和沙漠三种均匀场景单帧影像的原始图像分别如图 2 所示。根据采集的视频所有时间序列帧图像,计算逐个像元的平均灰度响应,获得平均图像如图 3 所示。

**表 1 三种均匀场景在轨相对辐射定标实验**

**Tab.1 On-orbit relative radiometric calibration experiments on three typical uniform scenes**

| Scenes | Shooting time | Duration of shooting/s | Total number of frames taken | Longitude and latitude | | Lateral pendulum angle/(°) | Sun height angle and azimuth angle | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Longitude/(°) | Latitude/(°) | | Altitude angle/(°) | Azimuth/(°) |
| Abysmal sea | 2017/1/12 19:54:35 | 30 | 296 | −19.284 0 | 14.791 5 | −0.549 349 | 48.46 | 145.74 |
| Clouds | 2017/1/21 10:37:24 | 30 | 297 | 125.313 5 | 43.852 9 | 0.080 318 5 | 24.07 | 161.44 |
| Desert | 2017/4/3 15:29:21 | 80 | 805 | 51.065 7 | 20.991 2 | 28.419 5 | 66.97 | 130.23 |

(a) 深海单帧图像

(a) Single frame image of sea scene

(b) 云层单帧图像

(b) Single frame image of cloud scene

(c) 沙漠单帧图像

(c) Single frame image of desert scene

图 2 均匀场景单帧图像原始数据

Fig.2 Raw data of single frame images in uniform scene

(a) 深海场景平均图像

(a) Average image of sea scene

(b) 云层场景平均图像

(b) Average image of cloud scene

(c) 沙漠场景平均图像

(c) Average image of desert scene

图 3 均匀场景平均图像

Fig.3 Average images in uniform scene

根据图 2 和图 3 所示,深海场景拍摄了大西洋靠近非洲大陆的一片海域，单帧图像中海面上有海浪纹理,图像的信息熵为 3.49,灰度值仅为 37.9,在灰度范围为[0,255]的图像中整体灰度较暗。深海场景平均图像比较均匀,信息熵降低为 2.56,消除了海浪纹理信息,但是图像整体亮度较低。云层场景平均图像 RGB 波段的灰度均值分别为 130.57、136.88 和 107.53,比较适宜。然而,单帧图像中由于不同区域云层的厚度不同,在图像中有明显的明暗变化,单帧图像的对比度为 6.08，平均图像中对比度降低至 2.30,但依然存在较为明显的亮暗变化,会对相对辐射校正的结果产生影响。沙漠场景拍摄的是沙特阿拉伯东部省较为均匀的一片沙漠，获取的图像中有细小的流沙纹理,图像的对比度为 0.67。沙漠场景获得了较好的平均图像,RGB 波段的灰度均值分别为 155.75、129.90 和 86.38，单帧影像中的流沙纹理被消除了,对比度降至 0.34,而细节能量也由单帧图像的 0.93 降低至 0.57,单帧图像中横贯的路被很好的消除了。

平均图像能够消除单帧图像细节纹理信息,需研究图像采集帧数对相对辐射定标的影响。根据表 1 所示,云层场景采集了 30 s 297 帧图像,而沙漠场景中采集了 80 s 805 帧图像。对比云层与沙漠场景的平均图像，由于数据帧数不足导致的云层图像中的高频的表面纹理被保留下来，这将造成相对辐射定标系数的解算误差。同时为了减小卫星数据存储与数传的压力，应在保证相对辐射定标精度的基础上,尽量使用适宜的图像帧数。

以沙漠场景为例，分析不同图像帧数生成的平均图像的非均匀性。分别计算不同图像帧数获得的平均图像中,R、G、B 三个光谱波段的非均匀性,结果如图 4 所示。

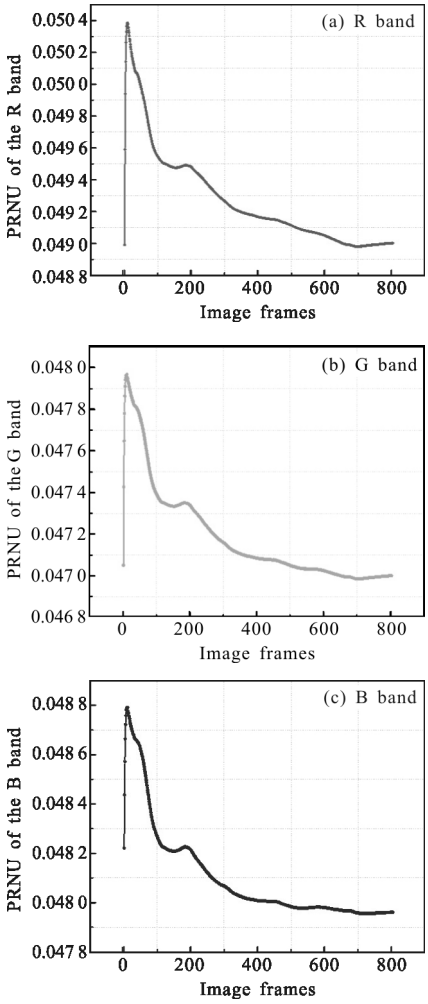



图 4 图像非均匀性与图像帧数关系曲线

Fig.4 Relationship curve between image non-uniformity and image frames

非均匀性反映了平均图像中的纹理变化,如图 4 所示,图像帧数较少时,非均匀性随帧数的增加而增加,图像纹理更为复杂,而随着图像帧数逐渐增加,图像 RGB 波段的非均匀性系数在 0.490、0.470 和 0.480 趋于平稳。这是由于图像中的高频纹理,以及一些明暗变化明显的特征都逐渐被消除,此时像元的平均灰度响应能够反映其探测元件的性质。因此按照图像的非均匀性变化趋势,对于包含规律性纹理的图像,适宜选择 700 帧影像进行视频卫星均匀场在轨相对辐射定标。

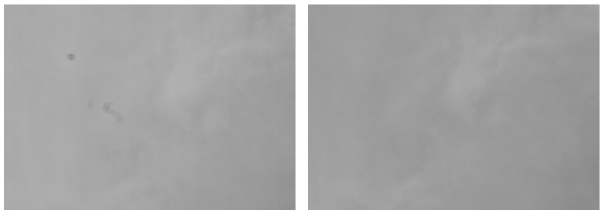
## 3 实验结果与分析

根据获取各个像元的平均灰度响应、图像整体的平均灰度响应,以及相对辐射定标的解算公式,分别计算 R、G、B 三个光谱波段各个像元的相对辐射定标系数,解算的相对辐射定标系数结果如图 5 所示。

图 5 相对辐射定标系数

Fig.5 Relative radiometric calibration coefficients

由图 5 可见,图像中间像元灰度响应高于边缘的光晕现象被很好地校正,且图像中的一些灰尘和焦面缺陷引起的异常探元响应也被校正了。为了验证在轨相对辐射定标的结果,将获取的定标系数分别对图像进行相对辐射校正处理,图 6 为拍摄的云层图像相对辐射校正处理前后对比,图 7 为 2017 年 4 月 7 日拍摄的 30 s 迪拜视频中的第 1 帧图像相对辐射校正处理前后对比,拍摄目标点纬度为 25.108 6°,经度为 55.144 9°,拍摄侧摆角为-10.810 8°。



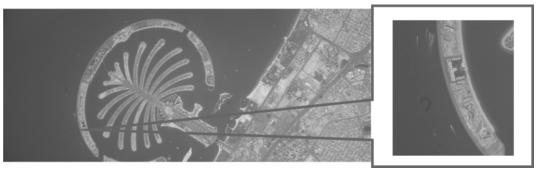
(a) 相对辐射校正处理前 (b) 相对辐射校正处理后

(a) Before relative radiance correction (b) After relative radiance correction

图 6 云层相对辐射校正处理前后图

Fig.6 Before and after relative radiance correction for cloud

根据相对辐射校正处理前后的图像对比,图 6 中相对辐射定标系数很好地消除了云层图像中由于灰尘和焦面缺陷等引起的像元异常响应,图 7 中图像整体响应均匀一致,在轨相对辐射定标系数很好地校正了图像,消除光晕的影响,并校正了灰尘的像元异常响应。



(a) 相对辐射校正处理前

(a) Before relative radiance correction

(b) 相对辐射校正处理后

(b) After relative radiance correction

图 7 迪拜相对辐射校正处理前后图

Fig.7 Before and after relative radiance correction for Dubai

利用解算的相对辐射定标系数对图像进行校正处理，校正前 RGB 波段的非均匀性分别为 4.63%、3.47%、3.02%，校正后 RGB 波段的非均匀性分别为 1.85%、0.93%、0.84%。可见，相对辐射校正后，图像的非均匀性由 3.7%校正为 1.2%。辐射均匀一致的图像，对时序图像生成稳定流畅的视频具有重要的意义。

## 4 结 论

针对视频卫星在轨相对辐射定标的问题，结合视频卫星凝视成像的能力，文中采用均匀场景法进行在轨相对辐射定标，分别拍摄深海、云层和沙漠三种典型均匀场景。对比三种场景相对辐射定标的结果，沙漠场景由于亮度适宜，拍摄影像帧数满足需求，得到较好的相对辐射定标结果。根据在轨辐射定标实验，规律性纹理的场景拍摄 700 帧图像，能够达到相对辐射定标消除探元响应不均匀性的效果。最后根据获得的相对辐射定标系数处理视频单帧图像，图像的非均匀性由 3.7%校正为 1.2%，消除了图像探元响应不均匀性，修复了图像缺陷。因此，均匀场景法对于视频卫星在轨辐射定标是一种有效且可靠的方法。未来的工作将结合海洋、云层、太空暗场等多种不同辐亮度条件下的均匀场景，利用多点拟合的方法进行更精确的在轨相对辐射定标，使得视频卫星图像更为均匀一致。

**参考文献：**

[1] Liu Tao. Research on the development of video satellite abroad[J]. ***Space International***, 2014, (9): 50-56. (in Chinese)

[2] Zhu Lihong, Hui Zheng, Ren Defeng, et al. Development status and enlightenment of video imaging satellite [J]. ***Satellite Application***, 2015(10): 23-28. (in Chinese)

[3] Yu Jianbing. Successfully launch of one rocket three satellites, the fastest craft rocket completes the business first list [J]. ***Space & Aeronautics***, 2017(3): 22. (in Chinese)

[4] Huang Honglian, Yi Weining, Qiao Yanli, et al. On orbit radiometric calibration for Mapping Satellite-1 sensor [J]. ***Journal of Remote Sensing***, 2012, 16(S1): 22-27. (in Chinese)

[5] Guo Jianning, Yu Jian, Zeng Yong, et al. Relative radiometric correction of CBERS-01/02 satellite CCD images [J]. ***Science in China Ser E Information Science***, 2005, 32(S1): 11-25. (in Chinese)

[6] Han Qijin, Zhang Xuewen, Qiao Zhiyuan, et al. Wide dynamic radiometric calibration of GF-1 PMS sensors using multi-test sites [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(1): 127-133. (in Chinese)

[7] Han Qijin, Pan Zhiqiang, Wang Aichun. In-orbit radiometric calibration and quantitative application for civil remote sensing satellite payloads [J]. ***Spacecraft Recovery & Remote Sensing***, 2013, 34(2): 57-65. (in Chinese)

[8] Li Haichao, Man Yiyun. Satellite attitude adjustment and nonlinear relative radiometric calibration method based on linear CCD imaging the same region of non-uniform scene [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(4): 1370-1376. (in Chinese)

[9] Duan Yini, Zhang Lifu, Yan Lei, et al. Relative radiometric correction methods for remote sensing images and their applicability analysis [J]. ***Journal of Remote Sensing***, 2014, 18(3): 597-617. (in Chinese)

[10] Zhang Lisha, Liu Zhaojun, Ma Wenpo, et al. High performance NUC by side-slither combined with scened-based correction[J]. ***Spacecraft Recovery & Remote Sensing***, 2017,38(01):78-87. (in Chinese)

[11] Yu Yuanbo, Zhang Tao, Guo Lihong, et al. Moving objects detection on satellite video [J]. ***Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays***, 2017, 32(2): 138-143. (in Chinese)

[12] Wang Xia, Zhang Guo, Shen Xin, et al. Satellite video stabilization with geometric distortion [J]. ***Acta Geodaetica et Cartographica Sinica***, 2016, 45(2): 194-198. (in Chinese)

[13] Zhang Guo. Satellite video processing and applications [J]. ***Journal of Applied Sciences***, 2016, 34(4): 361-370. (in Chinese)