

像元间光谱响应非均匀性与条带噪声的关系

李文力^{1,2,3}, 李秀举^{1,2}, 屠黄唯^{1,2,3}, 闫语畅^{1,2,3}, 韩昌佩^{1,2*}¹中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;²中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于黑体的在轨辐射定标是多通道扫描成像辐射计(AGRI)红外通道采用的辐射定标方案之一, AGRI 某些长波红外通道的图像经过黑体定标后仍残留部分条带噪声, 这将影响图像质量。分析了 AGRI 基于星上黑体的辐射定标模型, 提出了通道内像元间光谱响应非均匀性的概念; 对像元间光谱响应非均匀性与条带噪声的关系进行了仿真分析; 基于分析结果, 提出了一种利用均匀场景进行相对辐射定标的方法, 并使用 AGRI 的成像数据, 验证了该方法对抑制由像元间光谱响应非均匀性导致的条带噪声的有效性。

关键词 成像系统; 黑体定标; 光谱响应非均匀性; 条带噪声; 相对辐射定标; 风云四号

中图分类号 TP732.2; TP751.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1211001

Relationship Between Spectral Response Non-Uniformity of Pixels and Stripe Noise

Li Wenli^{1,2,3}, Li Xiuju^{1,2}, Tu Huangwei^{1,2,3}, Yan Yuchang^{1,2,3}, Han Changpei^{1,2*}¹Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;²Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract On orbit radiometric calibration based on blackbody is one of the radiometric calibration schemes used in the infrared channel of the Advanced Geosynchronous Radiation Imager (AGRI). Some of the images from long wave infrared channels of AGRI still have some band noise after blackbody calibration, which will affect the image quality. In this paper, the radiometric calibration model of AGRI based on spaceborne blackbody is analyzed, and the concept of spectral response non-uniformity between pixels in the channel is proposed; then, the relationship between the non-uniformity of the spectral response between pixels and the band noise is simulated and analyzed. Finally, based on the analysis results, a method of relative radiometric calibration using a uniform scene is proposed, and the imaging data of AGRI are used to verify the effectiveness of this method to suppress the stripe noise caused by the non-uniformity of spectral response between pixels.

Key words imaging systems; blackbody calibration; spectral response non-uniformity; stripe noise; relative radiometric calibration; FY-4A satellite

1 引言

多通道扫描成像辐射计(AGRI)是我国静止轨

道气象卫星风云四号 A 星的核心成像载荷之一, 可获取从可见光到红外共计 14 个通道的遥感影像^[1]。

AGRI 采用线列探测器搭配东西镜和南北镜的双扫

收稿日期: 2021-09-07; 修回日期: 2021-10-22; 录用日期: 2021-11-25

基金项目: 中国科学院上海技术物理研究所创新基金(CX-262)

通信作者: *changpei_han@mail.sitp.ac.cn

描镜机构,通过东西扫描加南北步进的方式,实现对地球全圆盘或部分区域的二维观测^[1]。AGRI 搭载星上黑体定标系统^[2],可准确获取红外通道中各个像元在轨期间的绝对辐射定标系数,以反演其观测目标的辐射特性^[3-4]。通常情况下,利用各像元对应的绝对定标系数将 DN(Digital Number)值转换为辐亮度数据,即可有效去除 DN 值图像中各像元响应率差异造成的条带噪声,得到无条带干扰的辐射图像^[5-6]。但在 AGRI 的 Band9、Band10 和 Band14^[1]的辐亮度图像和亮温图像中仍发现有部分残余的条带噪声,这种干扰将影响后续产品的精度^[7]。

针对遥感图像中受到条带噪声干扰的问题,科研人员根据条带噪声的特性,提出多种修正算法,以减少条带噪声在遥感图像中的干扰,修正算法主要可分为统计类^[7-10]和定标类^[11-13]两大类。统计类方法所需条件相对简单,但相比于定标类方法,主要有两方面不足:一方面,该类方法在提高图像质量的同时,不可避免地损失部分原始有效信息^[5];另一方面,该类方法的修正参数通常不能实时更新,从而易出现参数设置不匹配导致的条带噪声残余或过度平滑。

定标类的相对定标方法能够从探测器源头入手对图像进行校正^[5],但通常需要一定的实现条件,如遥感载荷 OLI (Operational Land Imager)^[12-13]和 ABI(Advanced Baseline Imager)^[14-15]利用其各自具备的特殊成像工作模式^[16-17],选取观测场景中的均匀场景得到相对定标系数,具有较好的条带噪声抑制效果。但是以上研究主要是对可见光及近红外通道的图像进行了分析处理,而没有研究长波红外通道的数据特性,以及该类方法对长波红外辐亮度图像中条带噪声的适用性。

本文针对 AGRI 长波红外波段 Band9、Band10 和 Band14 的条带噪声问题,首先分析了黑体定标模型去除条带噪声的局限性,提出了光谱响应非均匀性的概念;接着量化分析了 AGRI 像元间光谱响应非均匀性与条带噪声的关系;最后提出并验证了一种利用均匀场景获取校正系数的相对定标方法。

2 黑体定标与光谱响应非均匀性

2.1 AGRI 黑体定标模型

利用地面实验验证了 AGRI 的辐射响应特性具有良好的线性度,即对于某一探测器像元 i ,其输出的数字量化值与目标的辐亮度值的关系可简化表示为

$$\bar{L}_i = K_i \times S_{DN_i}, \quad (1)$$

式中: \bar{L}_i 为仪器接收到的目标平均光谱辐亮度; S_{DN_i} 为仪器对目标的净响应信号; K_i 为定标系数。

AGRI 搭载经过标准辐射源标定的黑体作为星上定标设备,在轨工作期间通过观测冷空间和星上黑体来获取仪器的绝对定标系数。辐射定标算法参数主要有:仪器观测冷空间得到的输出值 $S_{DN_i}^{(1)}$ 和观测星上黑体得到的输出值 $S_{DN_i}^{(2)}$ 。

$$\begin{cases} S_{DN_i}^{(1)} = S_{DN_i}^{(\text{space})} + S_{DN_i}^{(\text{bg})} = \frac{\bar{L}_i^{(\text{space})}}{K_i} + S_{DN_i}^{(\text{bg})} \\ S_{DN_i}^{(2)} = S_{DN_i}^{(\text{bb})} + S_{DN_i}^{(\text{bg})} = \frac{\bar{L}_i^{(\text{bb})}}{K_i} + S_{DN_i}^{(\text{bg})} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $S_{DN_i}^{(\text{space})}$ 为仪器对冷空间的净响应信号; $S_{DN_i}^{(\text{bb})}$ 为仪器对黑体的净响应信号; $S_{DN_i}^{(\text{bg})}$ 为仪器的背景响应信号; $\bar{L}_i^{(\text{space})}$ 为对应的冷空间辐射谱,可以近似于 4 K 的绝对黑体; $\bar{L}_i^{(\text{bb})}$ 为星上黑体辐射谱 $L^{(\text{bb})}(\lambda, T_{\text{bb}})$ 以像元 i 的相对光谱响应 $R_{SR_i}(\lambda)$ 为权重的加权平均值,表达式为

$$\bar{L}_i^{(\text{bb})} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L^{(\text{bb})}(\lambda, T_{\text{bb}}) R_{SR_i}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} R_{SR_i}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda, T_{\text{bb}}) \epsilon(\lambda) R_{SR_i}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} R_{SR_i}(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

式中: $L^{(\text{bb})}(\lambda, T_{\text{bb}})$ 为星上黑体的辐射谱,可以用普朗克函数 $P(\lambda, T_{\text{bb}})$ 与黑体发射率 $\epsilon(\lambda)$ 的乘积来表示。

根据式(2),得到绝对定标系数 K_i 为

$$K_i = \frac{\bar{L}_i^{(\text{bb})} - \bar{L}_i^{(\text{space})}}{S_{DN_i}^{(2)} - S_{DN_i}^{(1)}}. \quad (4)$$

当像元 i 对某一未知地球场景成像时,得到净响应值 $S_{DN_i}^{(\text{scene})}$,将其与对应的在轨辐射绝对定标系数 K_i 相乘,即得到该像元接收到的场景平均光谱辐亮度(简称辐亮度) $\bar{L}_i^{(\text{scene})}$:

$$\bar{L}_i^{(\text{scene})} = K_i S_{DN_i}^{(\text{scene})} = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L^{(\text{scene})}(\lambda) R_{SR_i}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} R_{SR_i}(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

式中: $L^{(\text{scene})}(\lambda)$ 为目标辐射谱。

通过查找与该场景的平均光谱辐亮度相等的绝对黑体平均光谱辐亮度,即可得到该场景的亮温,其查找函数为 $T_i = \varphi(L_i)$,该场景的平均光谱辐亮度为

$$\bar{L}_i^{(scene)} = \bar{L}_i^{(bb)}(T) = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} P(\lambda, T) R_{SR_i}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} R_{SR_i}(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

查找示意图如图 1 所示。通道内各个像元通常具有不同的绝对定标系数,这反映的是不同像元响

应率的差异。从黑体定标模型中可以看出,利用各像元对应的绝对定标系数可将 DN 值数据转换为辐亮度数据,从而去除 DN 值图像中各像元响应率差异造成的条带噪声,得到各像元对应的场景平均光谱辐亮度。

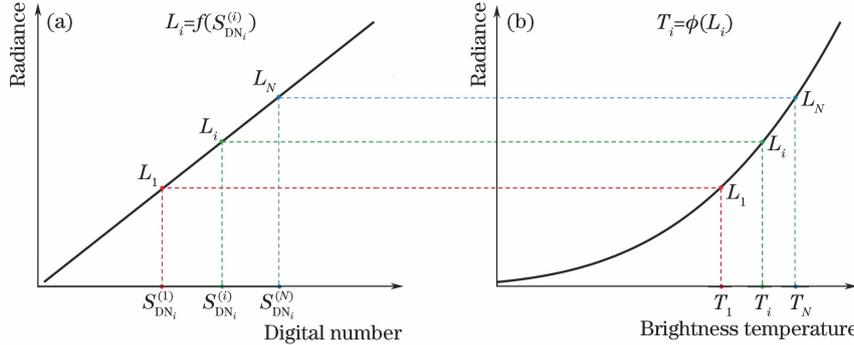


图 1 绝对辐射定标曲线以及辐亮度-亮温查找示意图。(a)绝对辐射定标曲线;(b)辐亮度-亮温查找示意图

Fig. 1 Radiometric calibration curve and schematic diagram of radiance-brightness temperature search.

(a) Radiometric calibration curve; (b) schematic diagram of radiance-brightness temperature search

2.2 像元间光谱响应非均匀性

图 2 展示了 AGRI 的 Band9、Band10 和 Band14 通道的光谱响应曲线,可以看出通道内各个像元的

相对光谱响应(RSR)存在差异,本文将其定义为像元间光谱响应非均匀性。

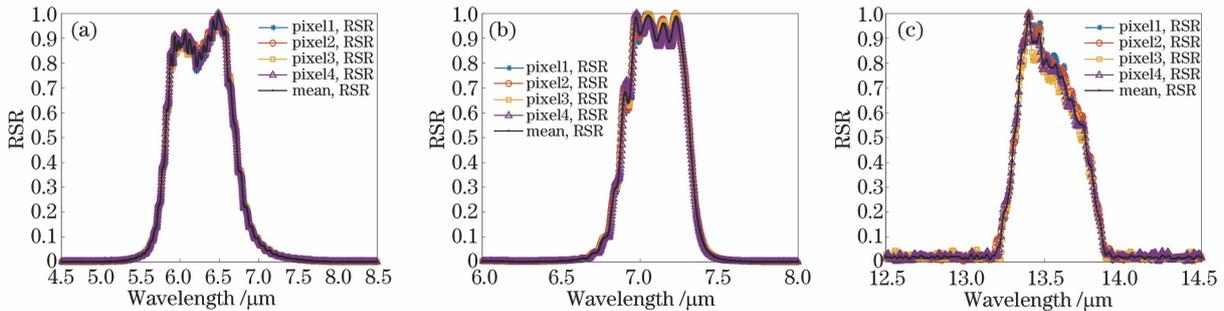


图 2 AGRI 各个像元的 RSR 函数。(a) Band9;(b) Band10;(c) Band14

Fig. 2 RSR of each pixel of AGRI. (a) Band9; (b) Band10; (c) Band14

从式(5)可以看出,当在通道内所有像元观测同一目标时,像元间光谱响应非均匀性将导致各像元 DN 值经绝对定标后的不同辐亮度值,这将在辐亮度图像中表现为条带噪声,并且从式(5)中可知,像元间的辐亮度差异量与目标辐射谱 $L^{(scene)}(\lambda)$ 也有关系;定标法反演亮温具有场景依赖性,当观测目标的辐射特性与绝对黑体辐射特性一致时,通过亮温查找表将得到各个像元不同的目标辐亮度对应相同的亮温,如图 3 所示。

由于大气吸收等的影响,对地遥感器实际观测的目标辐射特性通常与绝对黑体辐射特性存在较大差异,这将导致通过亮温查找表得到的不同像元的场景辐亮度对应不同亮温,这在亮温图像中表现为条带噪声。

另外,在实际业务应用中,通常忽略通道内像元间的光谱非均匀性,仅使用一组 RSR 函数来表征通道内所有像元的光谱响应特性,即所有像元光谱响应函数的平均值或组件级光谱点乘得来的光谱响应函数^[18]。利用该光谱响应函数对应的亮温查找表计算通道内各像元的辐亮度值对应的亮温,因此如果像元间光谱响应非均匀性造成的条带噪声在辐亮度图像中没有得到有效抑制,其亮温图像也将存在条带噪声。

3 像元间光谱响应非均匀性与条带噪声

根据平均光谱辐亮度的表达式,其值与像元的 RSR 函数以及成像目标的辐射特性相关。本文使用 AGRI 的 Band9、Band10 和 Band14 各像元的 RSR 函数,结合不同的目标辐射特性,量化分析像

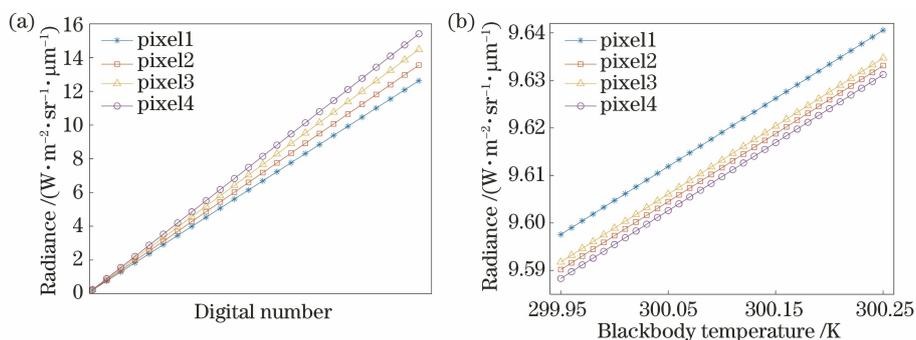


图 3 不同像元对具有绝对黑体谱的目标成像时的响应及亮温反演结果。(a)不同像元的响应;(b)亮温反演结果
Fig. 3 Response of different pixels to imaging of target with absolute blackbody spectrum and results of brightness temperature inversion. (a) Response of different pixels; (b) results of brightness temperature inversion

元间光谱响应非均匀性与辐亮度图像中条带噪声的关系。

3.1 不同目标的辐射特性

红外遥感器接收到的热红外辐射亮度值主要由三部分组成:第一部分为地球表面的红外辐射经过大气吸收衰减后到达卫星传感器的辐射;第二部分为大气向上辐射,与大气中各气体含量及物理状态有关;第三部分为大气向下辐射经地表反射后再通过大气到达传感器的辐射^[19-20]。

晴空无云状态下,遥感器可观测到地表的辐射能量。使用 MODTRAN4.0 仿真了 5 种大气模型(热带、中纬度夏季、中纬度冬季、亚极地夏季和亚极地冬季)下的 4 种典型地表场景(森林、沙漠、海洋和草地)在亮温取值范围为 260~330 K(间隔 10 K,总

共 8 组亮温)的辐射特性,共 160 组辐射谱。

在有云情况下,因云层水汽的遮挡,来自地表的辐射能量较弱。因此本文在利用 MODTRAN4.0 仿真云层辐射特性时,将地表场景统一设为 290 K 的海面,然后仿真了 5 种不同大气模型(热带、中纬度夏季、中纬度冬季、亚极地夏季和亚极地冬季)下 10 种云层(云底高度有 5 种情况,分别为 1 km、3 km、5 km、7 km 和 9 km,每种云底高度对应 2 种云层厚度,分别为 1 km 和 2 km)的辐射特性,共 50 组辐射谱。

图 4 展示了本文生成的一些目标辐射谱,图 4(a)为晴空无云条件下,中纬度夏天大气下的地表场景为沙漠的系列辐射谱,图 4(b)为中纬度夏天大气下的一系列云层目标的辐射谱。

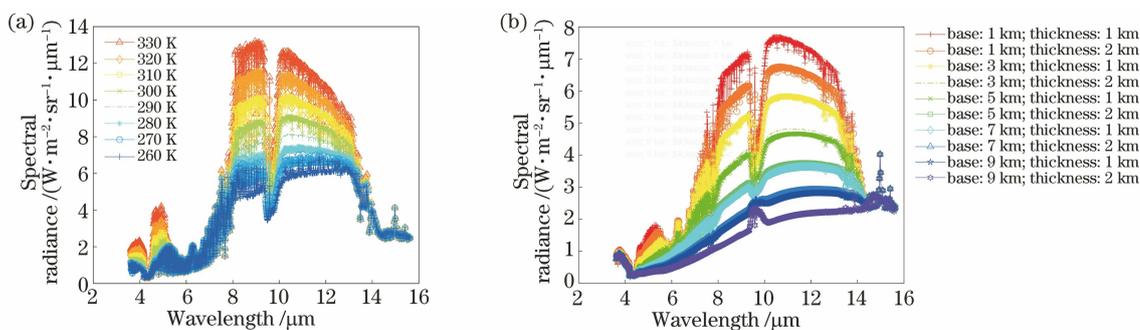


图 4 仿真的不同目标辐射谱的一些示例。(a)无云地表;(b)云层目标
Fig. 4 Some examples of simulated radiation spectra of different observation targets.

(a) Cloud-free ground; (b) cloud targets

3.2 各像元对不同目标的成像差异

基于仿真的地球场景辐射谱,利用式(5)计算 AGRI 不同通道内各个像元的平均光谱辐亮度值 L_{sp} ,并根据通道的平均光谱响应函数反演亮温得到 T_{sp} 。图 5 展示了计算得到的 Band9、Band10 和

Band14 三个波段各像元的平均光谱辐亮度与亮温的差异情况,横坐标表示像元序号(Band9、Band10、Band14 均为 4 像元线列探测器),纵坐标表示像元的个体值 L_{sp} 、 T_{sp} 与通道内 4 个像元的均值 L_{avg} 、 T_{avg} 的差值。

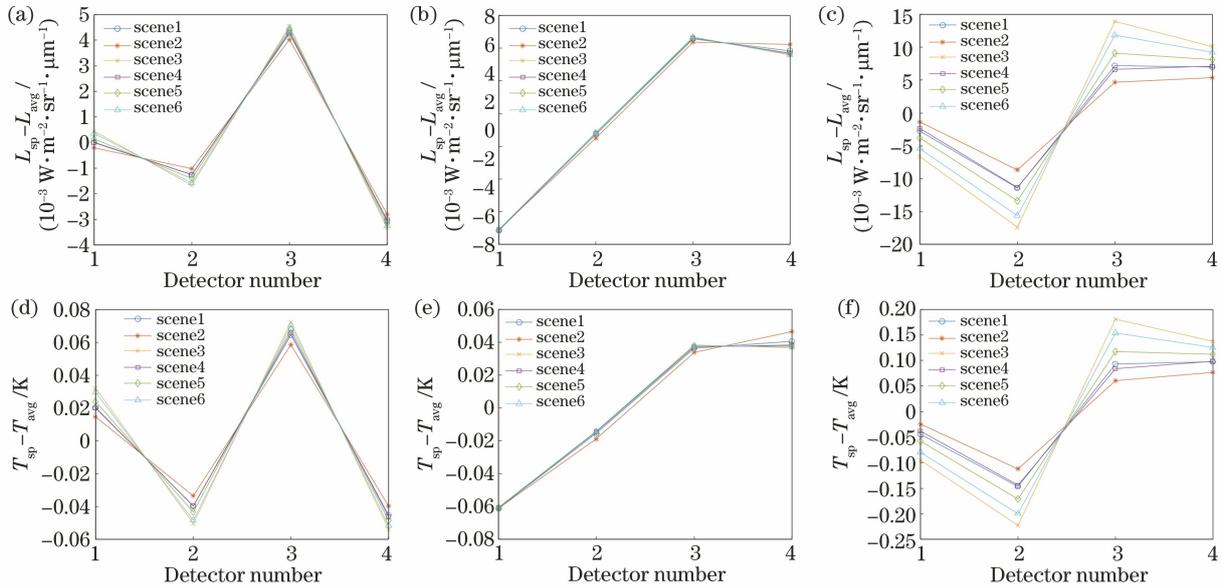


图 5 基于仿真的地球场景辐射谱计算得到的 AGRI 各像元的平均光谱辐亮度差异及反演的亮温差异。

(a)(d) Band9; (b)(e) Band10; (c)(f) Band14

Fig. 5 Average spectral radiance difference and inverted brightness temperature difference of each pixel of AGRI calculated based on simulated Earth scene radiation spectra. (a)(d) Band9; (b)(e) Band10; (c)(f) Band14

通过对计算结果进行分析,可以得出以下两个结论:

1) 像元之间的辐亮度差异量在不同的目标辐射谱下不同。从仿真的目标辐射谱可以看出,不同目标的辐射谱幅值和形状均存在差异,当目标辐射谱曲线在 RSR 的谱段范围内幅值较小且没有丰富的结构特性时,如高空云层[图 4(b)下方谱线],计算得到的各像元平均光谱辐亮度差异则较小;而当目标辐射谱幅值较大且结构特征较丰富时,如热带晴空下的 330 K 地表[图 4(a)上方谱线],计算得到的各像元辐亮度差异较大。

2) 对于不同场景的辐射谱,各像元的辐亮度大小相对关系总体呈现相似的趋势。仿真生成 210 组目标辐射谱,从在通道内针对不同目标计算的各像元辐亮度可以看出,虽然像元间的差异量大小不同,但像元之间的大小相对关系总体呈现相似的趋势,以 Band14 为例,可以发现其各像元辐亮度从大到小依次为 pixel3、pixel4、pixel2、pixel1。其原因在于:相比于目标辐射谱丰富的结构特性,RSR 是一个相对平滑的带通函数,当对两者进行卷积运算时,相当于利用 RSR 对目标辐射谱进行了一次平滑处理,滤掉了目标辐射谱的结构特性。同时,虽然不同目标的辐射谱具有不同的幅值和结构特性,但是对于绝大多数目标来说,其辐射谱曲线的总体变化趋势是相似的,所以计算得到的绝大多数场景中各像

元的辐亮度的大小相对关系是相似的。

以上仿真分析的结论在 AGRI 实际观测的图像中得到验证,实际成像目标的辐射谱相比于仿真的辐射谱往往具有更丰富的结构特性,并且受其他条带噪声的干扰,所以实际成像中像元之间的差异量会大于仿真的结果。基于以上分析结果,对于 AGRI 像元间光谱响应非均匀性造成的辐亮度图像条带噪声,可以在其辐亮度图像中选取一处合适的所有像元均观测到的场景,得出相对定标系数,然后使用该相对定标系数对全圆盘的图像进行处理,以减小图像中的条带噪声。图 6 为相对辐射定标示意图。

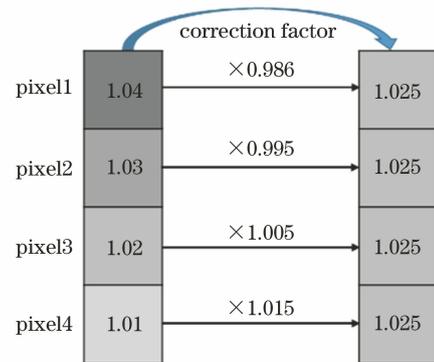


图 6 相对辐射定标示意图

Fig. 6 Schematic diagram of relative radiometric calibration

4 基于均匀场景的相对校正

4.1 均匀场景的选取

AGRI 没有南北扫^[17]的工作模式,但是因为其南北视场较窄;AGRI 的 Band9、Band10 和 Band14 均为 4 像元的线列探测器,星下点的空间分辨率为 4 km。因此可考虑选取某一较小的均匀区域,在该成像区域内,可忽略南北两端像元成像目标的辐射差异。为了使均匀场景的选取更加准确合理,本文首先从图像中寻找一块 60 pixel(东西方向)×60 pixel(南北方向)的较大均匀区域,再选取该区域中间的 40 pixel(东西方向)×40 pixel(南北方向)的区域数据得到相对校正系数。

60 pixel(东西方向)×60 pixel(南北方向)区域由不同扫描行拼接而成,包含了时间维和空间维的两个维度的均匀性评价,使用单一维度的指标来判断整个区域的场景均匀性容易引入误差,而多维度的评价指标又缺乏合理标准。为此,本文将 60 pixel(东西方向)×60 pixel(南北方向)的区域拆分为 4 个像元对应的 4 个 60 pixel(东西方向)×15 pixel(南北方向)子图像,分别评价各子图像的均匀性,如果所有像元对应的子图像均符合均匀性要求,则认为整体图像所对应的成像区域是均匀的。

子图像的均匀性要求为其标准差(STD)小于该像元 3 倍的噪声等效辐亮度:

$$S_{TD_{area}} \leq 3N, \quad (7)$$

式中: $S_{TD_{area}}$ 为区域数据的标准差; N 为噪声等效辐亮度,其值为星上黑体观测信号的标准差乘以定标系数。

利用最终选取的扫描区域 40 pixel(东西方向)×40 pixel(南北方向),计算得到相对校正系数 g_i 为

$$g_i = \frac{\bar{L}_{Band}}{\bar{L}'_i}, \quad (8)$$

式中: \bar{L}_{Band} 为选取区域所有 40(东西方向)×40(南北方向)个采样点的均值; \bar{L}'_i 为选取区域内第 i 个像元的子图像 40(东西方向)×10(南北方向)个像素的均值。

将各像元的相对定标系数乘以其对应的原始辐亮度值 L_i , 得到该像元校正后的辐亮度值 L'_i :

$$L'_i = L_i g_i. \quad (9)$$

本文方法的相对定标系数获取的频率为每全圆盘周期一次,即当时次图像得到的校正系数用来处理当时次的全圆盘图。对多个时次(包括 UTC 2019-03-15T05:00:00, UTC 2019-12-09T05:00:00,

UTC 2020-05-12T02:00:00, UTC 2020-06-02T04:00:00 等 4 个时次)的图像进行了实验,针对每个时次的图像,选取了多个场景,分别获取相对校正系数,以验证并选取最佳场景。结果表明由不同场景得到的相对校正系数具有不同的校正效果,其中选取星下点附近的无云海面计算的相对系数具有较好的校正效果。其原因主要有两点:1)从第 2 节中仿真的各目标辐射谱可知,无云地表目标相比于云层目标,其辐射谱具有更大的幅值和更丰富的结构特性,利用其得出的相对校正系数能抑制大部分场景中像元之间的差异;2)星下点附近的宽阔海面均匀性通常要优于其他场景,利用其得出的像元间相对系数将更加准确。

4.2 条带噪声抑制效果

AGRI 三个波段的条带噪声抑制效果不同,总体而言, Band10 和 Band14 的抑制效果较好,而 Band9 图像质量无明显改善。4 个时次的图像数据呈现相同的处理效果,表明本文方法具有良好的时间稳定性,本文中仅展示并分析 UTC 2019-03-15T05:00:00 时次的图像数据。图 7(a)~(c)分别为 Band9、Band10、Band14 原始的全圆盘图像,图 8(a)~(c)为利用本文方法处理后的辐亮度图像(图中小方框标注的是用于计算相对系数的均匀场景)。从图 7、8 可以看出,相对校正系数在 Band10 和 Band14 具有较明显的条带噪声抑制效果,相比校正前,校正后 Band9 图像几乎没有改善。图中用大方框标注并放大展示了 4 个局部区域图像,以观察对比图像细节。4 个局部区域具有不同的空间位置及辐射特性,并且 4 个区域对应的采集时间处于 1 幅全圆盘图观测周期的不同时间点,对比图 7 和图 8 可以看出,本文方法具有良好的空间(场景)适用性和良好的时间适用性。

图像均匀区域的行平均值曲线的离散程度^[11]可以反映图像的条带噪声强度。分别选取三个通道校正前后图像中 100 pixel×100 pixel 的均匀区域,其对应的行平均值曲线如图 9 所示。

计算各通道校正前后行平均值曲线的标准差,结果如表 1 所示,可以看出本文方法对 Band10 和表 1 校正前后图像的行平均值曲线的标准差对比

Table 1 Comparison of standard deviations of row mean value curves before and after correction

Band name	Standard deviation	
	Before correction	After correction
Band9	0.0211	0.0210
Band10	0.0314	0.0223
Band14	0.0902	0.0487

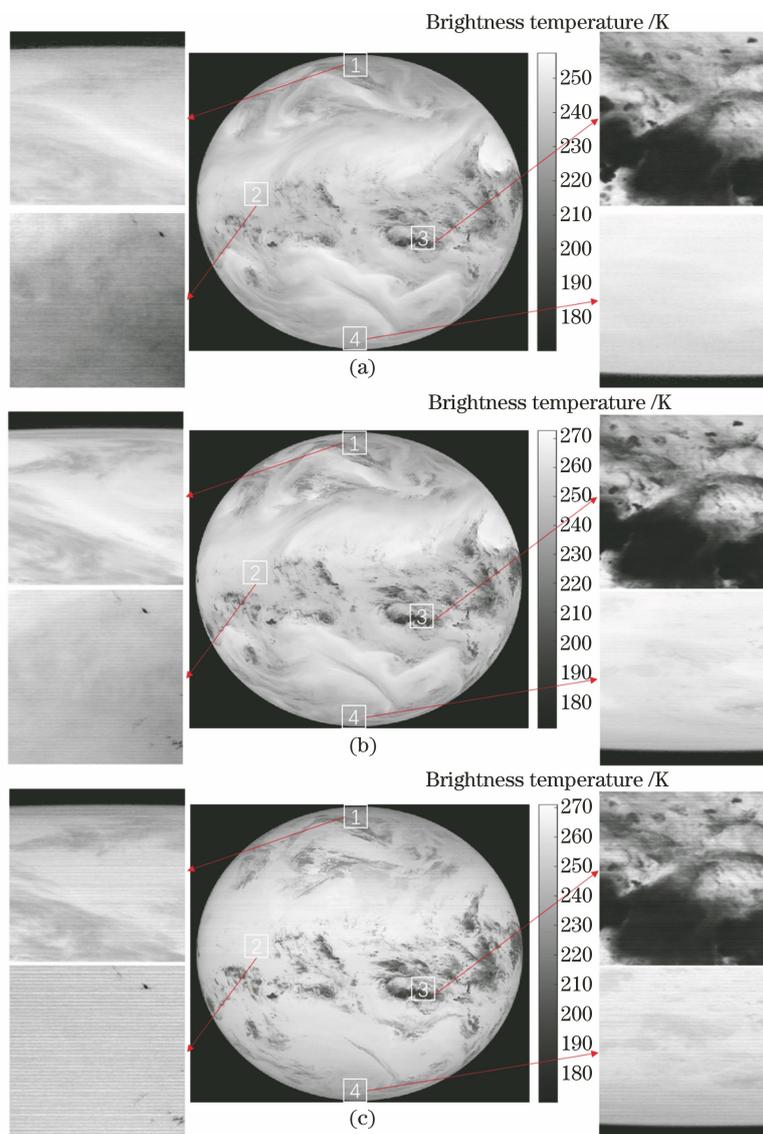


图 7 UTC 2019-03-15T05:00:00 时次校正前的全圆盘图像及局部放大图像。(a) Band9;(b) Band10;(c) Band14

Fig. 7 Full disk images and local enlarged images before correction at 5:00:00, March 15, 2019.

(a) Band9; (b) Band10; (c) Band14

Band14 图像的条带噪声有较明显的抑制效果,但对 Band9 图像的抑制效果则不明显。

使用条带系数 S_i ^[8] 比较校正前后辐亮度图像均匀区域的条带噪声强度:

$$S_i = \frac{\left| \bar{L}_i - \frac{1}{2}(\bar{L}_{i-1} + \bar{L}_{i+1}) \right|}{\bar{L}_i}, \quad (10)$$

式中: \bar{L}_i 为选取区域某一行像素所有采样点的辐亮度均值; \bar{L}_{i-1} 、 \bar{L}_{i+1} 分别为前后相邻两行的辐亮度均值。图 10 展示了 Band9、Band10 及 Band14 三个波段的局部图像在校正前后的条带系数。从实验结果可以看出:基于均匀场景的相对定标方法较明显地改善了 Band10 和 Band14 图像中的条带噪声,而

对 Band9 的改善效果不明显。

三个波段呈现不同的条带噪声抑制效果与三个波段的像元低频噪声强度有关,像元低频噪声也是造成 AGRI 条带噪声的原因之一^[11]。三个波段中, Band9 中低频噪声造成的条带噪声大于像元间光谱响应非均匀性造成的条带噪声,因此本文方法不能有效抑制 Band9 图像中的条带噪声。Band10 和 Band14 中低频噪声造成的条带噪声小于像元间光谱响应非均匀性造成的条带噪声,因此本文方法有效。但因为 Band10 和 Band14 两个通道的低频噪声的绝对强度不同,所以在经相对定标处理后的效果有所不同:Band10 低频噪声较弱,所以经本文方法处理后的残余条带噪声较小,而 Band14 低频噪

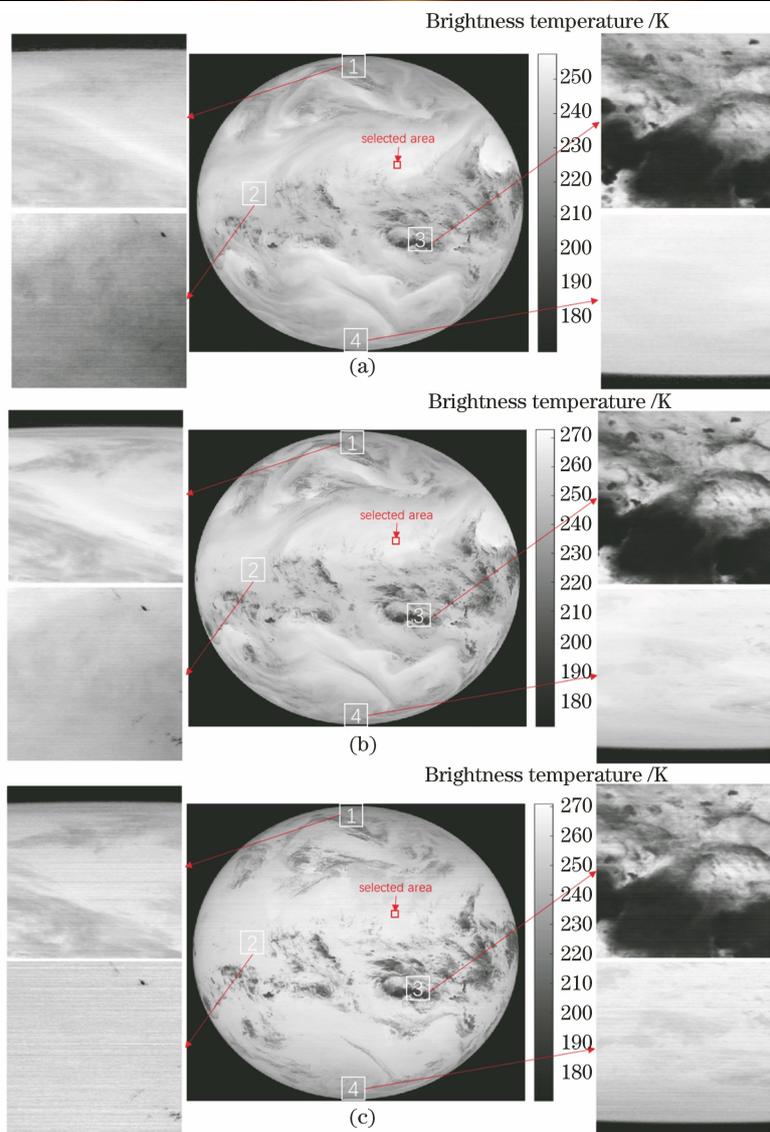


图 8 UTC 2019-03-15T05:00:00 时校正后的全圆盘图像及局部放大图像。(a) Band9;(b) Band10;(c) Band14

Fig. 8 Full disk images and local enlarged images after correction at 5:00:00, March 15, 2019.

(a) Band9; (b) Band10; (c) Band14

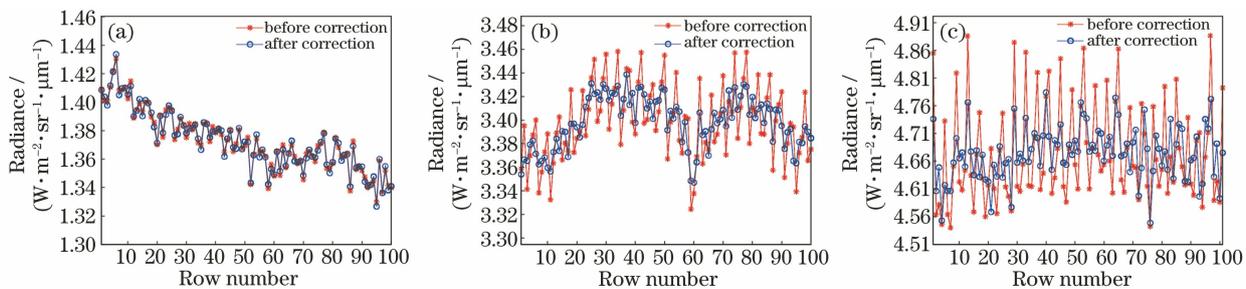


图 9 各通道图像的行平均值曲线。(a) Band9;(b) Band10;(c) Band14

Fig. 9 Mean curves of row of each channel image. (a) Band9; (b) Band10; (c) Band14

声较强,残余相对较强的条带噪声。

5 结 论

AGRI 三个长波波段辐亮度图像中的条带噪声

与其通道内像元间光谱响应非均匀性有关。虽然不同观测目标的辐射谱不同,但在通道内计算得到的各像元的平均光谱辐亮度的大小相对关系呈现相似的规律;基于此理论依据,提出了一种基于均匀场景

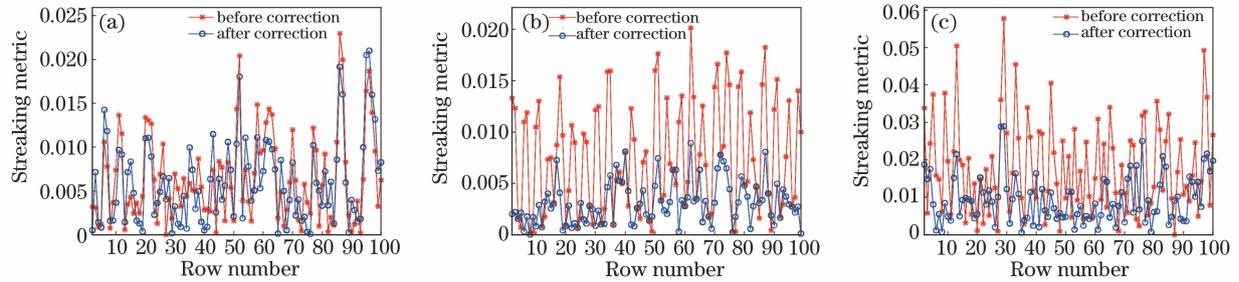


图 10 各通道图像的条带系数曲线。(a) Band9;(b) Band10;(c) Band14

Fig. 10 Streaking metric curves of each channel image. (a) Band9; (b) Band10; (c) Band14

的相对辐射定标方法。实验结果表明,本文方法将 Band10 原辐亮度图像中行平均值曲线的标准差由 0.0314 减小至 0.0223, Band14 的标准差由 0.0902 减小至 0.0487, 具有较明显的条带噪声抑制作用。基于均匀场景的相对辐射定标方法可有效抑制 AGRI 长波红外通道像元间光谱响应非均匀性造成的条带噪声, 但该方法不适用于抑制由像元低频噪声造成的条带噪声。

参 考 文 献

- [1] Yang J, Zhang Z Q, Wei C Y, et al. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(8): 1637-1658.
- [2] 陈博洋, 吴琼, 冯绚, 等. FY-4A 多通道扫描辐射成像仪评价与图像合成 [J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(4): 411-415.
Chen B Y, Wu Q, Feng X, et al. On-orbit test to FY-4A AGRI and generating RGB image [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(4): 411-415.
- [3] Zhu J, Shu J, Guo W. Biases characteristics assessment of the advanced geosynchronous radiation imager (AGRI) measurement on board Fengyun-4A geostationary satellite [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 2871.
- [4] Zhong B, Ma Y B, Yang A X, et al. Radiometric performance evaluation of FY-4A/AGRI based on Aqua/MODIS [J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1859.
- [5] 段依妮, 张立福, 晏磊, 等. 遥感影像相对辐射校正方法及适用性研究 [J]. *遥感学报*, 2014, 18(3): 597-617.
Duan Y N, Zhang L F, Yan L, et al. Relative radiometric correction methods for remote sensing images and their applicability analysis [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(3): 597-617.
- [6] 师英蕊, 姜洋, 李立涛, 等. 光学卫星常态化相对辐射定标方法研究 [J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(12): 2410-2424.
Shi Y R, Jiang Y, Li L T, et al. The research on normalized radiometric calibration method of optical satellite [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(12): 2410-2424.
- [7] Chen B Y, Feng X, Wu R H, et al. Adaptive wavelet filter with edge compensation for remote sensing image denoising [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 91966-91979.
- [8] 徐泽林, 路东明, 王利平, 等. 利用灰度差估计的条纹非均匀性校正方法 [J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 0511001.
Xu Z L, Lu D M, Wang L P, et al. Fringe non-uniformity correction method based on gray difference estimation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 0511001.
- [9] 李凯, 李文力, 韩昌佩. 基于 L1 范数优化模型的遥感图像条纹去除方法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2021, 40(2): 272-283.
Li K, Li W L, Han C P. The method based on L1 norm optimization model for stripe noise removal of remote sensing image [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(2): 272-283.
- [10] 李文力, 李凯, 彭迪, 等. AGRI 遥感图像中条带噪声的分析与去除 [J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1228004.
Li W L, Li K, Peng D, et al. Analysis and removal of stripe noise in AGRI remote-sensing images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1228004.
- [11] 许和鱼, 张黎明, 李鑫, 等. 基于太阳漫反射板线阵 CCD 相对辐射定标方法研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0628002.
Xu H Y, Zhang L M, Li X, et al. A relative radiometric calibration method based on solar diffuser research for a linear array CCD detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0628002.
- [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] Gerace A, Schott J, Gartley M, et al. An analysis of

- the side slither on-orbit calibration technique using the DIRSIG model [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6 (11): 10523-10545.
- [14] Casey J, Padula F, Cook M, et al. Characterization of GOES-16 ABI detector-level uniformity from post-launch north south scan collections of several earth targets [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10764: 107640D.
- [15] Cook M, Padula F P, Pogorzala D, et al. Reflective solar band striping mitigation method for the GOES-R series advanced baseline imager using special scans [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2020, 14: 032409.
- [16] Chen C C, Wang M, Pan J. An improved side-slither method for on-orbit relative radiometric calibration [M] // Urbach H P, Zhang G J. 3rd International Symposium of Space Optical Instruments and Applications. Springer Proceedings in Physics. Cham: Springer, 2017, 192: 351-359.
- [17] Padula F, Pearlman A, Pogorzala D, et al. Introducing ABI North South scans for post-launch validation [C] // Oral Presentation at 13th Annual Symposium on New Generation Operational Environmental Satellite Systems, January 25, 2017, Washington, DC, USA. New York: American Meteorological Society, 2017.
- [18] Efremova B, Pearlman A J, Padula F, et al. Detector level ABI spectral response function: FM4 analysis and comparison for different ABI modules [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9972: 99720S.
- [19] Montanaro M, Reuter D C, Markham B L, et al. Spectral analysis of the primary flight focal plane arrays for the thermal infrared sensor [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8048: 804816.
- [20] Schott J R. Remote sensing: the image chain approach [M]. Oxford: Oxford University Press, 2007.