

一种利用恒星进行遥感卫星辐射定标的方法

许春^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083;
2. 上海天文台—上海技术物理研究所 红外天文技术联合研究中心, 上海 200030)

摘要: 恒星巡天测量与模型分析显示大量恒星在 0.3~35 μm 波段内的绝对辐射精度达到 3%, 在可见光波段接近 1%. 恒星与恒星之间的相对辐射定标精度优于 0.2%. 部分恒星具有极好的辐射稳定性, 可以作为长期稳定的辐射基准. 但是恒星有效亮度通常比地面目标低几个量级, 并且恒星一般不会直接出现在遥感卫星视场, 不利于用作定标源. 这里讨论的利用恒星进行辐射定标的方法是在遥感卫星上安装一个与遥感相机波段接近的微型定标相机, 它的指向可以通过转动机构在恒星与地面目标之间转换. 在观测恒星时通过延长积分时间来获取高信噪比信号, 在观测地面目标时由于和遥感相机同时同视场观测有利于精确交叉定标. 这个方法可以将作为标准源的恒星辐射直接传递到观测目标. 目前分析显示最佳定标精度可以达到 2% 以内.

关键词: 辐射定标; 恒星; 遥感卫星

中图分类号: P715.6 **文献标识码:** A

A flux calibration method for remote sensing satellites using star flux

XU Chun^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Joint Center of SHAO and SITP for Infrared Astronomical Instrumentation,
Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: Star surveys and model analyses show that many stars have absolute stable fluxes as good as 3% in 0.3~35 μm wavebands and about 1% in the visible wavebands. The relative flux calibrations between stars are better than 0.2%. Some stars have extremely stable fluxes and can be used as long term flux calibration sources. Stellar brightness is several orders of magnitude lower than that of most ground objects. However, the stars do not usually appear in remote sensing cameras, which makes the stars inappropriate for being calibration sources. The calibration method using stars discussed in this paper is through a mini-camera attached to remote sensing satellite. The mini-camera works at similar wavebands as the remote sensing cameras and it can observe the stars and the ground objects alternatively. High signal-to-noise ratio is achieved for the relatively faint stars through longer exposure time. Simultaneous precise cross-calibration is obtained as the mini-camera and remote sensing cameras look at the ground objects at the same time. The fluxes from the stars used as calibration standards are transferred to the remote sensing cameras through this procedure. Analysis shows that a 2% accurate calibration is possible.

Key words: flux calibration, stellar, remote sensing satellite

PACS: 07.60.Dq

引言

遥感卫星在地理、地质、资源、气候等研究领域以及农业、气象、军事等应用领域发挥着至关重要的作用。遥感卫星资料的定量化应用是现代空间遥感仪器研究的重点,其中一个关键的环节是遥感卫星的辐射定标。辐射定标是将遥感仪器的输出数据与被观测目标的辐射强度建立一一对应关系的过程。由于辐射测量中涉及的物理过程和干扰因素较多,在轨工作时环境温度与太空辐照变化复杂,因此辐射定标一直是遥感卫星面临的难题。目前国际上空间遥感仪器辐射定标精度最优达到2~3%的水平,很少能突破1%^[1]。国内空间载荷的定标精度稍低一些,如高分一号卫星宽视场成像仪辐射不确定度约5.3%^[2],资源卫星三号在可见光波段定标误差为4.7%^[3],海洋卫星HY-1A实验室定标数据误差高达25%因此只能借助交叉定标来完成数据标定^[4]。一些特定的研究领域,如气候的长期变化,太阳辐射长期缓慢变动对地球气候、地理地质环境的影响等,不但需要精准的辐射定标来确认,更需要长期不变的稳定辐射基准。

实现高精度辐射定标需要解决两方面的问题,一是精确稳定的定标源,二是合理的定标方法。人工制造的定标源如定标灯、黑体、标准探测器等一般都有在轨性能衰减问题;外部定标源如地面定标场、太阳、月亮,除了自身亮度不确定,还存在亮度匹配、可观测性等问题。例如可见光波段通常采用漫反射板反射太阳光进行定标,太阳辐射不确定度在3%左右^[5],漫反射板会有在轨性能衰减问题。利用月亮定标,月亮辐射亮度由于受到太阳照射角、月相、卫星相对位置等因素的影响,精度的不确定度达到10%左右^[6]。郭强等^[7-8]等利用月亮对风云二号气象卫星进行辐射定标,在红外波段取得了1~3.5 K(相当于5~17%误差)的精度。使用地面定标场定标^[2,9],除了定标场辐射测量的精度存在误差外,大气对辐射传输的影响也存在很多不确定性。利用其它卫星的交叉定标^[4],定标精度首先取决于其它卫星载荷自身的精度,其次受到对定标目标区域观测的同时性、方向性以及观测波段的一致性影响。以上提到的大多定标方案都不是随时随地可以执行的,需要等待定标的机会。很多在轨定标工作都会占用遥感仪器的工作时间。

这里我们提出一种利用恒星进行空间遥感卫星辐射定标的新方法。通过该方法可以将微弱但是稳

定的恒星辐射传递到地面目标上,实现精确的辐射定标。定标与遥感相机常规工作过程互不干扰,定标不占用遥感相机的工作时间。这个定标方法与遥感卫星现有定标技术相对独立,既可以作为一种单独的定标方法使用,也可以作为目前卫星定标方法的补充。特别是希望这个定标方法能够协助提高我国卫星的辐射定标精度。以下章节我们将详细讨论定标方法及其在各个环节上的误差传递。

1 利用恒星定标的问题与解决方案

利用恒星进行辐射定标的方法目前主要在天文卫星和天文观测上使用,对地遥感卫星直接利用恒星进行定标的例子较少,这主要由于以下几个方面的原因:1)对于角分辨率不太高的光电载荷,大多数恒星的亮度一般都比地面目标亮度低几个量级,得不到足够的信噪比用于定标;2)一般遥感卫星是对地定向的,观测恒星不方便;3)大多数恒星的亮度测量都在天文研究关注的波段上进行,这些波段与遥感卫星对地观测波段一般不重合;4)恒星是典型的点源目标,它们的立体角一般比相机的点扩散函数和像元分辨率小得多,被观测的地面景物是扩展目标,一般充满多个像元,辐射定标中如何准确换算两者关系也是一个需要克服的问题。

天文星表一般采用星等来标定恒星亮度,星等实质上是远处恒星在观测者处的照度。恒星是点目标,照度用 W/cm^2 来计算;地面景物是扩展目标,亮度用 $W/cm^2/srd$ 来标注,扩展目标亮度乘以它对观测者张开的立体角就是它的照度。如果只考虑落到单个相机像元的照度,扩展目标的有效立体角就是像元分辨率。表1分别计算了在可见光波段(0.5 μm)和红外波段(5 μm)光学系统在不同地面分辨率时看到的地面目标与恒星亮度的比较。只有当对地遥感相机分辨率非常高时,地面目标对遥感相机的照度与常见的恒星亮度相当。一般情况下遥感仪器地面分辨率都大于5",只有极少数恒星达到对应亮度。恒星比需要观测的地面目标暗得多,带来两方面的问题。一是恒星信噪比太小会引入很大的统计误差,二是恒星亮度太低导致曝光严重不足,如果探测器有非线性效应还会引入额外误差。我们将采用的定标方法通过延长对恒星曝光的时间来减小这两个误差来源。

遥感卫星大多对地定向,观测恒星不方便,因此一般情况下遥感卫星不选择采用恒星进行辐射定标。目前也只有极少几颗空间分辨率高并且能够机

表 1 像元分辨率及像元接受到地表辐射强度与恒星亮度的比较

Table 1 Comparison of the ground brightness per pixel with stellar brightness

可见光 0.5 μm , 反照率 36%		红外 5 μm , 280 K 地表辐射	
像元分辨率	星等	像元分辨率	红外 AB 星等
5"	-1.5	5"	-0.8
3"	-0.3	3"	0.3
1"	2.1	1"	2.7
0.5"	3.6	0.5"	4.2
0.3"	4.7	0.3"	5.3
0.1"	7.1	0.1"	7.7

动转向的遥感卫星如 IKONOS 选择了利用恒星进行辐射定标的方案^[10]. 我们提出的定标方法通过一个二维转动机构, 可以非常方便地在恒星与地面目标之间来回观测.

恒星星表的测量都是集中在天文研究感兴趣波段, 这些观测波段与遥感卫星对地观测波段是不一致的, 即使波段接近也不一定匹配. 想要利用恒星进行遥感仪器辐射定标, 必须获得恒星的全波段精细光谱. 由于大部分恒星都没有高灵敏度高精度的光谱观测数据, 这样的工作需要借助天文学家推算的恒星光谱模型来实现. Kurucz、Castelli 等人^[11-12]针对不同特性和演化的恒星计算了几千个恒星辐射理论模型, 其光谱辐射精度分辨率达到 1/10 000, 光谱覆盖范围涵盖紫外、可见光、红外. 这些恒星理论模型在天文数据分析与标定中应用广泛. 我们将通过每颗恒星的多波段观测数据, 与理论模型进行匹配、选择和参数拟合, 获取每颗定标恒星的全波段光谱.

我们提出的利用恒星进行空间遥感卫星辐射定标的方法, 基本原理如下: 选用一个小口径相机作为定标相机, 通过二维转动机构安装在卫星平台上, 转动机构保证定标相机能在定标恒星与地面遥感目标之间进行切换观测. 定标恒星是一些相对均匀分布在天区的辐射稳定的恒星, 定标相机天空可观测范围内一般有多颗定标恒星因此随时可以进行恒星观测. 定标相机地面观测范围能够覆盖主相机观测范围. 定标相机自身观测视场较小, 但是通过多次不同区域的对地观测, 能够覆盖主相机的整个观测视场. 定标时定标相机先观测恒星, 标校自己的精度, 然后观测遥感卫星的观测目标, 遥感卫星相机通过对定标相机观测点的观测来标定自身精度, 然后遥感卫星相机观测其它目标区域. 实际星上定标工作是个与卫星主相机平行的独立过程. 主相机工作同时, 定标相机不断在定标恒星与地面目标之间来回观测.

某时刻观测哪颗定标恒星完全取决于当时卫星在轨道的位置与此时天空有哪些定标恒星可选择观测. 地面目标观测则不断选择主相机视场的不同区域, 以保证一定时间后定标相机能够覆盖主相机全部观测视场. 定标相机的工作波段选择与卫星遥感主相机工作波段一致或者相近, 可以通过波段准确换算. 定标相机在对地观测和对恒星观测时采用不同的曝光时间以保证两者都有足够的信噪比, 一般情况下观测恒星时需要更长的曝光时间. 定标与遥感相机常规观测是两个平行的工作, 数据可以独立分析, 定标工作可以随时进行且不占用遥感相机的工作时间. 这个定标方法本质上是一个交叉定标, 但是由于定标相机与遥感相机观测时间、观测方向完全一致, 精度比一般的交叉定标高. 下一章我们将分析各个定标环节的精度以确认该方案的可行性.

2 定标各个环节的精度分析

2.1 定标过程中的误差传递

按照以上讨论, 定标可以分为四个过程: 定标相机观测恒星; 定标相机观测地面目标 A; 遥感相机几乎同时观测地面目标 A; 遥感相机观测地面目标 B 或所有 A 以外的区域. 系统的辐射定标精度由区域 B 的测量精度给出.

假设恒星在观测波段附近的光谱为 $F_s(\lambda)$, 目标 A 的光谱为 $F_A(\lambda)$, 目标 B 的光谱为 $F_B(\lambda)$. 假设定标相机的系统光谱响应曲线为 $R_c(\lambda)$, 系统响应率为 α_c ; 遥感相机的系统光谱响应曲线为 $R_r(\lambda)$, 系统响应率为 α_r . 于是我们有:

$$N_c = a_c \int F_s(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda \quad , \quad (1)$$

$$N_{Ac} = a_c \int F_A(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda \quad , \quad (2)$$

$$N_{Ar} = a_r \int F_A(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda \quad , \quad (3)$$

$$N_{Br} = a_r \int F_B(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda \quad , \quad (4)$$

这里 N_c , N_{Ac} 分别是定标相机观测恒星和地面目标 A 的输出; N_{Ar} , N_{Br} 分别是遥感相机观测地面目标 A 和 B 的输出. 这些方程里我们没有加入积分时间项主要因为积分时间测量非常精确, 不会引起相应的测量误差. 对式(1)求微分并计算可以得到:

$$\frac{\delta N_c}{N_c} = \frac{\delta a_c}{a_c} + \frac{\int \delta F_s(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda}{\int F_s(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda} + \frac{\int F_s(\lambda) \delta R_c(\lambda) d\lambda}{\int F_s(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda} \quad , \quad (5)$$

这里 $\delta N_c/N_c$ 是定标相机实际输出值与理论预期值的偏差,也就是观测恒星时的系统精度误差. 这些偏差分别由定标相机系统响应率不确定性 $\delta\alpha_c$, 恒星亮度不确定性 $\delta F_s(\lambda)$ 和光学系统光谱响应曲线不确定性 $\delta R_c(\lambda)$ 导致. 对于公式(2-4)我们也可以得到与式(5)相似的公式(公式未列写,参考式(5)), 分别对应 $\delta N_{Ac}/N_{Ac}, \delta N_{Ar}/N_{Ar}, \delta N_{Br}/N_{Br}$.

$\delta N_c/N_c$ 与 $\delta N_{Ac}/N_{Ac}$ 都是定标相机的输出值与理论值的误差,两者应该在测量误差下相等,于是有:

$$\delta N_{Ac}/N_{Ac} = \delta N_c/N_c + \delta m1 \quad (6)$$

这里 $\delta m1$ 是测量恒星及目标 A 的随机误差,与测量信噪比有关. 多次测量一般可以减小 $\delta m1$. 由式(5-6)等可以得到:

$$\frac{\int \delta F_A(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda}{\int F_A(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda} = \frac{\int \delta F_s(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda}{\int F_s(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda} + \left[\frac{\int F_s(\lambda) \delta R_c(\lambda) d\lambda}{\int F_s(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda} - \frac{\int F_A(\lambda) \delta R_c(\lambda) d\lambda}{\int F_A(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda} \right] + \delta m1 \quad (7)$$

式(7)左侧是定标相机确定的目标 A 辐射亮度平均值的偏差;右侧第一项是恒星亮度不确定带来的误差;括号内第二项是定标相机系统光谱响应曲线不确定性或变化带来的误差,恒星目标与地面目标 A 的光谱越接近,这项贡献就越小;第三项是与信噪比相关的测量误差. 我们同时注意到式(5)中的项 $\delta\alpha_c/\alpha_c$ 消失了,即定标相机自身的系统响应率变化不影响定标.

按照同样的方法我们可以计算遥感卫星相机通过观测 A 点然后标定 B 点的误差. 得到与式(7)相似的公式如下:

$$\frac{\int \delta F_B(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda}{\int F_B(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda} = \frac{\int \delta F_A(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda}{\int F_A(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda} + \left[\frac{\int F_A(\lambda) \delta R_r(\lambda) d\lambda}{\int F_A(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda} - \frac{\int F_B(\lambda) \delta R_r(\lambda) d\lambda}{\int F_B(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda} \right] + \delta m2 \quad (8)$$

式(8)左侧是遥感相机确定的目标 B 的辐射亮度平均值的偏差;右侧第一项是目标 A 亮度不确定性带来的误差;右侧括号内第二项是遥感相机系统光谱响应曲线不确定性或变化带来的误差,由于一般情况下 A、B 两点光谱比较接近,这项会非常小; $\delta m2$

是与信噪比对应的测量误差. 如果遥感相机与定标相机系统光谱响应曲线相同或非常接近,我们可以近似认为右侧第一项与式(7)左侧项相等,即:

$$\frac{\int \delta F_A(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda}{\int F_A(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda} \cong \frac{\int \delta F_A(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda}{\int F_A(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda} \quad (9)$$

于是将式(7)代入式(8)得到目标 B 的定标精度:

$$\frac{\int \delta F_B(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda}{\int F_B(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda} = \frac{\int \delta F_s(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda}{\int F_s(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda} + \left[\frac{\int F_s(\lambda) \delta R_c(\lambda) d\lambda}{\int F_s(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda} - \frac{\int F_A(\lambda) \delta R_c(\lambda) d\lambda}{\int F_A(\lambda) R_c(\lambda) d\lambda} \right] + \left[\frac{\int F_A(\lambda) \delta R_r(\lambda) d\lambda}{\int F_A(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda} - \frac{\int F_B(\lambda) \delta R_r(\lambda) d\lambda}{\int F_B(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda} \right] + \delta m1 + \delta m2 \quad (10)$$

定标的精度主要受恒星辐射精度、定标相机与遥感卫星波段响应曲线变化、测量误差等影响. 式(10)右侧 5 项相对独立,可以看成矢量和. 所以总误差的值实际上应该是右侧 5 项的均方根.

2.2 恒星的辐射精度

我们分析定标恒星自身的辐射精度、稳定性和全波段光谱精度. 恒星星表显示大量的恒星辐射非常稳定,精度达到 1% 左右,是极好的辐射标准源. 1997 年公布的 Hipparcos 星表,包含有近 120 000 颗亮度大于 12 等星的恒星,其可见光宽光谱波段(Hp 波段)辐射测量内部精度优于 0.2%. Hipparcos 星表内每个恒星的亮度是由 Hipparcos 天文卫星在 4 年时间内通过 110 次测量获得的,具有很高的稳定性和稳定性^[13]. 2013 年发射的 GAIA 卫星观测了更暗的天体目标,获得了 5 亿多恒星的观测数据,不同波段辐射精度达到 3~15 毫星等(对应于百分比误差 0.3~1.4%)^[14]. 由于恒星光度测量一般都是通过与标准星比对得到的,因此恒星星表的精度应该理解为恒星光度系统的内部一致性,或者相对精度. 恒星光度与辐射物理量即国际标准辐射单位之间的换算是通过对作为恒星辐射基准的织女星、天狼星等恒星的直接测量实现的,即通过将织女星、天狼星的辐射与 NIST 可溯标准源比对获得的,目前这个确定精度在 0.7~2% 之间^[15-17]. 可以这么认为,恒星作为标准辐射定标源,绝对辐射测量精度在 2% 以内;作为标准辐射基准,绝对误差和长期稳定性在

0.2% 以内. 恒星作为标准辐射定标源的主要误差来源于将实验室 (NIST) 辐射标准传递到恒星辐射的传递过程中. 如果这个传递过程的误差可以减小, 恒星作为绝对辐射标准的误差就可以进一步减小.

除了可见光波段, 恒星在紫外和红外波段也都有很强并且稳定的辐射, 可以作为这些波段的辐射标准. 恒星光谱在 $1.2 \sim 35 \mu\text{m}$ 波段内精度都可达到 3% 以内^[18], 在其中某些波段优于 1%^[19].

我们通过虚拟天文网站 VizieR^[20] 获取恒星在不同波段的观测数据, 一颗恒星在不同波段一般都有几十至上百个来自不同天文观测的数据. 部分观测数据来自空间天文望远镜如 Hubble、Spitzer、IRAS、WISE、AKARI 等, 部分观测数据来自地面望远镜如 2MASS、SDSS 及一些可见光、红外望远镜. 来自地面望远镜的观测数据都通过标准的天文数据分析方法消除了地球大气的吸收效应并换算成了恒星的空亮度. 我们从网络数据库获取了 Castelli & Kurucz 的 4300 个 ATLAS-9 恒星光谱模型和 Kurucz 7600 个 1993 年恒星光谱模型. 不同模型中的固定参数分别是恒星的金属丰度、有效温度和表面重力场, 拟合参数是恒星对观测者的有效立体角. 由于光谱模型是恒星自身辐射, 而地球外太空接收到的星光经历了银河系星际介质的吸收, 必须将这部分星际介质的光谱吸收, 特别是对 $3.3 \mu\text{m}$ 或更短波段星光的吸收考虑到定标用光谱模型内. 我们采用了 Cardelli, Clayton & Mathis^[21] 的银河系稀疏星际介质光谱吸收模型, 对恒星光谱进行了修正, 修正参数是与星际介质吸收模型相乘的一个因子, 在光谱拟合时一起算出. 对每个恒星观测光谱我们分别用这几千个恒星模型光谱加上星际介质进行最小二乘拟合, 最佳拟合结果选作该恒星的全波段光谱. 图 1 是对某一恒星光谱的拟合. 按照目前对部分恒星的分析, 拟合后恒星观测数据与模型在不同波段误差一般在 1-5% 之间, 部分恒星在某些波段的误差可高达 20% 或更多. 这部分较大误差主要来源是由于在相近波段不同实际观测数据之间的不一致性. 这种不一致性可能来源于不同仪器之间的不同标定, 也可能来源于某些恒星的亮度波动, 或者恒星模型只适合部分波段的光谱拟合等, 需要进行更深入的研究. 如果对恒星光谱进行分波段拟合, 不同波段之间的误差也会显著减小, 有些恒星多波段分段拟合基本能达到接近 1% 的水平. 定标恒星选择、恒星光谱拟合、恒星光度稳定性确认是一项细致而长久的工作, 我们将在另一篇论文里更加全面地讨论这个问

题和许多技术细节, 并给出一个覆盖全天空可以用于辐射定标的恒星星表.

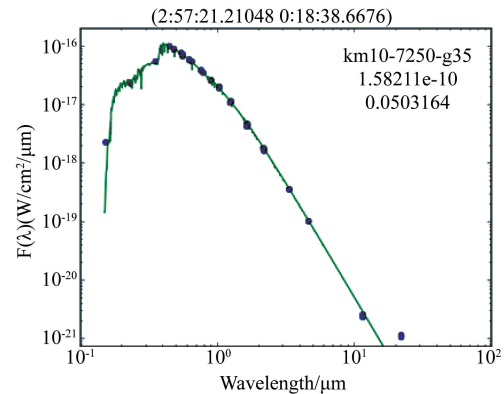


图 1 对恒星 (ICRS J2000 坐标为 2: 57: 21. 21 0: 18: 38. 668) 的光谱拟合. 图中圆点为不同波段测量值, 实线为光谱理论模型. 图右上三个数据分别为理论模型名称, 拟合得到的恒星立体角和星际介质吸收参数

Fig. 1 The fitting to one star's spectrum (Star's ICRS J2000 coordinate is 2: 57: 21. 21 0: 18: 38. 668). The circles are observational data at different wavelengths, the thick line is theoretical model. The three numbers in the upper right corner of the figure are model name, effective solid angle of the star and absorption coefficient, respectively

利用恒星进行辐射定标时, 由于恒星分布在天空不同地方, 一般会采用多颗恒星进行辐射定标. 假设采用 N 颗恒星进行辐射定标, 第 i 颗恒星的亮度为 $S_i \pm \delta S_i$, 精度可以记为 $\sigma_i = \delta S_i / S_i$, 定标过程中这颗恒星作为标准源观测了 n_i 次. 如果这 N 颗恒星的辐射误差都是独立的, 那么这 N 颗恒星一起作为一个定标系统, 它们给出的误差比单颗星的误差是大还是小呢?

辐射定标需要确定的值是相机对入射光强的等效响应率. 对于辐射精度为 σ 的恒星, 能测定的最好响应率精度就是 σ . 选择上述的 N 颗恒星, 第 i 颗恒星的精度是 σ_i , 定标时第 i 颗恒星观测了 n_i 次, 那么总的观测次数为

$$n_i = \sum_{i=1}^N n_i, \quad (11)$$

总的观测误差为

$$e_i = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N n_i \sigma_i)(\sum_{j=1}^N n_j \sigma_j)}{\sum_{i=1}^N n_i^2 \sigma_i^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N n_i^2 \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^N n_i^2 \sigma_i^2}}, \quad (12)$$

计算中用到了 $\sigma_i \sigma_j = \delta_{ij} \sigma_i^2$, 即同一恒星的协方差就是它自己, 不同恒星之间的互协方差由于是独立的

所以为 0. 于是 N 颗定标星组作为一个定标源, 在每颗恒星被观测 n_i 的情况下, 系统精度为

$$err = \frac{e_i}{n_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N n_i^2 \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^N n_i}} \quad (13)$$

这个结论与常识是符合的. 如果观测中只看第 i 颗恒星, 即只有一个 n_i 不等于 0, 系统精度就是该恒星的精度 σ_i ; 如果每颗恒星只看一次, 即所有 n_i 均为 1, 那么精度为 $\sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2} / N$. 假设每颗恒星精度都是 σ , 那么系统精度就是 σ / \sqrt{N} , 精度提高了 \sqrt{N} 倍.

对于选定的恒星组作为定标源, 怎样选择对每颗恒星的观测次数 n_i 才能最好地提高定标源的精度呢? 定标源精度最佳时其导数为 0, 即

$$\delta err = \delta \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N n_i^2 \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^N n_i}} \right) = \delta \left(\sqrt{\sum_{i=1}^N n_i^2 \sigma_i^2 / n_i} \right) = 0 \quad (14)$$

假设观测总次数 n_i 恒定, 那么我们只要求解

$$\delta \sum_{i=1}^N n_i^2 \sigma_i^2 = \sum_{i=1}^N 2n_i \delta n_i \sigma_i^2 = 0 \quad (15)$$

另一方面, 由 n_i 恒定可以得出

$$\delta \sum_{i=1}^N n_i = \sum_{i=1}^N \delta n_i = 0 \quad (16)$$

由式(15-16)可以看出, 只要满足 $n_i \sigma_i^2 = \text{常数}$, 式(15)就成立, 于是就能得到最小系统误差. 换言之, 恒星组中精度高的恒星观测次数多一些, 精度差的恒星观测次数少一些, 只要满足 $n_i \sigma_i^2 = \text{常数}$, 就能得到最小定标源误差. 将 $n_i \sigma_i^2 = \text{常数}$ 代入系统误差公式(14)得到最小定标源系统误差为

$$err_{sys} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\sigma_i^2} \right)}} \quad (17)$$

如果所有定标恒星的精度都是 σ , 那么系统精度就是 σ / \sqrt{N} , 与式(13)计算一致.

2.3 恒星标定地面景物的精度

按照前面讨论, 在遥感卫星上安装一个能够在恒星与地面目标之间转换观测的小型定标相机, 就可将恒星辐射标准转换到地面目标. 定标相机观测恒星目标时的信噪比可以参考哈勃望远镜由这个公式给出^[22]

$$SNR = \frac{f_\lambda \cdot A \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta t \cdot q_o \cdot q_e}{\sqrt{(f_\lambda + \Omega_{npix} \cdot (I_{sky} + I_{ins})) \cdot A \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta t \cdot q_o \cdot q_e + n_{pix} \cdot I_{dark} \cdot \Delta t + n_{pix} \cdot N_{read}^2}} \quad (18)$$

这里 f_λ 是恒星单位波长的亮度(照度), A 是定标相机的有效面积, $\Delta\lambda$ 是工作波段宽度(如果是宽波段

我们可以将乘积改为积分), Δt 是积分时间, q_o 是定标相机光学效率, q_e 是探测器的量子效率, Ω_{npix} 是在孔径测光^[23]时包括恒星目标的孔径内所有像元对天区所张的立体角, I_{sky} 是背景天光亮度, I_{ins} 是相机自身的背景辐射(主要用于红外波段, 与相机温度有关), n_{pix} 是恒星孔径内的像元数, I_{dark} 是以电子数/秒为单位的像元暗电流, N_{read} 是以电子数为单位的单像元读出噪声. 假设在可见光 $0.5 \mu\text{m}$ 波段, 波带宽度为 $0.2 \mu\text{m}$, 定标相机口径 5 cm , 探测器采用小型面阵, 瞬时视场 $5''$, 读出噪声 20 电子, 暗电流 10 电子/秒, 天光背景为 22 等星/平方角秒, 目标所在孔径内有 16 个像元, 那么定标相机在 5 s 曝光时间下能以信噪比 250 左右探测到 8.3 等星. 从信噪比推算定标相机对恒星辐射的单个测量精度优于 0.4% . 要达到同样的信噪比, 对地面目标(见表 1 约 0 等星)观测时间大约是 5 ms . 定标相机安装在二维转台上, 按照目前可见光技术水平曝光时间精度优于 $1 \mu\text{s}$, 转台指向精度优于 $10''$, 稳定性为观测时间内优于 $5''$ 很容易实现, 也就是这样的可见光定标相机的研制在技术上不是难题. 对于红外波段, 国外的红外探测器一般也能满足暗电流和读出噪声的要求, 国内没有相应的红外探测器. 在较长的红外波段, 定标相机可能需要整体制冷才能达到很小仪器背景的需求.

辐射定标的核心问题是确定定标相机对入射光的等效响应率. 观测恒星时恒星是个点目标源, 一般采用天文数据处理时常用的孔径测光方法^[23]来测量其亮度. 在形成的星图相片上围着恒星画一圆圈, 圆圈大于相机点扩散函数, 测量其中所有像元的亮度或输出数据. 在此圆外附近没有目标处画一环形区域, 测量像元平均量度即背景辐射. 将圆内总亮度减去圆内像元数与背景辐射的乘积便得到对应恒星的输出, 恒星亮度与这个输出之比就是等效响应率. 这个响应率的测量误差来自恒星亮度测量的信噪比, 如上述条件下恒星亮度信噪比为 250 对应的精度就是 0.4% . 在进行这些计算前我们假定定标相机每个像元的暗电流预知并已扣除, 像元的响应率非均匀性已经校正. 像元的暗电流和响应率非均匀性都可以在地面测试时进行测量. 由于定标相机比较小, 可以在轨安装小面源进行相机非均匀系数测量和修正; 如果没有在轨面源进行非均匀校正, 也可以利用夜间对地球表面长时间曝光获得非均匀性参数. 这后一类方法哈勃望远镜曾经使用过^[24]. 一般情况下非均匀性校正可以达到 0.5% 或更好. 如

果探测器暗电流远小于光源亮度(这在可见光波段可行,红外波段国外探测器可行),即使没有在轨定标,使用地面测量的暗电流数据也不会造成影响.总体来说,对于确定精度的恒星,利用定标相机对地面目标定标这个过程带来的误差一般不会超过 1%.当然,这个定标过程的实际精度还取决于定标相机的研制工艺.

定标相机在轨工作时存在性能衰减等问题.性能衰减最终表现为非均匀性系数变化和等效响应率变化.非均匀性系数变化可以通过上述提到的非均匀系数测量校正方法来修正.等效响应率变化表现为对于相同的辐射输入,定标相机输出值发生了变化.如果定标相机等效响应率变小了,观测同等强度地面目标的输出值就变小;但是观测恒星的输出值也等量变小.因此用恒星辐射亮度来计算地面目标亮度得到的值没有发生变化(参考方程 7 及相应说明).事实上,虽然定标相机等效响应率在轨工作时会发生缓慢变化,只要它在定标过程内相对稳定,这个定标方法就有效,并且基本与定标相机性能衰减无关.

2.4 通过交叉定标对遥感卫星观测目标的标定精度

在遥感卫星正常工作过程中,定标相机不断在定标恒星与地面目标之间来回观测.由于定标相机视场较小,它每次观测的地面目标一般是遥感卫星观测的地面目标的一个局部.这些局部目标的辐射强度可以通过定标相机精确地标定.如果对定标相机观测的地面目标区域进行恰当的选择,那么一定时间后定标相机观测的区域能够全面甚至多次覆盖遥感相机所有观测像元覆盖的区域,这样就可以利用定标相机对遥感卫星进行全面定标.这个定标过程本质上是定标相机与遥感相机的交叉定标,但是比常见的通过其它卫星的交叉定标精度要高,因为通过其它卫星进行交叉定标对同一目标的观测时间一般是不同的,而目标亮度在这两个时间之间可能会有一个变化.定标相机对遥感相机的交叉定标则是在观测时间和观测方位上完全一致,不存在这种观测时间差带来的误差.如果两台相机波段响应率完全一致,这些定标区域的辐射亮度可以由定标相机直接给出;如果两者波段不完全一致但比较接近,可以通过波段特性进行计算给出.交叉定标过程中的误差精度主要取决于波段误差,一般可以优于 0.5%.

定标相机和卫星主相机的工作波段在轨工作时

可能发生变化.这个变化产生的误差由式(10)右侧括号内的 2,3 项决定.由于一般卫星都无法进行在轨系统波段测量,这个误差无法知道.这是本定标方案其实也是大多星上定标方案需要面对的问题,必须依靠研制工艺来保障.

如果遥感卫星能够直接看到辐射稳定的恒星,在一定条件下也可以利用遥感卫星相机直接观测恒星进行辐射定标,而不必通过定标相机来交叉定标.这些条件包括遥感相机灵敏度高恒星像信噪比高;遥感相机的非均匀性校正非常好因此不需要对每个像元都进行辐射定标.高分辨率卫星 IKONOS 选择了利用恒星进行辐射定标的方案^[10],它与 NASA 团队的定标方案误差约 2.5%.

2.5 利用恒星标定的系统精度

以上分析了利用恒星进行对地遥感卫星定标的精度传递情况.单颗恒星的辐射精度接近 1%,恒星与恒星之间辐射精度一致性优于 0.2%.利用恒星模型进行波段拟合并获得全波段光谱时好的恒星光谱误差在 1~5%,分波段拟合可以在全波段都得到接近 1%误差的光谱.利用 N 颗恒星组合作为定标源,理论上辐射精度可以提高 \sqrt{N} 倍.利用定标相机将恒星辐射传递到地面景物时,误差一般不会超过 1%,这个过程也取决于定标相机的研制能力.利用定标相机标校的地面目标对遥感卫星相机进行定标时,误差一般不会超过 0.5%.将这些误差代入式(10),计算均方根得到 1.5~5.1%,其中我们忽略了在轨波段偏差造成的误差项.总体来说,利用恒星进行对地遥感卫星进行辐射定标,精度可以达到 2~5%的水平,选择最好的恒星可以将精度提到 2%的水平.

3 结论

利用恒星对遥感卫星进行辐射定标,在科学研究和遥感应用领域都有十分重要的意义.1) 恒星作为天然的定标源,其辐射确定精度是目前空间天然目标中最高的,绝对辐射精度接近 1%,恒星与恒星之间辐射精度一致性优于 0.2%,利用我们提出的定标方法原则上可以将辐射定标精度提高到 2%的水平;2) 恒星具有极好的长期稳定性,特别是成百上千颗恒星的平均亮度,长期稳定性更好,可以作为长期稳定的辐射基准,这对于一些特定的科学研究如气候的长期变化,太阳辐射长期缓慢变动对地球气候、地理地质环境的影响等意义重大;3) 恒星光谱覆盖范围宽,从紫外到远红外,包含了对地遥感仪

器的主要波段,利用恒星可以进行大部分波段的辐射定标;4)利用外部目标恒星作为定标源,遥感载荷特别是大口径光电载荷在适当条件下可以节省部分大型定标装置,辐射定标又是一个独立过程,不占用遥感仪器的工作时间.这个定标方法也可以作为目前卫星常规定标方案的一个补充,以增加在轨定标的多样性和可靠性.

References

- [1] Kaiser M E, Kruk J W, McCandliss S R, *et al.* ACCESS: design and preliminary performance [C], SPIE, 2010, **7731**:3IK.
- [2] HAN Qi-jin, Fu Qiao-yan, ZHANG Xue-wen, *et al.* High-frequency radiometric calibration for wide field-of-view sensor of GF-1 satellite[J], *Optics and Precision Engineering* (韩启金,傅俏燕,张学文,等. 高分一号卫星宽视场成像仪的高频次辐射定标. *光学精密工程*), 2014, **22**(7): 1707 - 1714.
- [3] HAN Qi-jin, FU Qiao-yan, PAN Zhi-qiang, *et al.* Absolute radiometric calibration and analysis of ZY-3 using artificial targets[J], *Infrared and Laser Engineering* (韩启金,傅俏燕,潘志强,等. 资源三号卫星靶标法绝对辐射定标与验证分析. *红外与激光工程*), 2013, **42**(S1): 167 - 174.
- [4] PAN De-lu, HE Xian-qiang, ZHU Qian-kun. In-orbit cross-calibration of HY-1A satellite sensor COCTS [J], *Chinese Science Bulletin* (潘德炉,何贤强,朱乾坤. HY-1A 卫星遥感器水色水温扫描仪在轨交叉定标. *科学通报*), 2004, **49**(21): 2239 - 2244.
- [5] Thuillier G, Herse M, Labs D, *et al.* The Solar Spectral Irradiance from 200 to 2400 nm as Measured by the Solspec Spectrometer from the ATLAS and EURECA Missions[J]. *Solar Phys.*, 2003, **214**:1 - 22.
- [6] Stone T C, Kieffer H H, Grant I F, Potential for calibration of geostationary meteorological satellite imagers using the Moon[C]. SPIE, 2005:5882 - 5891.
- [7] GUO Qiang, CHEN Bo-Yang, YANG Chang-Jun, *et al.* A new approach of on-orbit radiometric calibration for water-vapor band of FY-2 satellite[J], *J. Infrared Millim. Waves* (郭强,陈博洋,杨昌军,等. 风云二号卫星水汽波段在轨辐射定标新方法. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(6): 523 - 527.
- [8] XU Jian-min, GUO Qiang, LU Qi-feng, *et al.* Innovations in the data processing algorithm for Chinese FY meteorological satellites[J], *Acta Meteorologica Sinica* (许健民,郭强,陆其峰,等. 风云气象卫星数据处理算法的若干创新. *气象学报*), 2014, **72**(5): 1023 - 1038.
- [9] ZHANG Yong, RONG Zhi-guo, MIN Min. Accuracy evaluations of the CRCS in-orbit radiometric calibration methods for thermal infrared channels[J]. *Advances in Earth Science* (张勇,戎志国,闵敏. 中国遥感卫星辐射校正场热红外通道在轨场地辐射定标方法精确评估. *地球科学进展*), 2016, **31**(2): 171 - 179.
- [10] Bowen H S, Absolute Radiometric Calibration of the IKONOS Sensor Using Radiometrically Characterized Stellar Sources[C]. 2002, ISPRS Archives, Volume XXXIV Part 1, Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings.
- [11] Kurucz R, Opacities for Stellar Atmospheres[DB], 1993.
- [12] Castelli F, Kurucz R. Modelling of Stellar Atmospheres [C], IAU Symposium 210, Uppsala, Sweden, eds. 2003, ASP - S210.
- [13] Perryman MAC, The Hipparcos and Tycho Catalogues [C], 1997, ESA Special Publication.
- [14] Luri X, Palmer M, Arenou F, *et al.* Overview and stellar statistics of the expected Gaia Catalogue using the Gaia Object Generator[J], 2014, *A&A*, **566**:119 - 134.
- [15] Smith A W, Woodward J T, Jenkins C A, *et al.* Absolute flux calibration of stars: calibration of the reference telescope[J], *Metrologia*, 2009, **46**:219 - 223.
- [16] Megessier C., Accuracy of the astrophysical absolute flux calibrations: visible and near-infrared[J], *A&A*, 1995, **296**:771 - 778.
- [17] Bohlin R C, Gilliland R L. Hubble Space Telescope Absolute Spectrophotometry of Vega from the far-Ultraviolet to the Infrared[J]. *AJ*, 2004, **127**:3508 - 3515.
- [18] Cohen M, Witteborn F C, Carbon D F, *et al.* Spectral Irradiance Calibration in the Infrared[J], 1996, *AJ*, **112**: 2274 - 2285.
- [19] Price S D, Paxson C, Engelke C, *et al.* Spectral Irradiance Calibration in the Infrared[J], *AJ*, 2004, **128**:889 - 910.
- [20] VizieR Photometry viewer[OL] (虚拟天文台网址). <http://vizier.u-strasbg.fr/vizier/sed/>.
- [21] Cardelli J A, Clayton G C, Mathis J S. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction[J], *ApJ*, 1989, **345**:245 - 256.
- [22] Hubble Space Telescope Exposure Time Calculator[OL] (哈勃望远镜信噪比计算公式). http://etc.stsci.edu/etcstatic/users_guide/1_2_1_snr.html.
- [23] Aperture Photometry Tool[OL]. <http://www.aperturephotometry.org/>.
- [24] Gilmore D, Ritchie C, Mackenty J, *et al.* NIC1 Narrow-band Earth Flats [R], 1998, Instrument Science Report NIC - 98 - 011.