文章编号: 1672-8785(2013)04-0014-04

基于浮空平台的遥感仪器在轨定标技术研究

胡胜敏 王成良 石斌斌 (空军预警学院,湖北武汉 430019)

摘 要:针对传统的卫星在轨定标方法存在的局限性以及适用范围不足等问题,提出 了一种新的基于浮空平台的在轨定标方法,即利用浮空平台搭载镜面阵列,并用后者 反射太阳辐射来对卫星进行定标。建立了基于浮空平台的在轨定标模型,并对其进行 了分析。结果表明,与传统的在轨定标方法相比,该方法具有大气路径短、波段适用范 围广和定标精度高等优势。

关键词: 在轨定标; 大气吸收波段; 浮空平台

中图分类号: TP79 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.04.003

Research on In-orbit Calibration of Remote-sensing Instrument Based on Aerostat

HU Sheng-min, WANG Cheng-liang, SHI Bin-bin

(Air Force Early-Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Because of the limitation and limited usable range of traditional satellite in-orbit calibration methods, a new in-orbit calibration method based on an aerostat is proposed. In the method, the satellite is calibrated via the solar radiation reflected by an aerostat-borne mirror array. An in-orbit calibration model based on an aerostat is established and analyzed. The result shows that compared with the traditional in-orbit calibration methods, this method has the advantages of short atmospheric path, wide wavelength range and high calibration precision.

Key words: in-orbit calibration; atmospheric absorption band; aerostat

0 引言

随着遥感技术在各个应用领域的逐步深入,遥感数据的定量化已经成为遥感技术进一步发展的必然趋势。卫星辐射定标技术是遥感数据定量化应用的前提,它使得同一卫星的多时相数据以及不同卫星之间的数据综合应用成为可能,推动了定量化遥感的发展。高精度辐射定标对定量遥感的发展具有重要意义^[1]。

辐射定标是热红外通道遥感信息定量应用

的基础性问题^[2]。按照任务阶段来划分,在遥 感仪器研制过程中以及研制完成后在地面对其 进行的一系列辐射定标工作一般称为地面辐射 定标(或发射前辐射定标),而在遥感仪器成功 发射并在轨运行后对其进行的辐射定标工作称 为在轨辐射定标(或发射后辐射定标)。

在对对地观测遥感仪器进行在轨辐射定标时,可供选择的定标方法主要包括:一是借助星 上已有的定标装置(采用内定标源或者用漫反射 板反射太阳光)进行定标;二是通过将地物作为

收稿日期: 2013-03-15

基金项目: 空军预警学院科研创新基金项目 (2011ZDJC0101)

作者简介:胡胜敏(1987-),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事红外光电探测及其应用研究。

E-mail: 267213189@qq.com

定标源进行场地定标;三是用已定标且定标结 果很好的在轨遥感仪器对待定标的遥感仪器进 行交叉定标^[1]。

对于空间红外点目标遥感探测系统,可以 使用第一种方法,但对定标源的选取及安装位 置,均需考虑其对系统低温工作环境的影响;应 用第三种方法的前提是在相似的空间轨道上存 在可用的功能相近、性能参数及技术指标类似 的遥感仪器,但对于总体数量相对较少、功能侧 重点不同的红外点目标遥感探测系统,这种方 法目前很难获得应用^[3]。因此,在轨场地定标 现已成为在轨红外辐射定标的有效手段,并且 能够提供比较精确的定标系数^[4]。

在轨场地定标是一种利用地物进行定标的 较为成熟的方法,但由于受卫星轨道、相机幅宽 和大气状况等因素的约束较多,并且需要大量 的人力、物力保障,因此这种方法的定标次数较 少,一年大约1~2次^[5]。另外,对于某些特定 波段,比如 2.7 μm 和 4.3 μm 大气吸收波段,利 用地物进行场地定标并不能满足定标要求。

为此,本文提出一种新的基于浮空平台的 在轨定标方法,以便减小大气状况对在轨定标 的约束,并提高定标次数,从而获得精度更高的 遥感数据。

1 新的在轨定标方法

浮空器包括飞艇和系留气球,而飞艇又包括 遥控飞艇、载人飞艇和平流层飞艇定点平台,它 们都属于轻于空气的航空飞行器,其基本原理 是在软式(或半硬式、硬式)囊体内充入氦气,产 生浮力以克服其质量。飞艇既可以在较大空间 范围内进行机动飞行,也可以在一个固定区域 内定点飞行;系留气球则是通过缆绳固定在空 中的^[6]。总体而言,浮空器主要有以下几个优 点^[7]: (1)滞空时间长; (2)使用成本低; (3) 任务载荷大; (4)生存能力强。

近年来,气球和飞艇等浮空平台发展较快。 浮空平台能够在临近空间进行长期、持续飞行, 具有航空、航天飞行器所不具有的作用,特别是 在通信保障、情报收集、电子压制以及预警等方 面极具发展潜力。因此,可以用浮空平台搭载反 射镜面阵列,使其反射太阳辐射,同时还可以通 过调整反射镜面阵列的角度,将太阳辐射反射至 卫星,使卫星输出相应的信号数据(计数值),如 图1所示。



图 1 通过用浮空平台载镜面阵列反射太阳光来 进行红外在轨定标

太阳与地球相距遥远,太阳光在地球大气 层外的辐射强度是一个已知常量。作为一个随 时间变化非常微小的辐射源,太阳可以用于辐 射定标。考虑大气状况对在轨定标的约束以及对 2.7 μm 和 4.3 μm 大气吸收波段的吸收作用,若 直接从地面反射太阳光,其中大部分能量都会 被大气层吸收,难以发挥定标作用。为了利用太 阳辐射进行在轨定标,可以用浮空平台将镜面 阵列送入高空,避开大气层中最稠密的底层,从 而使反射的太阳辐射能量能够满足定标要求。 反射镜面阵列安装在浮空平台的上方,其镜面 角度可以调整,如图 2 所示。

这种新的在轨定标方法利用浮空平台能够 在临近空间进行长期、持续飞行等特点,避开了 大气层中最稠密的底层,减小了大气状况对在



图 2 用角度可调镜面阵列反射太阳光的示意图

轨定标的约束,从而能很好地实现对大气吸收 波段的在轨定标。

2 在轨定标模型

在用浮空平台载镜面阵列对红外预警卫星 进行辐射定标时,需要确定红外预警卫星相机 入瞳处的红外辐射通量。

由于太阳光的辐射强度稳定,可以将太阳 作为定标光源。根据已有资料,太阳在大气层外 垂直面上的辐射照度 H_s 已知。考虑到太阳光透 过大气层传输到镜面时会受到大气吸收衰减的 影响,用 τ₁ 表示太阳光照射到镜面时的大气透 过率,则太阳光在镜面处的实际辐射照度为

$$H_{s}' = H_{s} \cdot \tau_{1} \cdot \cos \theta_{s} \tag{1}$$

式中, *θ*_s 为镜面阵列的法线方向与太阳光入射 方向之间的夹角。

除了将太阳能量反射至卫星之外,反射镜 面自身也会吸收太阳的辐射能量,其能量大小 与自身的比辐射率有关。而反射镜面的比辐射 率与其材料及环境温度密切相关。随着比辐射 率的改变,反射镜面自身辐射的能量会发生变 化,卫星接收到的反射镜面辐射能量也会发生 相应变化。反射镜面材料的选择对辐射定标的 效果非常关键。各种材料的比辐射率会随温度 变化,而且大气层内的温度随高度的变化明显。

对于反射镜面的比辐射率,也可根据大气的 稳定变化或者浮空平台高度的变化建立相关的 数学模型。在镜面材料已知的情况下,可以将镜 面的反射率记为一个与温度相关的函数 ρ(T)。 因此,镜面反射的辐射通量可以表示为

$$P_{_{M}} = H'_{_{S}} \cdot A_{_{M}} \cdot \rho(T) = H_{_{S}} \cdot \cos \theta_{_{S}} \cdot \tau_{_{1}} \cdot A_{_{M}} \cdot \rho(T)$$
(2)

式中, A_M为镜面面积, $\rho(T)$ 为镜面反射率。

由于卫星距离地面 36000 km,从卫星上观 测大气层内的飞艇平台时,可以将镜面阵列视 为点源。因为光波在空间传播过程中会以一定的 角度展开,所以这个角度称为发散角。理论上, 完全平整的镜面不会使发散角变大,而在实际 工程中,镜面不可能做得完全平整。由于镜面的 不平整必然会使发射角扩大,经过镜面反射后 的发散角记为 θ_M 。根据经验公式可知,对应的 立体角为 $d\Omega_M = 4\pi \cdot \sin^2(\theta_M/4)$,则卫星处的辐 射照度为

$$H_e = J \cdot \frac{\cos \theta_T}{l_T^2} = \frac{P_M}{\mathrm{d}\Omega_M} \cdot \frac{\cos \theta_T}{l_T^2}$$
$$= \frac{P_M \cdot \cos \theta_T}{4\pi \cdot \sin^2(\theta_M/4) \cdot l_T^2} \tag{3}$$

式中, l_{T} 为反射镜面到卫星的距离; θ_{T} 为卫 星相机入瞳处的法线方向与镜面反射光线之间 的夹角,由于相机镜头可以对准目标方向,可取 $\theta_{T} = 0$ 。

考虑到镜面反射的太阳光在经过大气层时 会受到大气吸收衰减的影响,用 τ₂ 表示镜面反 射的太阳光到达卫星途中的大气透过率,则

$$H'_e = H_e \cdot \tau_2 = \frac{P_M}{4\pi \cdot \sin^2(\theta_M/4) \cdot l_T^2} \cdot \tau_2 \qquad (4)$$

综合式 (2) 和式 (4),可以求出镜面反射的 太阳光到达卫星时的辐射照度:

$$H'_{e} = \frac{H_{s} \cdot \cos\theta_{s} \cdot A_{M} \cdot \rho(T) \cdot \tau_{1} \cdot \tau_{2}}{4\pi \cdot \sin^{2}(\theta_{M}/4) \cdot l_{T}^{2}}$$
(5)

因此,可以求出卫星相机入瞳处的红外辐射通 量为

$$P_e = H'_e \cdot A_e = \frac{H_s \cdot \cos \theta_s \cdot A_M \cdot A_e \cdot \rho(T) \cdot \tau_1 \cdot \tau_2}{4\pi \cdot \sin^2(\theta_M/4) \cdot l_T^2}$$
(6)

式中, A_e 为相机入瞳面积。

http://journal.sitp.ac.cn/hw

3 在轨定标分析

3.1 θ_s 分析

对于部署在静止轨道上的卫星,当浮空平 台载镜面阵列放飞后,太阳在大气层外垂直面 上的辐射照度 H_s 、镜面反射率 $\rho(T)$ 、镜面面积 A_M 、相机入瞳面积 A_e 、太阳光照射到镜面时的 大气透过率 τ_1 、镜面反射的太阳光到达卫星途 中的大气透过率 τ_2 、发散角 θ_M 以及反射镜面到 卫星的距离 l_T 均为已知常数。从式 (6)中可以看 出,卫星相机入瞳处红外辐射通量的影响因素 和 θ_s 密切相关。

以地球坐标系为标准坐标系,根据已有资料可以求出太阳、卫星和镜面三者的坐标。然后根据几何光学便可得到镜面阵列的法线方向与太阳光入射方向的夹角 θ_s,如图 3 所示。



图 3 镜面反射的示意图

根据三角余弦定理,有

$$\theta_{\scriptscriptstyle S} = \frac{1}{2}\arccos\frac{l^2 + l_{\scriptscriptstyle T}^2 - l_{\scriptscriptstyle S}^2}{2l \cdot l_{\scriptscriptstyle T}} \tag{7}$$

式中, *l* 为太阳到反射镜面的距离; *l_x* 为反射 镜面到卫星的距离; *l_s* 为太阳到卫星的距离。 *l*、*l_x* 和 *l_s* 可以根据三点坐标求出,比如反射 镜面到卫星的距离为

$$l_{\scriptscriptstyle T} = \sqrt{(x_{\scriptscriptstyle 3} - x_{\scriptscriptstyle 2})^2 + (y_{\scriptscriptstyle 3} - y_{\scriptscriptstyle 2})^2 + (z_{\scriptscriptstyle 3} - z_{\scriptscriptstyle 2})^2} \quad (8)$$

在某一固定时刻上,太阳和卫星在建立的 地球坐标系中的位置保持不变,影响 θ_s大小的 因素主要是目标所在的位置,即与浮空平台放 飞的地区和高度有关。通过控制浮空平台放飞 的地区和高度来控制 θ_s,进而影响卫星相机入 瞳处的红外辐射通量。 浮空器的工作高度可以分为对流层和平流 层两种。对流层浮空器的飞行高度一般在 8000 m以下;平流层浮空器的飞行高度一般在 25000 m 左右,一般可采用遥控或自主控制相结合的 方式进行控制^[7]。

基于浮空平台的在轨定标充分利用浮空器 在工作高度上的优势,不仅避开了稠密的大气 层,使得大气吸收波段的在轨定标能够很好实 现,而且还缩短了大气传输路径,减小了大气层 对大气传输的影响。

3.2 A_M 的分析计算

浮空平台所能搭载的载荷有限,而反射镜面的面积 A_M 与浮空平台载荷密切相关。

当卫星到达预定轨道后,若用浮空平台对 卫星进行在轨定标,浮空平台载反射镜面的面 积则可通过分析得出。因为此时红外相机的各 种参数已经确定,假定红外相机探测到反射镜 面的红外辐射时,相机入瞳处的最小辐射通量 为 P', ,相机的入瞳面积为 A', ,根据式 (6) 可得:

$$A_{M} = \frac{4\pi \cdot \sin^{2}(\theta_{M}/4) \cdot l_{T}^{2} \cdot P_{e}'}{H_{s} \cdot \cos \theta_{s} \cdot \rho(T) \cdot \tau_{1} \cdot \tau_{2} \cdot A_{e}'}$$
(9)

下面对 2.7 μm 波段上镜面阵列的反射面积 进行计算与分析。

若在昆明位置上放飞浮空平台,其升空高 度为10 km。已知昆明的纬度为25.05000°,经度 为102.73333°。现取夏至时间,即太阳光线直射 北纬23.5°,并与昆明处在同一经度线上,则太 阳纬度 $\theta_2 = 23^\circ$,太阳经度 $\lambda_2 = 102.73333^\circ$ 。已 知卫星纬度 $\theta_1 = 0^\circ$,卫星经度 $\lambda_1 = 121^\circ$ 。

因此在建立的地球坐标系(单位/m)中,可 以分别求出太阳坐标(-3.1723×10⁷, 1.4039×10⁸, 6.1093×10⁷)、卫星坐标(-2.1807×10⁷, 3.6294×10⁷, 0)和反射镜面的坐标(-1.2742×10⁶, 5.6388×10⁶, 2.7018×10⁶)。

根据式 (7) 和式 (8) 可以分别求出 $\theta_s =$ 17.2426°和 $l_r = 3.6995 \times 10^7$ m。利用 FASCODE 大气透过率分析软件可以得到:在昆明位置以 及 10 km 高度上,太阳光照射到目标时的大气透 过率 (2.7 μm) $\tau_1 = 0.5292$,太阳光经过反射镜面 (下转第 33 页)