

基于非均匀同区域线性 CCD 成像的卫星姿态调整与 非线性定标方法

李海超, 满益云

(钱学森空间技术实验室, 北京 100094)

摘要: 提出了对非均匀场景同一区域成像的卫星姿态调整及基于直方图匹配的线阵 CCD 非线性相对辐射定标方法。当在轨卫星需要执行相对辐射定标任务时, 首先计算初始偏流角并调整卫星偏航角进入在轨定标成像模式; 然后在定标成像过程中控制卫星偏航角, 使得线阵 CCD 阵列的所有像元能够依次对同一区域成像; 最后基于直方图匹配方法建立高精度非线性相对辐射定标模型。仿真实验给出了不同姿态对应的定标成像情况下的偏航角调整大小与调整周期, 并分析了引起偏流角误差的因素及其对偏流角的不确定性。该方法既不需要地面均匀定标场等, 也不需要统计分析大量在轨图像数据; 且每一轨都可以执行定标任务, 避免了卫星不同轨数据之间的不稳定性所带来的定标源自身不可靠问题。

关键词: 相对辐射定标; 线阵 CCD; 同区域成像; 偏流角调整; 直方图匹配

中图分类号: TP79; TP701 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1370-07

Satellite attitude adjustment and nonlinear relative radiometric calibration method based on linear CCD imaging the same region of non-uniform scene

Li Haichao, Man Yiyun

(Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The satellite attitude calculation method for linear CCD imaging the same region of non-uniform scene was presented, and a nonlinear relative radiometric calibration method based on histogram matching was put forward. Firstly, when it was needed to perform relative radiometric calibration task, the initial drift angle was calculated, according to which the yaw angle could be adjusted to ensure on-orbit satellite performing the calibration imaging mode. Secondly, in calibration imaging process the yaw angle was controlled to ensure all CCD detectors imaging the same region. Finally, after obtaining the same region image with CCD camera, histogram matching method was used to establish high-precision nonlinear relative radiometric calibration model. The simulation results show the magnitude and time interval of yaw angle adjustment with various attitudes, such as nadir imaging, roll attitude, pitch attitude, roll and pitch attitude, etc, and also analyze the error factors and the uncertainty of drift angle. This

收稿日期: 2014-08-06; 修订日期: 2014-09-09

作者简介: 李海超(1979-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事光学遥感卫星图像处理、在轨辐射与几何定标等方面的研究。

Email: lihaichao2000@163.com

method needs neither the ground uniform scaling field, nor lots of on-orbit images for statistical analysis. More importantly, each track satellite images can meet the calibration condition, which avoids the unreliable problem of calibration source itself caused by the unstable of images between different tracks.

Key words: relative radiometric calibration; linear CCD; same region imaging; adjustment of drift angle; histogram matching

0 引言

目前,遥感卫星常搭载线阵 CCD 相机作为主要的有效载荷,采用推扫式成像方式获取卫星影像。理想情况下,每个探测器在相同输入应该具有相同的输出响应。但是,由于制作工艺和技术的限制,星上成像系统各个 CCD 探测器及放大增益存在非均匀性和暗电流噪声等问题,导致光学系统和 CCD 探测器等响应的不一致性,直接表现为各个像元输出灰度值的不一致性,从而造成获取的图像出现一些“条带”或“条纹”现象^[1-2]。相对辐射定标的目的就是获取相对辐射校正系数,并且将系数作用于原始图像消除条带和条纹效应。

常用的相对辐射定标方法主要有:(1) 实验室积分球定标法是在卫星发射之前满足实验室成像数据的辐射校正^[3-4],但是定标系数会随着卫星发射、器件的老化等因素而改变。(2) 在轨定标设备法需要在星上搭载标准的定标源,该方法同样存在内部定标源的老化且成本较高。(3) 均匀场景定标法需要大量均匀的人造地物或自然场景,在地面建设大面积的均匀定标场需要耗费大量的财力和物力来维护,受到天气条件、轨道运动等的影响,定标一次耗费的周期很长。均匀的自然场景如湖泊、草原、冰川等^[5],但同样如此大面积的均匀景物很少,受到天气条件等的限制,定标一次耗费的周期很长,辐亮度较少,也很难实现高精度的非线性定标。(4) 在轨统计方法通过统计大量的在轨图像数据而获取相对辐射定标系数,主要包括直方图匹配方法^[6]、矩匹配方法^[7]等。它们要求图像的行数远远大于探测器的个数或图像内容为均匀场景;更重要的是随着在轨运行时间的延长,线阵 CCD 的响应常常发生变化,从而导致该方法失效。

特别地,对于高分辨率卫星光学遥感器,由于其接收到的辐亮度较低,在 CCD 探测器响应的低端非

线性较为严重,需要更多的辐亮度值来定标校正。这样,仅仅依靠传统的线性定标方法,定标精度难以保证。因此,有必要研究新的在轨定标方法,在没有星上定标装置的情况下可以获得更多的辐亮度响应,实现高精度非线性定标。“Side-slither”相对辐射定标方法是一种新的方法,它需要将卫星旋转 90°之后再对地物成像,在多颗卫星中得到应用^[8-9],但是这些文献中都需要沙漠、雪地、冰川等均匀场景。

文中提供一种对同一区域成像的线阵 CCD 非线性相对辐射定标方法,充分利用对卫星偏航角的控制潜力确保线阵 CCD 阵列对同一区域依次成像;在获取线阵 CCD 对同一区域的图像后,基于直方图匹配实现探测器的高精度非线性相对辐射定标。与其他方法相比,文中方法具有相对定标实现的便捷性、实时性和高精度。

1 对同一区域成像的姿态调整与非线性定标方法

1.1 执行定标任务,计算初始偏流角

卫星在轨运行期间线阵 CCD 相机对地观测,由于地球自转导致 CCD 阵列运动的投影线速度方向与相机相对被摄目标的移动方向不一致,两者之间的夹角即为偏流角。在执行在轨定标任务时,根据卫星的姿态角、姿态角速度、轨道倾角、轨道中心角、相机焦距等参数,建立从地理坐标系 G 到像面坐标系 P 的变换关系^[10-11]:

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -f(H-h) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f(H-h) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -f(H-h) & -f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(R+H) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\
 \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos i_0 & -\sin i_0 & 0 & 0 \\ \sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\
 \begin{bmatrix} \cos\omega t & 0 & \sin\omega t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\omega t & 0 & \cos\omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos i_0 & \sin i_0 & 0 & 0 \\ -\sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\
 \begin{bmatrix} \cos\gamma_0 & 0 & \sin\gamma_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\gamma_0 & 0 & \cos\gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (R+h) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\
 \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = MG \quad (1)$$

式中： R 为地球半径； H 为卫星轨道高度； h 为被摄景物地形高度； i_0 为轨道倾角； γ 表示在摄影时刻从升交点开始到卫星所对应的地球中心角， $\gamma = \gamma_0 + \Omega t$ ； ω 为地球自转角速率； Ω 为在摄影时刻卫星轨道运行相对地心的角速度； ψ, θ, φ 表示摄像时刻的偏航、俯仰和滚动角， $\psi = \psi_0 + \dot{\psi}t, \theta = \theta_0 + \dot{\theta}t, \varphi = \varphi_0 + \dot{\varphi}t, \psi_0, \theta_0, \varphi_0$ 以及 $\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}$ 分别表示初始姿态角及角速率。

由公式(1)可得到像移速度和初始偏流角 β_0 ：

$$\frac{dP}{dt} \Big|_{t=0} = \begin{bmatrix} dP_1/dt \\ dP_2/dt \\ dP_3/dt \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{P_1} \\ V_{P_2} \\ V_{P_3} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\beta_0 = \arctan(V_{P_2}/V_{P_1}) \quad (3)$$

图 1(a)所示为常规模式与在轨定标模式的成像示意图。由于地球自转导致的对 O_1 成像时的偏流角为 β_0 ，在轨相对辐射定标模式下需要逆时针旋转卫星偏航角 $90^\circ - \beta_0$ ；图 1(b)为两种成像模式对应的 CCD 推扫示意图，在不需要定标时，卫星按照传统的推扫模式成像，CCD 阵列与飞行方向垂直；在需要采用相对辐射定标方法定标时，要求卫星绕偏航轴旋转 $90^\circ - \beta_0$ 。

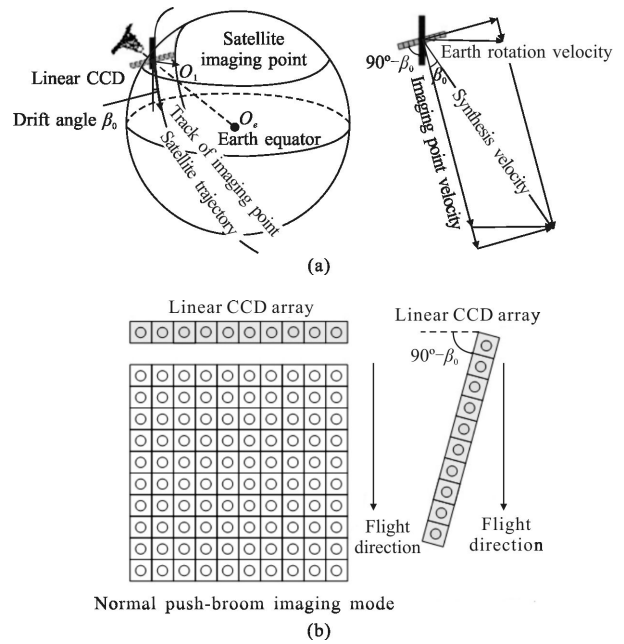


图 1 常规成像模式与在轨定标模式
Fig.1 Normal imaging and on-orbit calibration mode

1.2 定标过程中不断调整卫星偏航角,使得线阵 CCD 所有像元能够顺序的对同一区域成像

在轨卫星偏航角旋转 $90^\circ - \beta_0$ 后,按照卫星在轨道上的运行方向,理论上线阵 CCD 的所有像元可以对同一区域顺序准实时成像。但是,由于偏流角的存在以及成像时间的非同时性,导致了所有像元未必对同一区域成像,因此,需要对卫星偏航角进行不断调整,使得它们严格通过自然场景内的同一点,一个接一个地沿着地面相同的轨线。如图 2 所示,卫星在位置 A 采用常规成像模式,通过偏航角大幅度旋转后,在位置 B 进入定标成像模式,景物 C 为地面分辨率大小的景物,因此,定标模式下要求整个线阵 CCD 阵列依次经过景物 C。

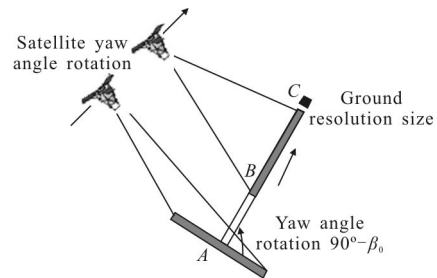


图 2 线阵 CCD 对同一区域成像

Fig.2 All the CCD detectors imaging the same region

为确保定标模式下对同一区域成像,需要不断

计算卫星偏流角,不断调整卫星偏航角控制线阵 CCD 成像的精确推扫方向。经过时间 t 后偏流角变为 β ,在该偏流角时要求线阵 CCD 所有像元都对同一区域成像,给出对卫星偏航角进行调整的条件:要求线阵 CCD 中的第一个像元与最后一个像元的像移偏差不超过阈值 δ , δ 的物理意义为像素个数,如果超过阈值 δ 则需要对卫星偏航角进行调整,否则不做调整。下面给出对卫星偏航角进行调整的时间间隔大小的计算步骤。

步骤 1:将卫星偏航角调整后的时刻 t 作为起始时刻, t 等于 0,计算该时刻的偏流角 β_1 ,令步进次数 n 等于 1,继续执行步骤 2;

步骤 2:计算 t 等于 $n \times L \times T_{\text{im}}$ 时刻的偏流角为 β_2 , $L \times T_{\text{im}}$ 为时间间隔步长,其中, L 为线阵 CCD 的长度,即线阵 CCD 包含的像元个数, T_{im} 为线阵 CCD 的积分时间;

步骤 3:计算整个线阵 CCD 首末两个像元的像移大小 Δd , $\Delta d = L \times \tan|\beta_2 - \beta_1|$, $|\cdot|$ 表示取绝对值,如果 Δd 小于预设阈值 δ ,不需要对当前时刻的卫星偏航角进行调整,将 β_2 赋值给 β_1 、步进次数 n 值加 1 之后,重复步骤 2,否则需要在当前 n 值所对应的时刻之前对卫星偏航角进行调整,即对卫星偏航角进行调整的时刻在 $(n-1) \times L \times T_{\text{im}} \sim n \times L \times T_{\text{im}}$ 之间,令 $i=1$,继续步骤 4 精确计算需要对卫星偏航角调整的时刻;

步骤 4:对于时刻 $t_i = (n-1) \times L \times T_{\text{im}} + i \times T_{\text{im}}$,该时刻 t_i 所对应的偏流角 β_2' 通过线性插值得到, $\beta_2' = \beta_1 + i \times (\beta_2 - \beta_1) / L$,计算当前时刻第一个像元与第 i 个像元的像移大小 $\Delta d_i = i \times \tan|\beta_2' - \beta_1|$,当 Δd_i 小于阈值 δ 时,则 i 加 1, i 为小于 L 的整数,重复步骤 4,当 Δd_i 大于阈值 δ 时,该时刻需要对卫星偏航角进行调整,调整后重新开始执行步骤 1,直到在轨定标任务执行完毕。

1.3 获取线阵 CCD 所有像元对同一区域成像的图像数据后,建立非线性辐射定标模型

(1) 每个像元的成像数据在输出图像上表现为一列数据,而由于线阵 CCD 阵列所有像元对同一区域先后顺序成像,导致输出图像的 45° 对角线上的数据为不同像元对同一区域的成像。对每列图像进行 45° 旋转,确保同一行数据是同一个区域由不同像元成的像。

(2) 采用直方图匹配的方法建立非线性定标模型,可以彻底解决 CCD 响应非线性问题,建立期望

直方图与原始直方图的映射关系,其中期望直方图为所有有效像元成像的直方图,原始直方图为每个像元成像的直方图。

(3) 根据建立的映射查找表,对常规成像模式下得到的遥感图像进行相对辐射校正。对线阵 CCD 相机拍摄的遥感图像,根据建立的映射查找表,将整幅遥感图像逐像素进行定标校正,便得到定标模式下的校正后的遥感图像。

2 实验结果与分析

文中进行了仿真实验,主要仿真参数如下:线阵 CCD 共 12 288 个像元,焦距 $f=2.6$ m,积分时间 0.32 ms。卫星姿态参数 ψ, θ, φ 都取值 0,表示在成像时卫星飞行稳定;偏航角 $\psi=0$ (无偏航),俯仰角 θ 和滚动角 φ 取 $0 \sim 45^\circ$ 范围内变化值,三轴姿态调整的顺序为 $\psi \rightarrow \theta \rightarrow \varphi$ 。卫星轨道高度 $H=645$ km,地球半径 $R=6\ 378.137$ km,从降交点到卫星成像时刻所对应的地球中心角 γ_0 的范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,轨道周期 98 min,轨道倾角 98° 。以 CCD 阵列的中心点为分析对象,为满足该方法的在轨相对辐射定标条件,要求 12 288 个像元经过同一区域,给出了以下几种情况下的偏航角调整大小和最大调整时间的间隔(通过 1.2 节中步骤 1~4 计算得到):(1) 三姿态角都等于 0;(2) 卫星在不同滚动角下成像;(3) 卫星在不同俯仰角下成像;(4) 卫星在不同滚动角和不同俯仰角下成像。

公式(1)中线阵 CCD 中心点对应的 $p_1=p_2=0$,地理坐标系的原点为星下点,对于姿态角不为 0 的情况,需要先利用公式(1)计算视轴对应目标点在地理坐标系中的 g_1 与 g_2 值,再利用公式(2)、(3)计算偏流角。

2.1 姿态角都为 0° 时的定量分析

在卫星三个姿态角都为 0° 、不同地球纬度下执行定标时需要调整卫星偏航角的大小(逆时针调整)如图 3 所示,升轨与降轨时表现出的变化趋势相反。按照上述偏航角的调整步骤,在不同纬度需要对卫星偏航角进行调整的时间间隔大小绘制曲线如图 4 所示,可以看出在赤道附近对卫星偏航角的调整间隔长、频次低,越往高纬度区域其间隔越短、频次相对高,纬度 82° 时调整间隔时间约 1.137 s,究其原因,通过图 3 分析可知,赤道附近偏航角稳定、变化速率慢,高纬度区域变化速率快。

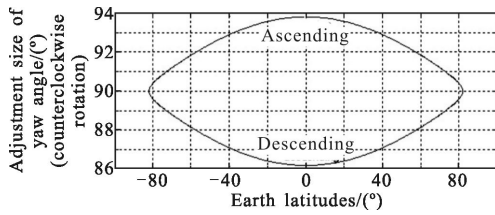


图 3 在不同纬度执行需要对卫星偏航角调整的大小
Fig.3 Yaw angle adjustment at different latitudes

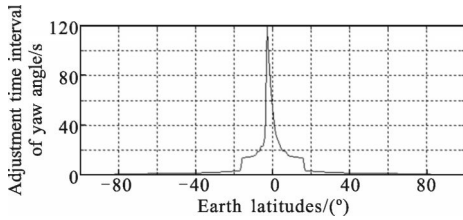


图 4 在不同纬度对偏航角进行调整时间间隔(升轨)
Fig.4 Adjustment time interval of yaw angle at different latitudes (ascending)

2.2 不同滚动角成像的定量分析

根据具体的参数,在卫星滚动角从 $0^\circ \sim 45^\circ$ 变化时,按照上述偏航角的调整步骤,在不同纬度、不同滚动角执行在轨道标时需要调整卫星偏航角(逆时针调整)进行调整的大小如图 5 所示。升轨时:同一地球纬度随着卫星滚动角绝对值的增大,偏航角的调整

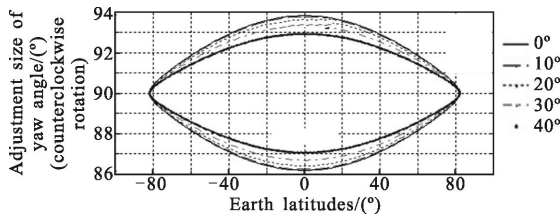


图 5 不同纬度不同滚动角需要对偏航角调整大小
Fig.5 Adjustment size of yaw angle at different latitudes and different roll angles

大小减小,在对星下点成像时偏航角的调整最大;相同的滚动角,随着纬度的增大需要调整的卫星偏航角逐渐减小,到纬度 82° 时调整偏航角为 90° 。降轨时:同一地球纬度随着卫星滚动角绝对值的增大,偏航角的调整大小增大,在对星下点成像时偏航角的调整最小;相同的滚动角,随着纬度的增大需要调整的卫星偏航角逐渐增大,到纬度 82° 时调整偏航角为 90° 。需要对卫星偏航角进行调整的时间间隔如图 6 所示,可以看出在赤道附近对卫星偏航角的调整间隔长、频次低,高纬度区域其间隔越短、频次相对高;

在相同纬度区域,滚动角越大调整时间间隔越长,在纬度 82° 时 0° 滚动角对应的调整时间间隔最短,即 1.137 s 。

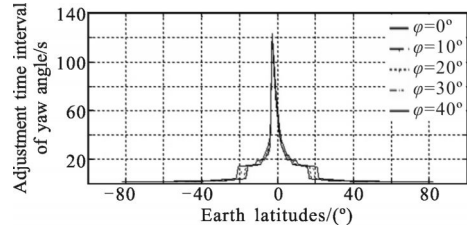


图 6 在不同纬度不同滚动角需要对卫星偏航角进行调整的时间间隔(升轨)

Fig.6 Adjustment time interval of yaw angle at different latitudes and different roll angles (ascending)

2.3 不同俯仰角成像的定量分析

根据具体的参数,在卫星俯仰角从 $0^\circ \sim 45^\circ$ 变化时,按照上述偏航角的调整步骤,在不同纬度、不同俯仰角执行在轨道标时需要调整卫星偏航角进行调整的大小如图 7 所示。升轨时:同一地球纬度随着卫星俯仰角的增大,偏航角的调整大小增大,在对星下点成像时偏航角的调整最小;相同的俯仰角,随着纬度的增大需要调整的卫星偏航角逐渐减小,到纬度绝对值 82° 时调整偏航角为 90° 。降轨时:同一地球纬度随着卫星俯仰角的增大,偏航角的调整大小减小,在对星下点成像时偏航角的调整最大;相同的俯仰角,随着纬度的增大需要调整的卫星偏航角逐渐增大,到纬度 82° 时调整偏航角为 90° 。在不同纬度、不同俯仰角需要对卫星偏航角进行调整的时间间隔如图 8 所示,可以看出在赤道附近对卫星偏航角的调整间隔长、频次低,高纬度区域其间隔越短、频次相对高;在相同纬度区域,俯仰角越大调整时间间隔越小,在纬度 82° 俯仰角为 40° 时对应的调整间隔最短,约 1.098 s 。

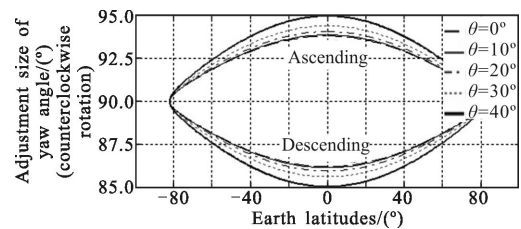


图 7 不同俯仰角不同纬度需要对偏航角调整大小
Fig.7 Adjustment size of yaw angle at different earth latitudes and different pitch angles

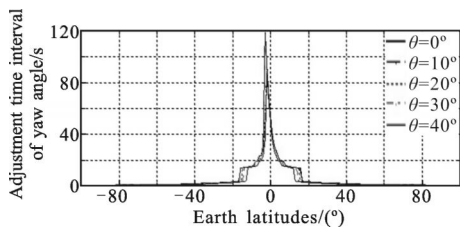


图 8 在不同纬度不同俯仰角需要对卫星偏航角进行调整的时间间隔(升轨)

Fig.8 Adjustment time interval of yaw angle at different latitudes and different pitch angles (ascending)

2.4 同时滚动且俯仰成像定量分析

根据具体的参数,在卫星俯仰角从 $0^\circ \sim 45^\circ$ 、滚动角从 $0^\circ \sim 45^\circ$ 变化,按照上述偏航角的调整步骤,在不同俯仰角、不同滚动角在 40° 纬度执行在轨定标时需要调整卫星偏航角的大小如图 9 所示,随着卫星滚动角的增大,对偏航角调整的大小减小,俯仰角越大偏航角减小趋势越快。在 40° 纬度需要对卫星偏航角进行调整的时间间隔如图 10 所示,可以看出随着卫星滚动角的增大,对卫星偏航角的调整间隔越长、频次越低,纬度越高其间隔越短、频次相对高;在相同纬度区域,俯仰角越大调整时间间隔越小。

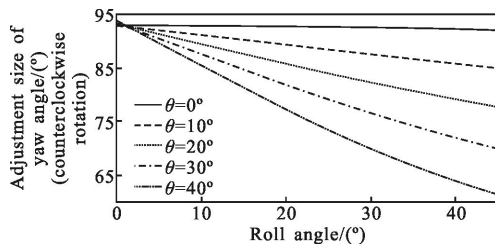


图 9 纬度 40° 时不同滚动角且不同俯仰角对偏航角进行调整的大小

Fig.9 Adjustment size of yaw angle at different rolls and pitch angles at earth latitude $40^\circ N$

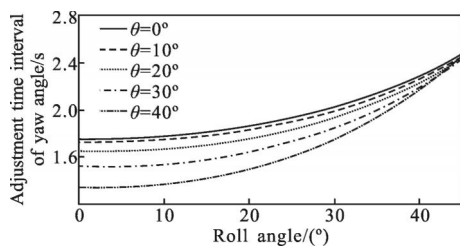


图 10 纬度 40° 时不同滚动角且不同俯仰角需要对卫星偏航角进行调整的时间间隔

Fig.10 Adjustment time interval of yaw angle at different rolls and pitch angles at latitude $40^\circ N$

2.5 误差因素及其不确定性分析

由计算像移速度的各相关参数的不确定性引起像移速度计算值与实际像移速度值之间的误差。通过计算像移速度的公式可以看出,引起偏流角误差的主要因素有姿态角(最大测量误差 0.1°)、姿态角速率(最大测量误差 $0.005^\circ/s$)、地心距 H (最大测量误差 1 km)、轨道中心角 γ (最大测量误差 0.1°)等参数的测量误差。取姿态角 0° 及其角速度 $0^\circ/s$,在北纬 40° 执行定标时,对各个误差因素引起的偏流角不确定性进行定量分析。由于各个误差因素的最大测量误差不一致,为便于在图中表示,用横坐标表示最大误差的倍数(0.1、0.2、...、1.0),如图 11 所示。

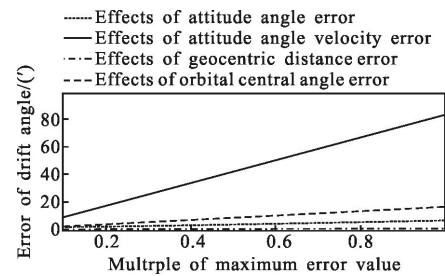


图 11 纬度 40° 时不同参数误差带来的偏流角误差

Fig.11 Drift angle error caused by various error factors at latitude $40^\circ N$

从图中可以看出,姿态角速率测量误差对偏流角的影响程度最大,随着姿态角速率测量精度的下降,带来的偏流角精度近似直线急剧下降,偏流角不确定度从 $8.13'$ (姿态角速率误差 $0.0005^\circ/s$)下降到 $83.3'$ (姿态角速率误差 $0.005^\circ/s$),因此,姿态角速率测量精度应该严格要求;姿态角测量精度对偏流角误差的提高也有一定的影响,在姿态角速度测量精度提高难度大时,可通过提高姿态测量精度来提高偏流角的误差;轨道中心角测量精度对偏流角误差的影响相对小;地心距测量精度对偏流角误差几乎不产生影响。因此,应该重点提高姿态角速率及姿态角的测量误差。

3 结论

文中根据卫星姿控能力提出一种对非均匀场景同一区域成像的相对辐射定标方法,在定标成像过程中不断调整卫星偏航角使得线阵 CCD 阵列能够依次对同一区域成像,在获得对同区域的成像数据

后利用直方图匹配方法建立非线性相对辐射定标模型。在高纬度时需要卫星偏航角调整的时间间隔最小,从文中的仿真实验得到最小的调整时间间隔超过 1 s,在姿态控制周期 0.25 s 的水平下,因此,满足在轨应用的需求。该方法不需要星上定标装置,无需专门的地面均匀定标场景作为定标源;与基于大量数据统计的相对辐射定标方法相比,不需要积累多轨成像数据,每轨都可以实现定标成像,后续可以在卫星上应用,验证方法的有效性。

参考文献:

- [1] Corsini G, Diani M, Walzel T. Striping removal in MOS-B data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(3): 1439-1446.
- [2] Wang Rongbin, Zeng Chao, Jiang Wan, et al. Terra MODIS band 5th stripe noise detection and correction using MAP-based algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 273-277. (in Chinese)
王荣彬, 曾超, 姜湾, 等. Terra MODIS 第 5 波段红外遥感影像条带噪声的探测与校正 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 273-277.
- [3] Markham B L, Schafer J S, Wood F M, et al. Monitoring large-aperture spherical integrating sphere sources with a portable radiometer during satellite instrument calibration[C]// *Metrologia*, 1998, 35: 643-648.
- [4] Liu Zexun, Quan Xianrong, Ren Jianwei, et al. Calibration of CCD camera's output non-uniformity linear corrected coefficient[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2211-2115. (in Chinese)
刘则洵, 全先荣, 任建伟, 等. CCD 相机输出非均匀性线性校正系数的定标[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2211-2115.
- [5] Bindschadler R, Choi H. Characterizing and correcting HyPerion detectors using ice-sheet images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1189-1193.
- [6] Horn B K P, Woodham R J. Destriping Landsat MSS images by histogram modification [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1979, 10: 69-83.
- [7] Gadallah F L, Csillag F, Smith E J M. Destriping multisensor imagery with moment matching[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21: 2505-2511.
- [8] Anderson C, Naughton D, Brunn A, et al. Radiometric correction of RapidEye imagery using the on-orbit sideslither method [C]//SPIE, 2011, 8180: 818008.
- [9] Henderson B G, Krause K S. Relative radiometric correction of Quickbird imagery using the sideslither technique on-orbit [C]//SPIE, 2004, 5542: 426-436.
- [10] Wang Jiaqi. Optical Instrument Collectivity Design [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 1998. (in Chinese)
王家骐. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 1998.
- [11] Li Weixiong, Xu Shuyan, Yan Dejie. Influencing parameters of estimate errors of space camera's drift angle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1530-1536. (in Chinese)
李伟雄, 徐抒岩, 闫得杰. 影响空间相机偏流角估值误差的参数[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(8): 1530-1536.