

文章编号 1004-924X(2015)07-1859-08

## FY-3C/臭氧总量探测仪太阳辐照度偏差的修正

刘成保, 王维和\*, 杨 磊

(中国气象局 国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:**为了解决风云-3C/臭氧总量探测仪(FY-3C/TOU)太阳辐照度数据异常的问题,给出了一种求解 TOU 漫反射板坐标系安装偏差的算法,并利用调整后的安装参数对 TOU 太阳辐照度进行了修订。系统研究了该算法的基本原理及数值分析结果。该算法假设 TOU 在轨实际漫反射板坐标系与理想漫反射板坐标系之间的偏差可用未知转换矩阵刻画,根据太阳辐照度真值与 TOU 修订辐照度数据之间的关系建立了关于未知变量的方程。然后,基于最优目标问题求解出了转换矩阵的各未知参数;最后,将修订后的漫反射板坐标系参数代入 TOU 定位及定标处理流程,实现对 FY-3C/TOU 太阳辐照度偏差的订正,达到利用辐照度追踪仪器衰减系数的目的。数值分析结果表明偏差修订效果显著,TOU 太阳辐照度的最大相对误差从 35%降低为 2%,相对误差波动范围从 27.2%缩小为 3.2%。

**关键词:**风云-3C 卫星;臭氧总量探测仪;太阳辐照度;偏差修正;漫反射板坐标系

**中图分类号:**TP73; P415.36 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.1859

## Revision of solar irradiance of FY-3C/TOU

LIU Cheng-bao, WANG Wei-he\*, YANG Lei

(National Satellite Meteorological Center, China Meteorological  
Administration, Beijing 100081, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangwh@cma.gov.cn

**Abstract:** To solve the abnormal data of Fengyun-3C/Total Ozone Unit(FY-3C/TOU) solar irradiance, an algorithm for estimating the deviation of installation parameters of TOU diffuse plate coordinate system was presented, and the deviation of solar irradiance was revised based on the adjusted parameters. The theoretical basis of this algorithm was presented, and the numerical analysis results were discussed. The algorithm assumed the deviation between the actual TOU diffuse plate coordinate system on the orbit and its ideal diffuse plate coordinate system to be expressed by an unknown transfer matrix. Then, the equations with unknown parameters could be established based on the relationship between the objective value of solar irradiance and the revised FY-3C/TOU irradiance data. Furthermore, the estimated values for the unknown transfer matrix were derived numerically by solving an optimal problem. Finally, the deviation of FY-3C/TOU solar irradiance was revised by substituting the new installment parameters of the diffuse plate into the geolocation and calibration process of TOU, and the attenuation coefficient of the tracking instrument was captured. The numerical analy-

收稿日期:2015-03-20;修订日期:2015-04-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41175024, No. 61172113, No. 91338109)

sis results show that the maximum relative error of solar irradiance decreases from 36.5% to 2%, and the fluctuation range of relative error narrows from 27.2% to 3.2%, which revises the deviation greatly by proposed algorithm.

**Key words:** FY-3C satellite; Total Ozone Unit(TOU); solar irradiance; deviation correction; diffuse plate coordinate system

## 1 引言

臭氧总量探测仪(Total Ozone Unit, TOU)作为极轨气象卫星风云三号系列(FY-3A、3B、3C)所携带的重要载荷之一<sup>[1]</sup>,主要用于测量大气臭氧柱总量,为研究大气化学、生态环境监测和全球气候变化等提供全球臭氧柱总量等重要参数,特别是对平流层臭氧的监测发挥着极为重要的作用。FY-3C/TOU 具有 6 个光谱通道<sup>[2]</sup>,利用其测量的紫外大气后向散射辐亮度和大气外界太阳辐照度,通过臭氧对紫外线吸收的差异,可定量反演大气臭氧总量等重要臭氧参数<sup>[3-6]</sup>。

FY-3C/TOU 通过 3 块漫反射板测量 6 个通道的太阳辐照度,其观测太阳辐照度的目的—一是用于大气臭氧各属性要素的反演,即首先利用 6 个通道的辐亮度与辐照度的比值得到大气层顶的反照率,再根据反演算法对臭氧各要素进行反演;二是利用长时间序列的太阳辐照度观测数据的变化规律估计探测器的衰减系数<sup>[7-10]</sup>。

FY-3C 发射后,通过对 TOU 观测数据的分析,发现 FY-3C/TOU 太阳辐照度数据存在着异常现象。检查显示,辐照度电压计数值及仪器增益均正常;而漫反射板修正因子由卫星发射前实验室测定,因此可排除上述因素的影响。进一步分析表明,太阳光线与漫反射板平面的位置关系存在着理论值与实际值不一致的情况,即实际漫反射板坐标系与理想漫反射板坐标系存在偏差。

如何求解该偏差量是本文要解决的主要问题。对于 FY-3C 具有对地观测成像能力载荷(如可见光红外扫描辐射计(VIRR)、中分辨率光谱成像仪(MERSI)等)的偏差,可通过比较定位后的对地遥感图像与理想全球海陆掩码之间的差异来估计漫反射板坐标系的实际偏差量<sup>[11-14]</sup>;但对于 FY-3C/TOU,由于其不具有区分海洋与陆地的观测能力,因此无法通过比较遥感图像和海陆

掩码数据的方法来确定该偏差。

为确定 FY-3C/TOU 漫反射板平面的真实在轨状态,本文设计了一种修正 FY-3C/TOU 太阳辐照度偏差的修订算法。先假设 TOU 在轨实际漫反射板坐标系与理想漫反射板坐标系之间的转换矩阵为未知量;然后根据太阳辐照度参考真值与 TOU 修订辐照度数据之间的关系建立方程,通过求解转换矩阵各元素来确定漫反射板坐标系的在轨偏差;最后,将修订后的漫反射板坐标系参数代入 TOU 定位及定标处理流程,达到修正 FY-3C/TOU 太阳辐照度偏差的目的。

本文阐述了 TOU 在轨辐照度数据的异常现象及相关分析;介绍了 TOU 漫反射板修正的主要原理,给出 FY-3C/TOU 偏差修订算法;利用该算法对 TOU 在轨辐照度数据进行了修订,并对数据的相对误差进行了分析。

## 2 TOU 问题说明

紫外臭氧总量探测仪通过测量地球大气对太阳紫外辐射的后向散射,经反演得到全球大气臭氧总量。FY-3C/TOU 从臭氧赫金斯吸收带中选择了 6 个波长通道,中心波长分别为 308.727, 312.638, 317.652, 322.464, 331.375 和 360.253 nm,平均带宽约为 1.1 nm。自 FY-3C 发射以来,从星上辐射定标所提供的太阳观测角度  $\alpha$  ( $\alpha$  为入射太阳光线与漫反射板坐标系 XOY 平面的夹角)的数据分析结果看,辐射定标结果与太阳光线的入射角度之间的匹配关系与理论预期匹配规律不符。

根据设计,仪器辐射定标时间约 2 min,期间太阳  $\alpha$  角的变化为  $-6 \sim 8^\circ$ ,仪器测量的最大值出现在  $\alpha$  为  $0^\circ$  附近,但通过对图 1(a)、(b)、(c) 分别对 FY-3A、FY-3B、FY-3C 辐照度数据的比较,可以发现 A、B 星随  $\alpha$  角的变化规律基本一致,C 星则呈现出完全不同的规律。FY-3C/TOU 测量

信号随  $\alpha$  的变化违背了预期的观测规律。(图 1 中纵轴辐照度数值是相对参照辐照度的相对值)

阳光线的观测角度匹配异常的原因。

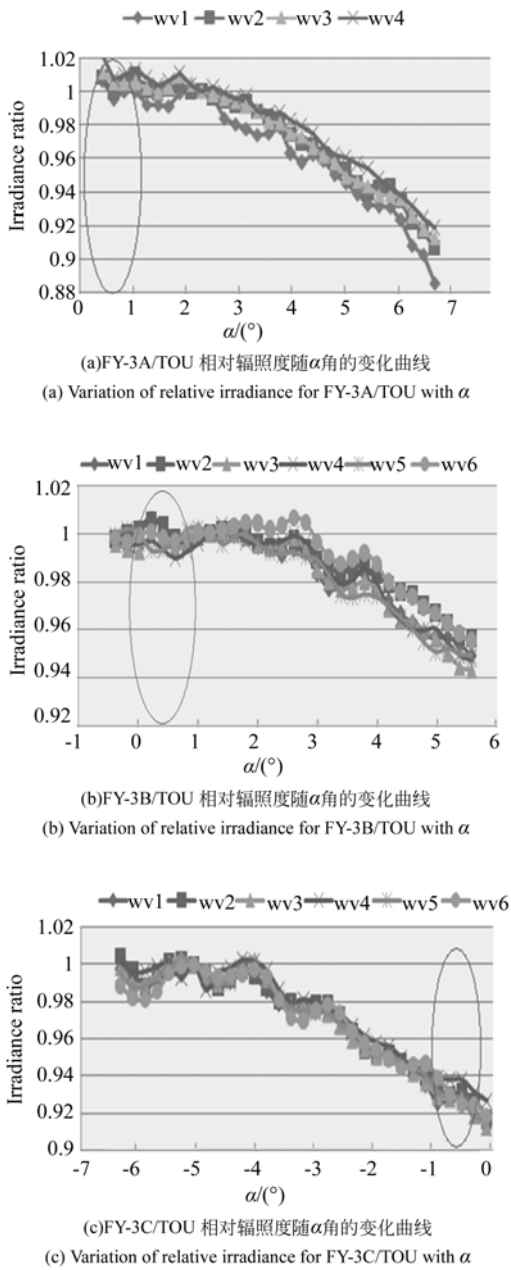


图 1 FY-3C/TOU 相对辐照度与  $\alpha$  角的异常匹配  
Fig. 1 Abnormal relation between relative irradiance for FY-3C/TOU and  $\alpha$

图 2 所示为 TOU 原始辐照度和辐亮度观测值随波长(对应不同通道)的变化情况,可以看出其原始观测结果随波长的变化是一致的,这说明辐照度/辐亮度实验室定标规律在卫星发射后没有发生本质变化,不是造成 TOU 观测结果与太

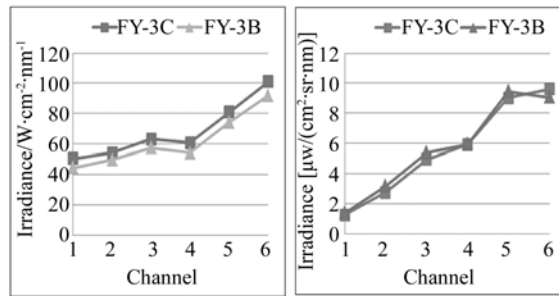


图 2 FY-3B/3C 辐照度及辐亮度随波长的变化  
Fig. 2 Irradiance and radiance of FY-3B/3C versus wavelength

相关分析表明:目前 FY-3C/TOU 太阳辐照度定标值异常是由于在计算辐照度时使用的理想太阳光线的观测角度与卫星在轨观测实际几何状态不一致造成的。

从物理角度分析,在理想条件下,漫反射板坐标系与卫星本体坐标系重合(卫星 X 轴正方向指向卫星前进方向,Z 轴正向指向地心,Y 轴与 Z 轴和 X 轴满足右手直角坐标系法则)。然而,目前 TOU 辐照度漫反射方向订正结果明显偏离预期规律的现象表明,FY-3C/TOU 漫反射板的实际在轨坐标系与卫星本体坐标系存在一定的偏差,最终导致太阳辐照度在轨定标值异常。

理想卫星载荷坐标系与实际卫星安装载荷坐标系之间的偏差通常通过两个坐标系之间的转换矩阵,即安装矩阵来刻画。对于 FY-3C 具有对地观测成像能力的其他载荷(如 VIRR、MERSI 等)的安装偏差,可通过比较定位后的对地遥感图像与理想的全球海陆掩码之间的差异来估计偏差量;但由于 FY-3C/TOU 其不具有区分海洋与陆地的观测能力,因此无法通过比较遥感图像和海陆掩码数据来确定该偏差。

### 3 偏差修正算法

#### 3.1 TOU 在轨辐射定标基本流程

TOU 在轨辐射定标主要是针对卫星下传的在某观测时刻  $t$  的 TOU 原始辐照度观测值  $F(t)$ ,根据漫反射板方向订正原理求解太阳辐照度真值,主要分为两个步骤:

(一)根据定位预处理流程,求解在观测时刻的太阳观测矢量及其与漫反射板的位置关系。

计算太阳矢量与 TOU 漫反射板 XOY 平面的夹角  $\alpha$  以及太阳矢量与漫反射板 XOZ 平面的夹角  $\beta$ ,这涉及到太阳矢量在漫反射板坐标系、卫星本体坐标系、轨道坐标系、ECI 坐标系以及 ECR 坐标系下对应矢量的坐标转换(其中各坐标系的定义及转换可参见[15])。

假设在漫反射板坐标系下太阳矢量的单位矢量为  $(x, y, z)$ ,则  $\alpha, \beta$  为:

$$\alpha = \operatorname{atan} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \beta = \operatorname{atan} \frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}}. \quad (1)$$

(二)根据双向反射分布函数(BRDF)订正系数进行 TOU 漫反射板方向订正。

对于 FY-3C/TOU 原始观测数据,TOU 漫反射板方向订正的基本公式<sup>[1]</sup>为:

$$\text{太阳辐照度真值} = \frac{\text{辐照度原始观测值}}{\text{BRDF 订正系数}}. \quad (2)$$

BRDF 订正系数为:

$$k(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 a_{ij} (\alpha - \bar{\alpha})^{i-1} (\beta - \bar{\beta})^{j-1}, \quad (3)$$

其中  $\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^M \alpha_i$ ,  $\bar{\beta} = \sum_{j=1}^N \beta_j$  为实验室样本平均值,  $M, N$  分别为  $\alpha_i, \beta_j$  变量的节点数,  $a_{ij}$  为拟和系数(卫星发射前,由地面实验室测量结果拟合所得)。对于 FY-3C/TOU,  $\bar{\alpha} = 0.0$ ,  $\bar{\beta} = 26.75$ 。

将太阳辐照度原始观测值  $F(t)$  代入式(2),即可求得在观测时刻  $t$  的太阳辐照度定标值。

### 3.2 TOU 偏差修订算法

为确定 FY-3C/TOU 漫反射板的在轨偏差,基于任何两个同维度的坐标系之间可通过某转换矩阵而相互转换的基本原理,设计了求解该偏差量的算法。通过修正太阳矢量与漫反射板的角度关系,达到修订 FY-3C/TOU 太阳辐照度的目的。

具体步骤如下:

(一)漫反射板坐标系偏差量的刻画

通过转换矩阵表示在轨漫反射板坐标系  $\sigma_{xyz}$  到卫星本体坐标系 O-XYZ 的转换关系。

在漫反射板坐标系  $\sigma_{xyz}$  中,令  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  分别为  $x, y, z$  轴的单位向量,则向量  $\mathbf{r}$  可表示为  $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$ ,其坐标表示为  $(x, y, z)^T$ ; 对于卫

星本体坐标系 O-XYZ,设其坐标轴单位向量分别为  $\mathbf{i}_s, \mathbf{j}_s, \mathbf{k}_s$ ,坐标表示为  $(X, Y, Z)^T$ 。

假设卫星本体坐标轴向量与仪器坐标轴向量之间的关系可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{i}_s = A_{sx}\mathbf{i} + A_{sy}\mathbf{j} + A_{sz}\mathbf{k} \\ \mathbf{j}_s = A_{yx}\mathbf{i} + A_{yy}\mathbf{j} + A_{yz}\mathbf{k} \\ \mathbf{k}_s = A_{zx}\mathbf{i} + A_{zy}\mathbf{j} + A_{zz}\mathbf{k} \end{cases} \quad (4)$$

令新坐标系下  $\mathbf{r} = X\mathbf{i}_s + Y\mathbf{j}_s + Z\mathbf{k}_s$ ,则满足:

$$\mathbf{r} = (\mathbf{ijk}) \begin{bmatrix} A_{sx} & A_{sy} & A_{sz} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{yz} \\ A_{zx} & A_{zy} & A_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (\mathbf{ijk}) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (5)$$

因此,卫星本体坐标系与漫反射板坐标系之间的坐标转换关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (6)$$

通常称  $\mathbf{A}$  为安装矩阵,其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{sx} & A_{sy} & A_{sz} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{yz} \\ A_{zx} & A_{zy} & A_{zz} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

上述推导说明矩阵  $\mathbf{A}$  可完全决定两个坐标系之间的相互关系,即两个坐标系之间的偏差可以通过矩阵  $\mathbf{A}$  来刻画。

对于 FY-3C/TOU,记在某观测时刻太阳矢量在卫星本体坐标系下的坐标为  $\mathbf{V}_{sc} = (X, Y, Z)^T$ ,由于目前 FY-3C/TOU 定位流程中,是在理想状态下漫反射板坐标系与卫星坐标系重合的假设下计算的,即矩阵  $\mathbf{A}$  默认为单位阵,因此求解出的  $\alpha$  和  $\beta$  角实际反映的是太阳矢量在卫星坐标系下的几何关系,即:

$$\alpha = \operatorname{atan} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}, \beta = \operatorname{atan} \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Z^2}}. \quad (8)$$

在选取太阳矢量单位矢量且太阳位于卫星前进方向时,  $\mathbf{V}_{sc}$  的 3 个分量可表示为:

$$\begin{cases} Y = \operatorname{sgn}(\tan\beta) \cdot \sqrt{\tan^2\beta / (1 + \tan^2\beta)} \\ Z = \operatorname{sgn}(\tan\alpha) \cdot \sqrt{\tan^2\alpha / (1 + \tan^2\alpha)} \\ X = \sqrt{1 - Y^2 - Z^2} \end{cases} \quad (9)$$

设安装矩阵为  $\mathbf{A}$  (各元素为待求解的未知量),记太阳单位矢量在漫反射板坐标系下的坐标

为  $\mathbf{V}_{inst} = (x, y, z)^T$ , 则满足:

$$\mathbf{V}_{inst} = \mathbf{A}\mathbf{V}_{sc}. \quad (10)$$

即太阳矢量在漫反射板坐标系下的坐标是关于未知量  $\mathbf{A}$  的函数  $\mathbf{V}_{inst} = \mathbf{V}_{inst}(\alpha, \beta, A)$ 。

将  $\mathbf{V}_{inst} = \mathbf{V}_{inst}(\alpha, \beta, A)$  的各分量坐标代入式(8), 即可得到修订偏差后的几何观测角  $(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta})$ , 进一步将其代入 BRDF 订正系数式(3), 即可得到修订安装偏差后的 BRDF 订正系数:

$$k(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}) = k(\alpha, \beta, A). \quad (11)$$

通过选取太阳辐照度真值, 构造关于未知量  $\mathbf{A}$  的方程, 并求解安装矩阵  $\mathbf{A}$ 。

(2) 确定太阳辐照度真值

由于日地距离远大于卫星和地球的距离, 而且太阳辐射强度可作为客观事物, 虽然不同的卫星各自测量太阳辐照度, 但是反映的是同一个客观事物。因此, 在相近的时间段内, 不同卫星所观测的太阳辐照度应近似一致。选取已经过众多科研验证的 FY-3B/TOU 和 SSBUV 太阳辐照度的交叉定标值作为太阳辐照度的参考真值, 以修订后的 FY-3C/TOU 太阳辐照度定标值接近该参考真值为修订目标。

考虑到 TOU 仪器自身漫反射板具有随时间衰变的客观规律, 选取 FY-3C 刚发星时的数据来确定漫反射板的偏差量, 以最大可能地减小漫反射板衰减对修订算法的影响。表 1 所示为 2013 年 10 月 2 日 FY-3B/TOU 和 SSBUV 经过日地距离订正后的太阳辐照度数据, 并以此作为参考真值。

表 1 基于 FY-3B/TOU 及 SSBUV 的太阳辐照度真值

Tab. 1 Solar irradiance based on SSBUV and FY-3B/TOU

Channel	1	2	3	4	5	6
Value	63.79	68.85	77.49	71.41	98.89	109.87

(3) 构造订正方程

在已知太阳辐照度参考真值, 以及假设安装矩阵  $\mathbf{A}$  用未知参数表示的条件下, 可根据 TOU 在轨辐射定标基本流程构造方程, 求解安装矩阵各未知参数的值。

TOU 具有 6 个波长吸收通道, 在垂直于卫星轨道平面方向对地扫描, 在天底方向采样 1 个点,

两侧各采样 15 个点, 共 31 个取样点。因此, 对于 TOU 在定标模式下, 每一圈扫描观测, 6 个通道共获取 186 个太阳辐照度原始观测数据  $F(i, j)$ , 其中  $i$  为通道编号 ( $i = 1, \dots, 6$ ),  $j$  为观测数据编号 ( $j = 1, \dots, 31$ )。

对每个观测时刻  $t_j$ , 可求得该时刻的太阳矢量, 进一步可求得式(1)中太阳矢量与理想漫反射板坐标系的几何角度, 记为  $\alpha_j, \beta_j$ 。由于假设实际的漫反射板坐标系与理想漫反射板坐标系之间存在偏差, 且假设两个坐标系可通过安装矩阵  $\mathbf{A}$  来相互转化, 因此, 根据式(10)、(11)可得到修订偏差后的 BRDF 订正系数。根据式(2), 可相应地构造出 186 个独立的订正方程:

$$F_0(i, j) = F(i, j)/K(\alpha, \beta, A), \quad (12)$$

其中:  $F_0(i, j)$  为修订偏差后的太阳辐照度真值。

由于每次观测时间较短(约 8 s), 因此  $F_0(i, j)$  的平均值与表 1 的参考真值  $F_0(i)$  之间应满足:

$$\sum_{j=1}^{31} F_0(i, j)/31 \approx F_0(i). \quad (13)$$

在以式(13)为基本约束的条件下, 可构造最小值问题:

$$\min \sum_{i=1}^6 \left( \sum_{j=1}^{31} F_0(i, j) - 31F_0(i) \right)^2, \quad (14)$$

即:

$$\min \sum_{i=1}^6 \left( \sum_{j=1}^{31} \frac{F(i, j)}{K(\alpha, \beta, A)} - 31F_0(i) \right)^2. \quad (15)$$

由于对任一观测时次, 除矩阵  $\mathbf{A}$  中各元素未知外, 其余各参数均已知, 因此在最优目标(15)下, 可求得最优参数矩阵  $\mathbf{A}$ , 此即为 TOU 实际仪器参考系与理想仪器参考系之间的偏差估计。

进一步, 在最优目标(15)的基础上可更为精细地设计最优目标函数。

由于表 1 中太阳辐照度参考真值是由其他气象卫星的观测给出, 而参考真值与 FY-3C/TOU 的理想真值之间必然存在着差异, 因此, 可设置相应地参考真值的偏移参数, 构造带有参照真值偏移参数的最优值问题:

$$\min \sum_{i=1}^6 \left[ \sum_{j=1}^{31} \frac{F(i, j)}{K(\alpha, \beta, A)} - 31(F_0(i) - \epsilon_i) \right]^2. \quad (16)$$

#### 4 修订效果及分析

以 FY-3C/TOU 在 2013 年 10 月 2 日 01:46 时次所观测的太阳辐照度原始观测值(未经 BRDF 修正的  $A_1$  板观测数据),利用上述修订算法对 FY-3C/TOU 实际数据的偏差进行估计,并进行相应的修订及结果分析。

在不对漫反射板坐标系的偏差进行修订时, FY-3C/TOU 太阳辐照度相对于表 1 的太阳辐照度参考真值的相对误差为  $-3.6\% \sim -36.5\%$ , 6 个通道的具体相对误差分析结果如图 3(a)所示。

利用偏差修订算法,在选取式(15)为最优目

标问题时,求解得到的实际漫反射板坐标系与理想漫反射板坐标系之间的转换矩阵为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1.442 0 & 0.870 3 & 0.266 7 \\ 1.060 1 & 0.930 2 & 1.092 7 \\ 0.515 2 & 1.169 5 & 0.782 5 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

将其代入式(12)并利用 BRDF 修订式(2)给出的偏差修订后的太阳辐照度相对误差在各通道之间呈现出较明显的改进效果,结果如图 3(b)所示。

从图 3(b)可以看出,6 个通道相对误差分别围绕各自的偏差中心进行波动,波动起伏的最大幅度约为  $3.2\%$ 。其中通道 6 的相对误差波动范围最大,约为  $9.4\% \sim 12.2\%$ ,其余通道的相对误差均小于  $6\%$ 。

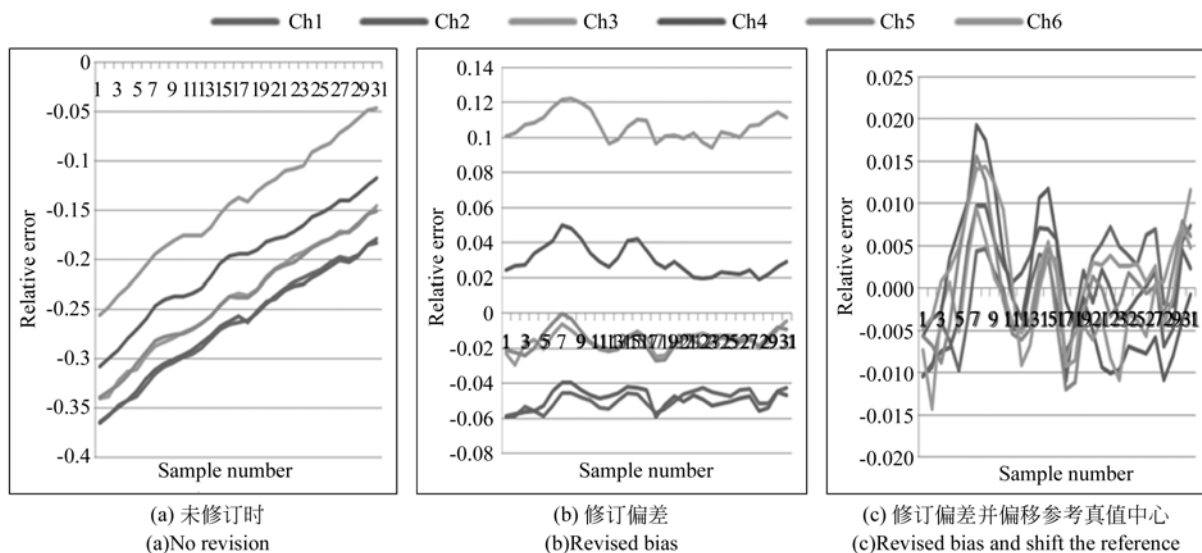


图 3 FY-3C/TOU 太阳辐照度修订偏差算法改进效果分析

Fig. 3 Improvement of revision algorithm for correcting the solar irradiance of FY-3C/TOU

相对误差波动中心不为 0 的原因,一方面是由于表 1 给出的太阳辐照度参考真值是根据 FY-3B/TOU 及 SSBUV 观测参数进行估计所得,其参考值与 FY-3C/TOU 观测时的太阳辐照度真值存在着一定的偏差;另一方面是由于 FY-3C/TOU 各通道观测性能与参考卫星所载仪器的观测性能之间存在差异,这也会造成相对误差波动中心的差异。

为此,在基于最优目标(15)修订结果的基础上,进一步引入参考真值的偏移参数,根据最优目标(16)得到 FY-3C/TOU 的修订结果的相对误差如图 3(c)所示。

从图 3(c)可以看出,考虑修订偏差并增加各通道参考真值偏移参数后,各通道的最大相对误差均小于  $2\%$ 。该相对误差范围可满足仪器在轨性能的正常评估及产品应用,达到了较好的修订效果。

## 5 结 论

针对 FY-3C/TOU 漫反射板偏差引起太阳辐照度异常的问题,本文以太阳辐照度的客观存在性为依据,根据 TOU 的观测特性及坐标系之间的转换关系,设计了 TOU 偏差修正算法。首先,将 TOU 在轨实际漫反射板坐标系与理想漫反射板坐标系之间的偏差量用未知转换矩阵表

示;然后利用其它卫星所观测的太阳辐照度真值为参考真值建立方程,并求解偏差量;最后,根据偏差量修正太阳矢量与漫反射板的角度关系,达到修订 FY-3C/TOU 太阳辐照度的目的。

数值分析结果表明该偏差修订算法可较好地给出 FY-3C/TOU 的仪器实际在轨偏差量,对太阳辐照度具有显著的修订效果。太阳辐照度最大相对误差从 35%降低为 2%,相对误差波动范围从 27.2%缩小为 3.2%。

### 参考文献:

- [1] 杨军,董超华. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用[M]. 北京:科学出版社,2011.  
YANG J, DONG CH H. *Products and applications for the new generation of FENGYUN polar-orbiting meteorological satellite* [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 王咏梅,王英鉴,王维和,等. FY-3 卫星紫外臭氧总量探测仪[J]. 科学通报, 2009, 54(23): 3778-3783.  
WANG Y M, WANG Y J, WANG W H, *et al.*. FY-3 UV total ozone detector [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(23): 3778-3783. (in Chinese)
- [3] WANG W H, ZHANG X Y, AN X Q, *et al.*. Analysis for retrieval and validation results of FY-3 Total Ozone Unit(TOU)[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(26): 3037-3043.
- [4] WANG W H, ZHANG X Y, WANG Y M, *et al.*. Introduction to the FY-3A Total Ozone Unit; instrument, performance and results[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(17): 4749-4758.
- [5] LEVELT P F, OORD G H J, DOBBER M E, *et al.*. The ozone monitoring instrument [J]. *IEEE Trans Geos Remote Sens.*, 2006, 44: 1093-1101.
- [6] DAVE J V, MATEER C L. Preliminary study on the possibility of estimating total atmospheric ozone from satellite measurements [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1967, 24: 414-427.
- [7] WANG W H, LAWRENCE F, ZHANG X Y, *et al.*. Cross-calibration of the Total Ozone Unit (TOU) With the Ozone Monitoring Instrument (OMI) and SBUV/2 for Environmental Applications [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, December, 2012, 50(12): 4943-4955.
- [8] 王淑荣,李福田,宋克非,等. 地外太阳紫外光谱测量[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1271-1277.  
WANG SH R, LI F T, SONG K F, *et al.*. Measurement of extraterrestrial solar ultraviolet spectrum [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1271-1277. (in Chinese)
- [9] 黄富祥,刘年庆,张鹏,等. 风云三号 A 星紫外臭氧垂直探测仪反演产品的比较和评估[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1568-1576.  
HUANG F X, LIU N Q, ZHANG P, *et al.*. Comparison and evaluation of retrieved ozone profiles from solar backscatter ultraviolet sounder on FY-3A satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1568-1576. (in Chinese)
- [10] 张振铎,王淑荣,李福田,等. 空间紫外遥感仪器漫反射板的真空紫外辐照特性[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2055-2059.  
ZHANG ZH D, WANG SH E, LI F T, *et al.*. Vacuum ultraviolet radiation characteristics of diffuser for space ultraviolet remote sensing instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2055-2059. (in Chinese)
- [11] 关敏,吴荣华. FY-3A 中分辨率光谱成像仪图像地理定位方法[J]. 应用气象学报, 2012, 23(5): 534-542.  
GUAN M, WU R H. Geolocation approach for FY-3A MERSI remote sensing [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2012, 23(5): 534-542. (in Chinese)
- [12] 吴荣华,杨忠东,关敏,等. 修正安装矩阵提高 FY-3B/MERSI 的地理定位精度[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(10): 1327-1332.  
WU R H, YANG ZH D, GUAN M, *et al.*. Improved FY-3B/MERSI geolocation accuracy using installation matrix [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(10): 1327-1332. (in Chinese)

- [13] 杨磊, 杨忠东. 极轨气象卫星自动地标导航方法[J]. 应用气象学报, 2009, 20(3): 329-336  
YANG L, YANG ZH D. The automated landmark navigation of the polar meteorological satellite[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(3): 329-336. (in Chinese)
- [14] 郭强, 杨磊, 赵现纲, 等. 气象卫星图像导航的地标匹配算法研究与优化[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(24): 152-156.  
GUO Q, YANG L, ZHAO X G, *et al.*. Research and optimization of landmark matching algorithm for meteorological satellite image navigation [J]. *Computer Engineering and application*, 2013, 49(24): 152-156. (in Chinese)
- [15] NISHIHAMA M, WOLFE R, SOLOMON D, *et al.*. MODIS Level 1A earth location: algorithm theoretical basis document [S]. *Version 3. 0*, NASA/Goddard Space Flight Center, 1997.

## 作者简介:



刘成保(1985—),男,山东淄博人,博士,助理研究员,2008年于山东师范大学获得学士学位,2013年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事极轨气象卫星遥感数据地理定位方面的研究。  
E-mail: liucb@cma. gov. cn



王维和(1964—),男,辽宁新民人,学士,正研级高级工程师,1986年于北京大学获得学士学位,主要从事星载紫外探测仪定标和数据处理工作。E-mail: wangwh@cma. gov. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)