

文章编号 1004-924X(2010)07-1568-09

# 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

黄富祥, 刘年庆, 张 鹏, 赵明现, 董超华

(中国气象局 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:**为了考察和评估我国首次自主研发并由新一代极地轨道气象卫星风云三号携带的紫外臭氧垂直探测仪 SBUS 的观测数据和反演产品的精度和稳定性,利用 SBUS 在轨观测数据开展了臭氧垂直廓线反演试验,并将反演产品与 NOAA 卫星同类仪器 SBUV/2 产品数据进行了系统比较。首先使用自主研发的风云三号紫外臭氧垂直廓线反演算法 FY\_V1.0 开展臭氧廓线反演试验,输入数据为 SBUS 2008 年 7 月 17 日~8 月 30 日在轨观测数据。然后,采用 3 种方法,即匹配像元数据直接比较,赤道地区平均反演廓线比较以及反演廓线与先验廓线残差比较,将反演结果与 SBUV/2 产品进行了比较。最后,基于各种比较结果进行分析和评估。结果显示,与 NOAA-16 和 17 卫星 SBUV/2 反演产品相比,SBUS 反演产品多数高度层相对偏差百分率在 $\pm 10\%$ 之间,部分层相对偏差达到 $\pm 15\%$ ;在 $20^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{S}$ 比较平均反演臭氧垂直廓线,最大差异为 5.4 DU,最小差异为 0,多数在 $\pm 0.3$  DU 之间;比较反演廓线与先验廓线的残差表明,较大残差发生的高度以及残差正负性等方面存在明显差异。结论认为,在未对数据做任何订正的条件下,SBUS 反演臭氧垂直廓线产品在多数高度层精度尚可,但是,与 SBUV/2 产品相比,SBUS 获取的臭氧垂直廓线存在较大的系统性偏差,需要通过与 SBUV/2 的交叉定标进行订正。

**关键词:**风云三号 A 星;NOAA 卫星;紫外臭氧垂直探测仪;臭氧垂直廓线反演

**中图分类号:**TP73 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101807.1568

## Comparison and evaluation of retrieved ozone profiles from solar backscatter ultraviolet sounder on FY-3A satellite

HUANG Fu-xiang, LIU Nian-qing, ZHANG Peng, ZHAO Ming-xian, DONG Chao-hua

*(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)*

**Abstract:** In order to evaluate the precision and stability of ozone profiles from the Solar Backscatter Ultraviolet Sounder (SBUS) on FY-3A satellite, the retrieval experiments were carried out by using SBUS measurements and the ozone profiles from SBUS and those from SBUV/2 on NOAA satellites were compared. Firstly, on the basis of FY-3 ozone profile retrieval algorithm FY\_V1.0, the ozone profile retrievals were undertaken by using the SBUS measurements during 17 July to 30 August 2008

**收稿日期:**2009-06-25; **修订日期:**2009-09-08.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 40775024);国家重点基础研究计划资助项目(No. 2005CB422202);国家科技支撑计划资助项目(No. 2008BAC34B04-2);国家 863 高科技研究发展计划资助项目(No. 2008AA121703)

as input data. Then, three kinds of methods were proposed to compare the retrieval data of SBUS with those of SBUV/2. These methods are the direct comparison of SBUS ozone profiles with those matching profiles of SBUV/2, comparison of SBUS mean ozone profiles with those of SBUV/2 in tropics and the comparison of residuals of retrieved and apriori ozone profiles of SBUS and SBUV/2. Finally, the comparison and evaluation results were analyzed. Comparison results indicate that the relative bias percentage of SBUS ozone profiles relative to those of SBUV/2 at matching pixels are within  $\pm 10\%$  at most layers, but reaches  $\pm 15\%$  at fewer layers; the differences of SBUS mean ozone profile with that of SBUV/2 in tropics are smaller than  $\pm 0.3$  DU at most layers. The biggest difference is 5.4 DU and the smallest is 0; the comparison of the residuals of retrieved and apriori ozone profiles shows notable difference between SBUS and SBUV/2 in the height of residual occurred and the negatives and positives of the residuals. It is concluded that the precisions of SBUS ozone profiles are pretty good at most layers without doing any correction. But, there exists some remarkable differences between SBUS ozone profiles and those of SBUV/2. To improve the precisions of SBUS ozone profiles, it is necessary to put efforts on measurement correction based on inter-calibration with SBUV/2.

**Key words:** FY-3A satellite; NOAA satellite series; Solar Backscatter Ultraviolet Sounder; Ozone Profile retrieval

## 1 引言

臭氧是地球大气中一种非常重要的微量气体。大气臭氧总量的 90% 左右分布在平流层,其余的主要分布在对流层。分布于大气不同高度层的臭氧具有完全不同的气候效应<sup>[1]</sup>。平流层臭氧强烈吸收太阳紫外线,为人类和地球生物圈提供天然保护屏障,是平流层大气的主要热源。对流层大气则可以吸收地球长波辐射,具有类似于 CO<sub>2</sub> 的温室气体效应<sup>[1-5]</sup>。人类活动对大气臭氧的破坏,尤其是排放的消耗臭氧的物质对平流层臭氧的损耗,已经引发了严重的气候变化。为此,由世界气象组织 WMO(World Meteorological Organization)、联合国环境规划署 UNEP(United Nations Environment Programme)等组织发起,从 1985 年开始定期发布全球大气臭氧损耗状况及其气候效应的评估报告<sup>[2-5]</sup>。为了监测和评估全球大气臭氧不同高度层含量的分布变化,需要卫星臭氧垂直探测仪获取的高精度臭氧垂直分布廓线数据的支持。

2008 年 5 月成功发射的我国新一代极地轨道气象卫星风云三号 A 星携带的紫外臭氧垂直探测仪 SBUS(Solar Backscatter Ultraviolet

Sounder)是我国首次自主研制和星载的仪器。FY-3A 星 SBUS 的主要目标是获得高精度的全球大气臭氧垂直廓线产品,为全球大气臭氧变化监测及全球气候变化研究提供基础数据<sup>[6-7]</sup>。利用大气紫外后向散射技术开展卫星大气臭氧垂直廓线探测,开始于 1970 年美国在 Nimbus-4 卫星上携带的紫外后向散射仪 BUV(Backscatter Ultraviolet)<sup>[8]</sup>。自那以后,美国卫星紫外臭氧垂直探测仪 SBUV(Solar Backscatter Ultraviolet),及改进型 SBUV/2 等仪器,已经在 NOAA 等地球极地卫星系列上星载了近 40 年,为全球气候变化研究提供了大量可靠的卫星观测数据<sup>[8-11]</sup>,也成为了 WMO 全球臭氧损耗评估报告的重要依据<sup>[2-5]</sup>。

SBUS 是我国第一次自主研制的星载仪器,其观测数据能否顺利生成臭氧垂直廓线产品,产品精度和稳定性状况如何,是否暴露出某些技术不足等等,都是迫切需要解决的问题。在风云三号卫星发射后,课题组在国家卫星气象中心组织下开展了在轨测试和数据反演试验工作。

本文利用我国自主研究开发的风云三号卫星紫外臭氧垂直廓线反演算法 FY\_V1.0 和 SBUS 于 2008 年 7 月 17 日~8 月 30 日获取的在轨观测数据,开展了紫外臭氧垂直廓线产品反演试验,

将反演产品与同期美国 NOAA-16 和 NOAA-17 卫星 SBUV/2 产品开展系统比较,对 SBUS 臭氧垂直廓线产品的精度和稳定性等性能状况开展了初步评估。

## 2 试验数据和方法

本文卫星数据反演试验使用的臭氧垂直廓线反演算法,为自主研究开发的风云三号卫星紫外臭氧垂直廓线反演算法 FY\_V1.0。反演试验中,将 SBUS 在 2008 年 7 月 17 日~8 月 30 日观测数据输入 FY\_V1.0 反演算法软件包,输出数据是反演生成的臭氧垂直廓线产品。

用于比较的 NOAA 卫星紫外臭氧垂直廓线数据来源于 NOAA/NESDIS 发布的同期 NOAA-16 和 17 卫星 SBUV/2 紫外臭氧垂直廓线业务产品。SBUS 反演产品与 SBUV/2 数据进行了如下 3 种比较:匹配像元的数据直接比较,赤道地区带状区域平均反演廓线比较,以及反演廓线与先验廓线残差比较。

第一种直接比较匹配像元 SBUS 和 SBUV/2 反演的臭氧垂直廓线不同高度层的臭氧数据,计算 SBUS 臭氧值相对于 SBUV/2 数据的相对偏差百分率,属于最直接的比较方法。由于 NOAA 卫星 SBUV/2 产品精度已经得到公认,通过计算相对偏差可以得到对 SBUS 产品精度的可靠估计。这里的匹配像元定义为:观测日期相同,经纬度位置差异都在  $0.5^\circ$  以内的 SBUS 和 SBUV/2 像元。数据比较中忽略了观测时间和地理位置微小差异对臭氧廓线的影响。有研究表明,在发生强天气过程时,大气臭氧可能在若干个小时内发生显著变化。但是,在通常情况下,这样的近似处理不会产生严重差异。

SBUS 与 SBUV/2 相对偏差百分率采用如下公式逐层计算:

$$\delta_i = \frac{(X_i - Y_i)}{Y_i} \times 100\%, \quad (1)$$

其中,  $\delta_i$  为第  $i$  层相对偏差百分率,  $i$  为反演廓线层数 ( $i=1, 2, \dots, 21$ ),  $X_i$  为 SBUS 反演廓线第  $i$  层的臭氧值 (DU),  $Y_i$  为 SBUV/2 反演廓线第  $i$  层臭氧值 (DU)。

通过编写计算程序选择匹配像元,在本研究时间段内共获得 SBUS 与 NOAA-16 上的

SBUV/2 相匹配的臭氧垂直廓线为 204 条, SBUS 与 NOAA-17 上的 SBUV/2 相匹配的臭氧垂直廓线为 158 条。对这些匹配像元的各对臭氧垂直廓线,分别采用式(1)进行计算,得出了各对廓线的相对偏差百分率,然后对这些计算结果取平均,分别得到 SBUS 数据相对于 NOAA-16 和 NOAA-17 卫星 SBUV/2 臭氧廓线产品的各层相对偏差百分率平均值。

第二种比较赤道带状区域平均廓线的差异。NOAA/NESDIS 监测不同 NOAA SBUV/2 产品稳定性时,常用这种赤道带平均臭氧廓线比较方法。全球大气臭氧主要在赤道地区上空产生,这里的臭氧垂直廓线具有比较好的稳定性,不同卫星臭氧垂直探测仪在该区域获得的平均臭氧垂直廓线应该具有一致性。在该时间段内 SBUS 与卫星 SBUV/2 平均臭氧廓线之间的一致性如何,能够反映出 SBUS 观测数据是否存在系统性偏差。通过编程计算,风云三号卫星 SBUS 和 NOAA-16 和 17 卫星 SBUV/2 在该期间  $20^\circ\text{N} \sim 20^\circ\text{S}$  分别得到了 1816、3893 和 4095 条臭氧垂直廓线,分别计算生成 SBUS 和 SBUV/2 的平均廓线,并采用式(1)计算了平均廓线之间的差异。

第三种比较 SBUS 与 SBUV/2 反演廓线与先验廓线残差之间的差异性。进行臭氧垂直廓线反演计算时,首先利用先验信息生成先验臭氧垂直廓线,然后利用卫星观测数据,通过循环迭代计算,最终生成反演臭氧垂直廓线。在此过程中,卫星观测数据对反演臭氧垂直廓线的改造主要通过反演廓线与先验廓线的残差体现。选定赤道区域像元,开展 SBUS 与 SBUV/2 反演廓线与先验廓线残差比较,能够反映出 SBUS 观测数据与 SBUV/2 在精度方面的差异。为此,选取在  $20^\circ\text{N} \sim 20^\circ\text{S}$  的像元,分别比较 SBUS 和 NOAA-16、17 SBUV/2 反演廓线与先验廓线的残差,采用如下公式逐层计算反演廓线相对于先验廓线的残差百分率:

$$\eta_i = \frac{(R_i - A_i)}{A_i} \times 100\%, \quad (2)$$

其中,  $\eta_i$  为第  $i$  层偏差百分率,  $i$  为廓线层 ( $i=1, 2, \dots, 21$ ),  $R_i$  为 SBUS 或 SBUV/2 反演廓线第  $i$  层臭氧值 (DU),  $A_i$  为先验廓线第  $i$  层臭氧值 (DU)。

针对  $20^\circ\text{N} \sim 20^\circ\text{S}$  的反演廓线,按照式(2)计

算各条廓线残差百分率,然后对所有廓线取平均,形成 $20^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{S}$ 反演廓线与先验廓线残差百分率的平均值。

### 3 风云三号卫星紫外臭氧垂直廓线反演算法 FY\_V1.0

为了满足风云三号卫星生成臭氧垂直廓线产品的需要,在国家卫星气象中心的支持下,课题组从2003年开始开展风云三号卫星紫外臭氧垂直廓线反演算法开发和软件研制工作,并于2006年底完成了原型算法和软件的开发。2007年,通过中美大气科学技术合作,借鉴美国V8业务反演算法,对原型算法和软件进行了改进和完善,形成了比较成熟的算法FY\_V1.0<sup>[7]</sup>。

卫星紫外臭氧垂直廓线反演算法主要由正演计算和反演计算两部分组成<sup>[7-8]</sup>。正演计算是反演计算的基础,主要利用辐射传输模式和已知的臭氧垂直廓线及其观测条件等各种参数,模拟计算卫星紫外臭氧垂直探测仪的星上观测数据;反演计算,则是利用卫星观测值,推断观测目标大气臭氧垂直廓线。

FY\_V1.0正演计算使用的辐射传输模式,是美国近年来开发的紫外波段专用辐射传输模式TOMRAD<sup>[12]</sup>。计算中使用的标准大气臭氧垂直廓线和温度廓线,来自该模式自带的美国标准气候数据库,根据计算需要构造了多种太阳天顶角、下垫面气压和反照率等观测条件。通过辐射传输计算,模拟星上观测状况,给出各种条件下对应的仪器观测值<sup>[6-7]</sup>。在计算过程中,注意紫外波段辐射传输与波长的相关性<sup>[8]</sup>。对波段 $<290\text{ nm}$ ,大气顶紫外后向散射辐射强度的计算,通过求解在Rayleigh散射大气中的单次散射(Single Scattering,SS)得到解决。在此波段上的辐射计算公式为<sup>[8]</sup>:

$$I_{ss} = F_{\lambda} \frac{\beta_{\lambda}^* P(\Theta)}{4\pi} \int_0^{p_s} \exp[-S_x(p)\alpha_{\lambda}^* X(p) - S_p(p)\beta_{\lambda}^* p] dp, \quad (3)$$

其中, $I_{ss}$ 为大气顶观测到的太阳紫外后向散射辐射值, $F_{\lambda}$ 为波长 $\lambda$ 处太阳辐照度, $\beta_{\lambda}^*$ 为单位大气压有效Rayleigh散射系数, $P(\Theta)$ 是散射角为 $\Theta$ 时的Rayleigh散射相函数, $\alpha_{\lambda}^*$ 为单位质量臭氧

的有效吸收系数, $S_x(p)$ 是气压 $p$ 气压层的散射辐射穿过的斜程臭氧质量, $S_p(p)$ 是斜程大气质量, $X(p)$ 是 $p$ 气压层以上臭氧气柱含量, $p_s$ 是表面气压。

对于波长 $>290\text{ nm}$ ,大气顶紫外后向散射不仅受到光学厚度很大的Rayleigh大气的多次散射,还受到下垫面、气溶胶和云等因素的影响,这些通道的紫外后向散射辐射可分成单次散射SS,多次散射与反射(Multiple Scattering and Reflection,MSR)两部分。首先在表面有效反照率 $R^*$ ,有效气压为 $p^*$ 的等效Lambert面上,计算在已知条件下大气顶包括单次散射、多次散射和反射在内的总辐射,计算公式为<sup>[8]</sup>:

$$I_M = I_0 + \frac{R^* T}{1 - R^* S_b}, \quad (4)$$

其中, $I_M$ 为大气顶观测得到的太阳紫外后向散射总辐射, $I_0$ 为计算参数, $T$ 为后向散射辐射进入卫星探测器的比率, $S_b$ 为半球反照率,这3个参数都是 $\alpha_{\lambda}^*$ , $\beta_{\lambda}^*$ , $X(p)$ ,太阳天顶角 $\theta_0$ ,温度廓线 $T(p)$ 以及 $R^*$ 和 $p^*$ 的函数<sup>[2-3]</sup>。

在设计观测条件下,分别计算总辐射 $I_M$ 和单次散射辐射 $I_{ss}$ ,则多次散射和反射辐射 $I_{MSR}$ 可以通过二者计算得到:

$$I_{MSR} = I_M - I_{ss}. \quad (5)$$

通过各种观测条件下的计算,就可以建立通道总辐射 $I_M$ 与多次散射和反射辐射 $I_{MSR}$ 之间的对应关系数据表,从而建立用来快速计算多次散射和反射辐射的辐射查算表。利用辐射查算表和线性插值计算,就可以通过卫星通道观测向量,计算得到对应的多次散射和反射辐射,进一步得到通道计算向量。

FY\_V1.0反演计算过程主要由8部分组成:先验信息生成,臭氧总量反演及初估廓线生成,单次散射计算,多次散射与反射计算,反演迭代计算,收敛性判断,循环迭代计算,臭氧廓线产品生成。由于反演计算是辐射传输方程的病态求解<sup>[13-14]</sup>,臭氧垂直廓线反演计算必须以先验臭氧垂直廓线作为计算起点。先验臭氧垂直廓线的生成,是利用预先收集整理的全局大气臭氧垂直廓线气候数据库,用卫星观测地点经纬度和观测日期等数据作为输入条件,通过先验信息生成功能模块,生成先验臭氧廓线和温度廓线等先验信息<sup>[15-16]</sup>。

反演计算的核心部分,是利用最优估计方法开展的循环迭代计算。循环迭代计算公式如下<sup>[13-14]</sup>:

$$x_{n+1} = x_0 + \mathbf{S}_X \mathbf{K}_n^T (\mathbf{K}_n \mathbf{S}_X \mathbf{K}_n^T + \mathbf{S}_e)^{-1} [(\mathbf{y}_m - \mathbf{y}_n) - \mathbf{K}_n (x_0 - x_n)], \quad (6)$$

其中,  $x_{n+1}$  为第  $n$  次 ( $n \geq 1$ ) 臭氧廓线反演迭代计算的结果,  $x_0$  和  $x_1$  分别为先验臭氧廓线和初估臭氧廓线,  $\mathbf{S}_X$  为先验臭氧廓线协方差矩阵, 表示生成先验臭氧廓线过程中伴随的协方差,  $\mathbf{S}_e$  为仪器观测协方差矩阵, 表示由于仪器观测精度造成的误差,  $\mathbf{y}_m$  为仪器获得的大气顶观测向量,  $\mathbf{y}_n$  为第  $n$  次计算得到的计算向量,  $\mathbf{K}_n$  为第  $n$  次迭代计算的核矩阵,  $\mathbf{K}_n$  由单次散射核矩阵和多次散射与反射核矩阵组成。

反演计算生成的 11 层臭氧垂直廓线通过线性内插最终生成从地表到大气顶共计 21 层的臭氧垂直廓线反演产品, 量纲为 DU。21 层反演廓线各层底部气压值分别为: 101.325, 63.936, 40.327, 25.432, 16.009, 10.132, 6.393, 4.053, 2.543, 1.60, 1.103, 0.638, 0.405, 0.254, 0.16, 0.101, 0.063, 0.04, 0.02, 0.016, 0.001, 单位为 kPa, 顶层向上延伸到气压无穷小处。

## 4 反演结果的比较和分析

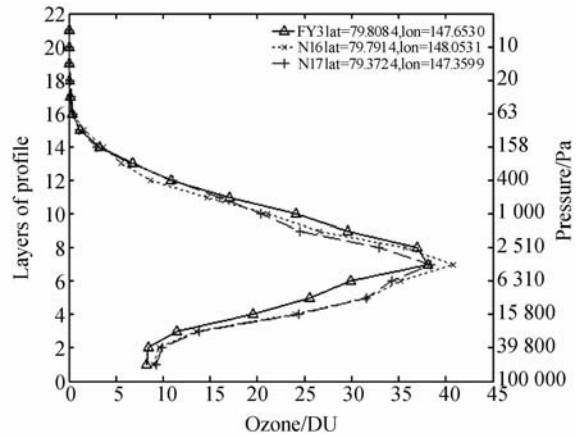
SBUS 观测数据的臭氧垂直廓线反演试验进展顺利, 全部顺利生成了臭氧垂直廓线产品。本文利用这些反演数据, 与 NOAA/NESDIS 发布的 NOAA-16 和 17 卫星 SBUV/2 业务产品进行了比较。

### 4.1 匹配像元反演廓线的比较

按照相同观测日期经纬度位置差异都在  $0.5^\circ$  以内的像元匹配原则, 利用编写的专用程序筛选, 得到研究时段内 SBUS 与 NOAA 16 SBUV/2 像元匹配的臭氧垂直廓线 204 条, SBUS 与 NOAA 17 SBUV/2 像元匹配的臭氧垂直廓线 158 条。

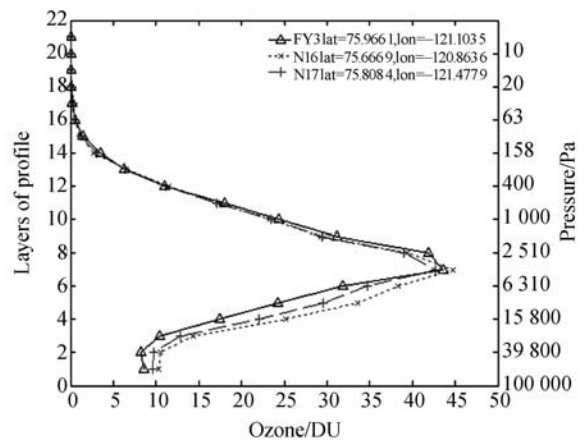
图 1(a) 和 (b) 分别给出了 2008-07-17 和 2008-07-21 两个时次 SBUS 与 NOAA 16 和 17 卫星 SBUV/2 匹配像元反演廓线的比较情况。

对于这些像元匹配的臭氧垂直廓线, 分别利用式(1)计算得到各组匹配廓线 SBUS 相对于 NOAA 16 和 17 SBUV/2 的各层相对偏差百分率, 对各层相对偏差百分率进行平均, 计算得到



(a) 2008 年 7 月 17 日一组比较廓线

(a) Comparison of one group profiles at 2008-07-17



(b) 2008 年 7 月 21 日一组比较廓线

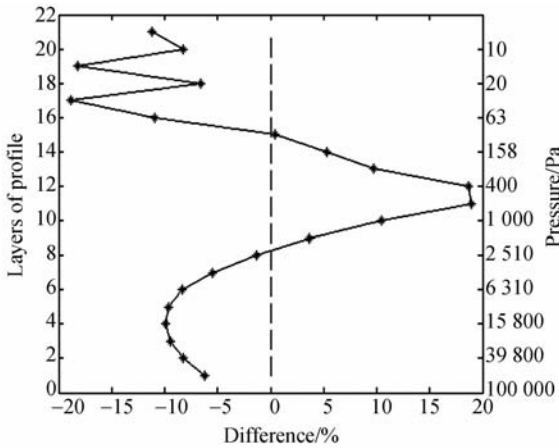
(b) Comparison of one group profiles at 2008-07-21

图 1 SBUS 反演廓线与 NOAA 16 和 17 卫星 SBUV/2 产品比较

Fig. 1 Comparisons of SBUS retrieved ozone profiles with those of SBUV/2 on NOAA 16 and 17 satellites

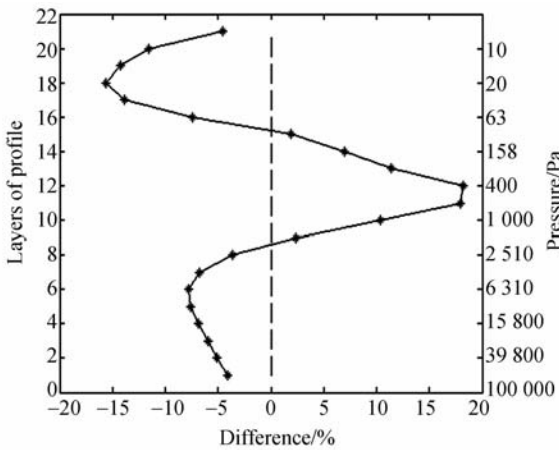
SBUS 反演臭氧垂直廓线相对于 NOAA 16 和 17 SBUV/2 的相对偏差百分率。图 2(a), (b) 给出 SBUS 相对于 NOAA-16 和 17 卫星 SBUV/2 反演产品的相对偏差百分率。

从图 1~2 可见, 在 SBUS 观测数据未经任何订正的情况下, 其反演生成的臭氧垂直廓线与 NOAA 16 和 17 卫星 SBUV/2 的差异性基本相同, 在多数高度层上相对偏差百分率都在  $\pm 10\%$  以内, 而在第 11 和 12 层, 以及第 17 至 19 层等高



(a) SBUS 与 NOAA 16 SBUV/2 的比较

(a) Comparison of SBUS with NOAA 16 SBUV/2



(b) SBUS 与 NOAA 17 SBUV/2 的比较

(b) Comparison of SBUS with NOAA 17 SBUV/2

图 2 SBUS 反演廓线与 NOAA 卫星 SBUV/2 产品比较时各层的相对偏差百分率平均值(%)

Fig.2 Relative bias percentages for different layers between SBUS retrieved ozone profiles with those of SBUV/2 data on NOAA series(%).

度层的差异比较大,相对偏差百分率达到±15%以上。

### 4.2 赤道地区平均反演廓线的比较

编写专用程序,分别提取 SBUS 和 SBUV/2 在 20°N~20°S 的赤道带内像元臭氧垂直廓线反演产品,分别计算了 SBUS 和 SBUV/2 平均反演廓线,对其差异性进行了比较,如图 3。

从图 3 可见,NOAA-16 和 17 SBUV/2 的平均臭氧垂直廓线差异很小,最大差异是第 11 层,

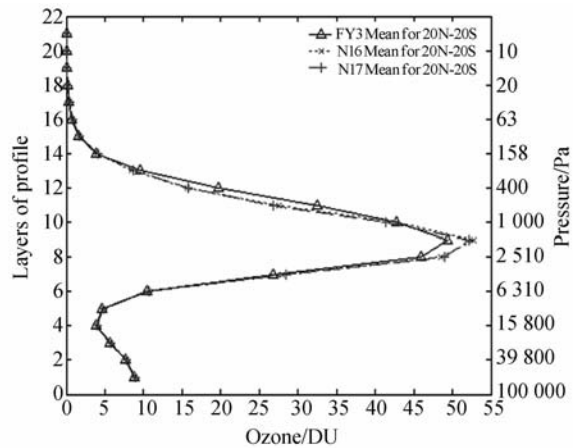


图 3 在 20°N~20°S 区域 SBUS 和 SBUV/2 反演廓线平均值的比较

Fig.3 Comparison of SBUS and SBUV/2 mean retrieved ozone profiles for 20°N-20°S

为 1.5 DU,其它各层差异都在±0.6 DU 以内。SBUS 平均反演廓线与之相比,差异比较明显,最大差异是第 12 层,达到 5.4 DU,最小差异是第 21 层为 0,多数层差异在±0.3 DU 以内。从 NOAA-16 和 17 SBUV/2 平均廓线比较情况来看,不同 SBUV/2 反演廓线具有良好的一致性,而 SBUS 与 SBUV/2 平均廓线相比,在峰值所在的第 9 层附近差异最为明显,SBUS 反演值一般小于 SBUV/2 数据,而在峰值以上的第 11 至 13 层附近,SBUS 的反演值一般大于 SBUV/2 的数据,表明 SBUS 反演廓线与 SBUV/2 还是存在一些系统性差异。

### 4.3 反演廓线与先验廓线的残差比较

臭氧垂直廓线反演计算始于先验廓线的迭代计算。反演廓线与先验廓线之间的残差,只体现卫星观测数据和反演计算对气候臭氧垂直廓线的修正状况。针对位于 20°N~20°S 的 SBUS 和 SBUV/2 反演廓线和先验廓线,本文用式(2)计算了反演廓线与先验廓线的残差百分率,然后对所有这些廓线计算 SBUS 和 SBUV/2 反演廓线与先验廓线残差百分率的平均值,图 4 给出 3 条残差百分率平均廓线的比较情况。图 4 可见,SBUS 与 NOAA-16 和 17 SBUV/2 残差平均廓线的差异主要表现在两个方面:一是在臭氧垂直廓线峰值附近的第 9 至 13 层,SBUS 残差百分率都比较大,一般在+15%以上,部分层甚至达到+25%,而两个 SBUV/2 残差百分率都比较小,均在

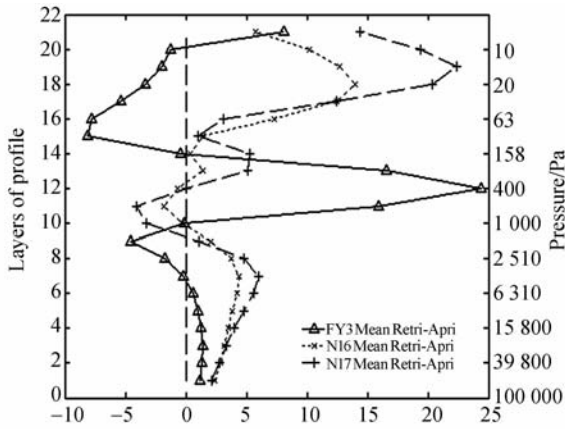


图 4 SBUS 与 NOAA-16 和 17 SBUV/2 反演廓线与先验廓线残差百分率平均值的比较 (%)

Fig. 4 Comparison of mean residual percentage of retrieved and a priori profiles of SBUS and SBUV/2 (%)

+5% 以内;二是在第 15 至 20 层各层,SBUS 残差百分率都为负数,而 SBUV/2 则相反,均为正数。比较结果表明,SBUS 观测数据与 SBUV/2 相比存在一定误差。

## 5 讨 论

本文利用在轨测试阶段数据开展臭氧垂直廓线反演试验,并对反演产品与 NOAA 卫星同类仪器 SBUV/2 的数据进行初步比较和分析,结果表明,在未对 SBUS 数据采取任何订正的条件下,SBUS 反演的臭氧垂直廓线与 SBUV/2 产品相比,大部分高度层精度尚可,表明 SBUS 基本取得成功。但是,匹配像元的臭氧垂直廓线比较表明,与 SBUV/2 数据相比,SBUS 在多数高度层相对偏差百分率在  $\pm 10\%$  以内,部分高度层达到  $\pm 15\%$ ,与臭氧垂直廓线年际大约  $\pm(1\sim 2)\%$  的变化幅度相比,存在很大偏差。赤道地区平均臭氧垂直廓线,以及反演廓线与先验廓线残差比较

结果也表明,SBUS 获取的臭氧垂直廓线产品存在一些系统性偏差。

误差分析表明,卫星紫外臭氧垂直探测仪获取的紫外臭氧垂直廓线误差来源主要在 3 个方面:仪器观测误差,正演计算误差,以及反演计算误差<sup>[7-8]</sup>。课题组在开发 FY\_V1.0 算法过程中,采取了一些措施改进正演和反演计算的误差。利用 SBUV/2 的 L1b 观测数据开展的对比反演试验结果表明,FY\_V1.0 算法包括正演和反演在内的计算相对误差在控制范围以内。因此,本文比较结果显示的 SBUS 臭氧垂直廓线误差来源,基本可排除算法误差,应该主要归结于观测误差。

## 6 结 论

本文利用我国新一代极地轨道气象卫星风云三号在轨观测数据,考察和评估了我国首次自主研制和星载的卫星紫外臭氧垂直探测仪 SBUS 的观测数据和反演产品的精度。通过与美国 NOAA 卫星同类仪器 SBUV/2 的多种比较和分析,得到如下基本结论:我国第一次自主研制的风云三号卫星紫外臭氧垂直探测仪基本取得成功。在未采取数据订正的条件下,SBUS 获取的臭氧垂直廓线产品与 SBUV/2 相比,在多数层相对偏差百分率在  $\pm 10\%$  以内,部分层相对偏差达到  $\pm 15\%$  以上;赤道区域平均反演廓线比较表明,最大层差异为 5.4 DU,多数层差异在  $\pm 0.3$  DU 以内;反演廓线与先验廓线的比较结果显示,SBUS 残差在多数层达到  $+15\%$  以上,残差百分率多数层为负数,与 SBUV/2 存在显著差异。这些数据均表明 SBUS 作为我国首次自主研制的仪器,在数据和产品的精度上还存在一些问题。为了提高 SBUS 臭氧垂直廓线产品精度,未来应该努力通过与 SBUV/2 的交叉定标进一步改进 SBUS 观测数据的精度。

## 参考文献:

[1] KONDRATYEV K Y,VAROTSOS C. *Atmospheric ozone variability*, Springer-Paris in Environ-

mental Sciences [M]. Springer Published in association with Praxis Publishing, Chichester, UK, 2000.

[2] WMO/UNEP. *Scientific Assessment of ozone de-*

- pletion;2006[M]. WMO, 2006.
- [3] WMO/UNEP. *Scientific Assessment of Ozone Depletion*;2002[M]. WMO, 2002.
- [4] WMO/UNEP. *Scientific Assessment of Ozone Depletion*;1998[M]. WMO, 1998.
- [5] WMO/UNEP. *Scientific Assessment of Ozone Depletion*;1994[M]. WMO, 1994.
- [6] 黄富祥,刘年庆,赵明现,等. 利用风云三号卫星紫外臭氧垂直探测仪观测数据反演臭氧垂直廓线[J]. 科学通报,2009,54(9):2556-2561.  
HUANG F X, LIU N Q, ZHAO M X, *et al.*. Vertical ozone profiles deduced from measurements of SBUS on FY-3 satellite[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009,54(9):2556-2561.
- [7] 黄富祥,赵明现,杨昌军,等. 风云三号卫星紫外臭氧垂直廓线反演算法及对比反演试验[J]. 自然科学进展,2008,18(10):1136-1142.  
HUANG F X, ZHAO M X, YANG C J, *et al.*. Comparative retrieval experiments of ozone profiles retrieval algorithm of FY-3 satellite[J]. *Progress in Natural Science*, 2008,18(10):1136-1142.
- [8] BHARTIA P K, MCPETERS R D, MATEER C L, *et al.*. Algorithm for the estimation of vertical ozone profiles from the backscattered ultraviolet technique[J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101 (D13): 18793-18806.
- [9] STOLARKSKI R S, KRUEGER A J, SCHOEBERL M R, *et al.*. Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease[J]. *Nature*, 1986,322:808-811.
- [10] BOJKOV R D, FIOLETOV V F. Estimating the global ozone characteristics during the last 30 years[J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 16537-16551.
- [11] RANDEL W J, STOLARSKI R S, CUNNOLD D M, *et al.*. Trends in the vertical distribution of ozone[J]. *Science*, 1999,285:1689-1692.
- [12] CELARIER E A, FLITTNER D E. *What you need to know to run TOMRAD* [M]. TOMRAD user guide,2001.
- [13] RODGERS C D. Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of Thermal Radiation[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1976,14:609-624.
- [14] RODGERS C D. Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sounding measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990,95(D5):5587- 5595.
- [15] KLENK K F, BHARTIA P K, FLEIG A J, *et al.*. Vertical ozone profile determination from Nimbus-7 SBUV measurements[C]. *Fifth conference on Atmospheric Radiation, Baltimore, Maryland, PP 103-106*, 1983.
- [16] FLEIG A J, KLENK K F, BHARTIA P K, *et al.*. Vertical ozone profile results from the Nimbus-4 BUUV data[C]. *the Fourth conference on Atmospheric Radiation, Toronto, American Meteorological Society, Boston, Massachusetts, 20-26*, 1981.

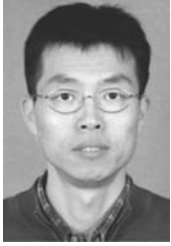
## 作者简介:



黄富祥(1967—),男,湖北蕲春人,博士,博士后,副研究员,2000年于中国科学院植物研究所获得博士学位,2002年从中国科学院大气物理研究所博士后出站,主要从事卫星遥感大气臭氧和卫星探测闪电等方面的研究。E-mail: hfx@nsmc.cma.gov.cn



刘年庆(1980—),男,北京人,博士研究生,国家卫星气象中心助理研究员,主要从事卫星遥感、模式识别、图像处理等方面的研究。E-mail: liunq@cma.gov.cn



张 鹏(1970—),男,陕西铜川人,博士,研究员,博士生导师,风云三号卫星应用系统副总设计师,1998年于中国科学院大气物理研究所获得博士学位,主要从事卫星大气遥感、卫星资料同化和卫星辐射定标等方面的研究。E-mail: zhangp@cma.gov.cn



董超华(1945—),女,河南浞池人,研究员,硕士生导师,风云三号卫星应用系统总设计师,主要从事卫星大气探测原理、大气辐射传输计算、卫星资料应用等方面的研究。E-mail: dchua@nsmc.cma.gov.cn



赵明现(1981—),男,河南许昌人,硕士,助理研究员,2006年于中国气象科学研究院获得硕士学位,主要从事卫星遥感和电离层磁层耦合的研究。E-mail: zhaomx@cma.gov.cn

## ● 下期预告

# 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调

巩 盾<sup>1,2</sup>,田铁印<sup>1</sup>,王 红<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

离轴三反射系统近年来在空间传感器载荷中得到广泛应用,随着光学系统成像质量的提高,对离轴三反射系统的装调精度提出了更高要求;由于离轴三反射光学系统检测和装调的复杂性,需要提出一套快捷、有效的装调方法。针对各种失调量产生的残余像差,采用多视场 ZYGO 干涉仪自准干涉检验,由干涉仪得到表征系统失调量引起残余像差的一系列 Zernike 系数,利用 Zernike 系数与 Seidel 像差系数之间的相关性将之转化为几何像差作为校正对象。由光学设计软件求得与系统失调量相关的灵敏度矩阵,并确定对残余像差影响最敏感的失调量。当失调量被确定后,将调整后的结果再次代入光学设计软件进行验证。多次迭代后,得到系统的 RMS 值小于  $0.04\lambda$  的良好结果,证明了这种指导装调的方法是行之有效的。