

文章编号: 1672-8785(2013)07-0009-06

高光谱分辨率资料通道选择方法研究

郭海龙 杜华栋 何明元

(中国人民解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101)

摘 要: 从用经典物理法反演大气参数的误差分析角度出发, 利用贝叶斯原理探究了通道特性、背景误差、观测误差和仪器噪声等在反演大气参数时对反演精度的影响, 提出了一个定量衡量通道对反演大气参数精度的贡献指标。以此指标为准则, 对用高光谱分辨率资料反演大气温度廓线时的通道选择方案进行了设计和论证。以欧洲中心在 2012 年发射的第二代红外大气探测干涉仪 (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI) 为对象, 从 8461 个通道中选出了 300 个贡献指标最大的通道, 并将它们与 AAPP 发布的应用通道作了比较。结果证明, 本文选用的方法在选择反演大气温度廓线的通道时是有效可行的。

关键词: 误差转移; 高光谱分辨率; 通道选择

中图分类号: TP7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.07.03

Research on Channel Selection of High Spectral Resolution Data

GUO Hai-long, DU Hua-dong, HE Ming-yuan

(*Institute of Meteorology and Oceanography, University of Science and Technology of PLA, Nanjing 211101, China*)

Abstract: To analyze the error produced when the atmospheric parameters are inverted by using the classical physical method, the influence of channel characteristics, background error, observation error and instrument noise etc on inversion accuracy is analyzed by using the Bayesian principle during the inversion of atmospheric parameters. An index for quantitatively measuring the contribution of channels to the inversion accuracy of atmospheric parameters is proposed. Taking this index as a criterion, a channel selection scheme is designed and demonstrated when the atmospheric temperature profile is inverted by using high spectral resolution data. 300 channels which have the greatest contribution index are selected from 8461 channels of the second-generation Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) launched in 2012 and are compared with the application channels published by AAPP. The result shows that the proposed channel selection method is effective and feasible for the inversion of atmospheric temperature profile.

Key words: error transfer; high spectral resolution; channel selection

收稿日期: 2013-05-23

作者简介: 郭海龙 (1989-), 男, 甘肃卓尼人, 硕士生, 主要从事高光谱卫星资料反演与应用研究。

E-mail: guohailong07@gmail.com

0 引言

随着工业科技的发展, 大气遥感已经进入了高分辨率时代。星载大气探测仪器从以前的十几个通道(如美国 NOAA 卫星上的 ATOVS 系统只有 19 个红外通道)^[1] 发展到今天的上千个通道。如地球观测系统(EOS)卫星系列中 AQUA 卫星上的大气红外探测器(AIRS)有 2378 个通道, 光谱覆盖从 $3.7\ \mu\text{m}$ 到 $15\ \mu\text{m}$ ^[2]。欧洲极轨气象卫星(METOP)系列上的红外大气探测干涉仪(IASI)有 8461 个通道, 光谱分辨率最高可达 $5400\ \text{cm}^{-1}$ ^[3]。这使得大气温度垂直探测精度在 $1\ \text{km}$ 垂直分辨率下可达 $1\ \text{K}$, 而湿度垂直探测精度在 $2\ \text{km}$ 垂直分辨率下可达 10% ^[4]。这一发展大大改善了数值预报和气候研究的准确度。

但是高光谱分辨率探测仪器通道之间的强相关性会带来计算不稳定和不适定的问题^[5], 这会直接影响到利用高光谱分辨率资料对大气参数进行反演的精度。实验证明, 由于通道的光谱响应特性, 利用高光谱分辨率资料反演不同的大气参数时, 各通道的贡献不尽相同, 有些通道甚至对反演过程没有贡献。因此在用高光谱分辨率资料对大气参数进行反演时, 通道的选择非常重要。

目前国内外所采用的方法有两类。第一类是基于权重函数和通道特性的选择方法, 如 Prunet P 在 1998 年提出^[6]的奇异值分解法、Aires F 在 2002 年提出^[7]的 Jacobi 法和 Mitchell D 在 2005 年提出^[8]的主分量分析法等。这类方法在选择通道时主要考虑各通道对大气参数的敏感性, 未能全面考虑通道噪声、背景场以及具体反演方案的影响。第二类是基于信息容量和大气可反演度的选择方法, 如 Thompson et al 在 1986 年提出^[9]的大气可反演度法, 杜华栋在 2008 年提出^[5]的大气反演指标法等。这类方法在选择通道时主要考虑通道的可反演能力, 将通道对反演参数的贡献以定量方式呈现出来。但是此处定义的大气可反演度只有在理想情况下才能成立, 而且先验信息的准确度也有待研究^[10]。本

文基于反演误差来源的分析提出一个能定量评估通道贡献的指标。以此指标为标准, 结合考虑通道特性和相关程度, 对经典的物理反演法提出高光谱探测仪器的通道选择方案, 并用实际数据对该方案的可行性和有效性进行验证。

1 误差转移分析

实际的大气探测无法避免观测误差和仪器的噪音。对于反演过程, 其误差来源有观测误差、仪器噪音误差、背景误差和反演模式误差。假设所有误差均满足高斯分布, 则经典的物理方法可以描述为

$$Y = KX + \epsilon \quad (1)$$

式中, K 为观测算子, X 为大气状态参数, Y 为大气探测参数, ϵ 为观测误差项。对于满足高斯分布的观测矢量, 其概率密度分布为

$$p(y) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}|S_y|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(y - \bar{y})S_y^{-1}(y - \bar{y})^T\right\} \quad (2)$$

式中, S_y 是观测误差协方差矩阵。状态矢量的概率密度分布为

$$p(x) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}|S_g|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x - x_g)S_g^{-1}(x - x_g)^T\right\} \quad (3)$$

式中, x_g 是状态矢量的背景场, S_g 是状态矢量的背景误差协方差矩阵。在已知状态矢量的条件下, 观测矢量在取值范围内的概率密度分布为

$$p(y|x) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}|S_{yx}|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(y - Kx)S_{yx}^{-1}(y - Kx)^T\right\} \quad (4)$$

式中, S_{xy} 为反演模式的反演误差协方差矩阵, $p(x|y)$ 为反演后的信息。由贝叶斯理论的概念:

$$p(x|y) = \frac{p(y|x)p(x)}{p(y)} \quad (5)$$

把式(2)、式(3)和式(4)分别代入式(5), 利用高斯分布把 $p(x|y)$ 写为二次型, 可以得到

$$(x - x_r)^T S_r^{-1}(x - x_r) = (x - x_g)^T S_g^{-1}(x - x_g)$$

$$+(y - Kx)^T S_{yx}^{-1} (y - Kx) + C \quad (6)$$

式中, x_r 为反演后状态矢量的期望, S_r 为协方差矩阵, C 为常数。按照式 (6) 可以得到

$$x_r = x_g + (K^T S_{yx}^{-1} K + S_x^{-1})^{-1} K^T S_{yx}^{-1} (y - Kx_g) \quad (7)$$

它的误差协方差矩阵可写为

$$S_r = S_g - S_g K^T (K S_g K^T + S_{yx})^{-1} K S_g \quad (8)$$

2 通道贡献指标

为了直观定量描述各通道在反演大气参数时的贡献, 在综合考虑了各通道特性、通道相关性、被反演参数背景误差和大气反演模式精度后, 将通道贡献指标定义为

$$G = -\frac{1}{2} \left(\ln(|S_r S_g^{-1}|) / \ln(|S_g|) \right) \quad (9)$$

式中, S_r 为后验误差协方差矩阵, 由 (8) 式确定。当所有通道参与计算得到的 $|S_r|/|S_g|$ 大于 1 时, 表示该计算方案没有对背景误差进行改进, 也就表征此方案没有可行性。当 S_r 为零时, 表征此时的状态参数为真值, 但这只是理想状况。式 (9) 很好地表征了各通道在反演过程中对反演精度的贡献作用。以此为标准, 通过优先选择贡献大的通道, 得到一组贡献指标大的通道组合, 使得反演结果精度保持不变, 便可大大提高计算效率, 而且也可作为探测仪器通道的设计提供参考。

3 通道选择方案

3.1 高光谱仪器介绍

本文选取搭载于 METOP-B 卫星上的通道数目为 8461 的第二代 IASI。该仪器的光谱覆盖从 645 cm^{-1} 到 2760 cm^{-1} ($15.4 \sim 3.74 \mu\text{m}$)^[11], 光谱间隔为 0.25 cm^{-1} , 其探测精度非常高 (温度精度为 $\pm 1 \text{ K/km}$, 湿度精度为 $\pm 10\%$)^[12]。它主要用于改善中期天气预报, 但对大气中微量气体 (如臭氧、甲烷、一氧化碳) 的含量探测也有很大贡献。第三代 IASI 计划于 2016 年 10 到 11 月发射。本文主要针对用 IASI 反演大气温度廓线

的过程进行通道选择。

3.2 实验设计

在式 (1) 中提到的观测算子也称权函数矩阵, 实验以美国标准大气下的温度廓线为输入计算, 采用 Tiros 业务垂直探测器辐射的传输模式 RTTOV, 具体结果如图 1 所示。该模式最早由 Eyre 等人提出, 后来由 Rizzi 等人^[13]作了改进, 它能模拟多种星载探测仪器探测的红外和微波资料, 同时能考虑大气温度、湿度、云和雨等参数影响, 是能将垂直大气从 0.1 hpa 到 1013.3 hpa 分为 43 层的快速辐射模式。

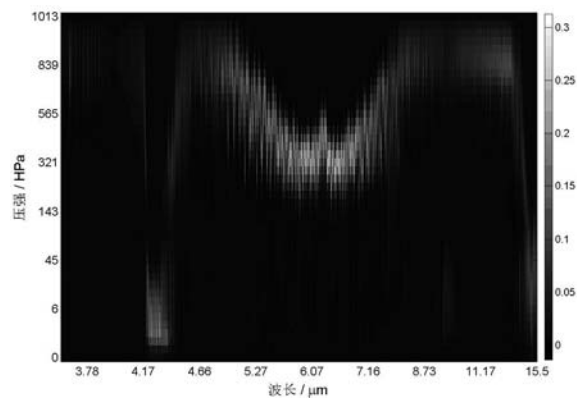


图 1 IASI 权函数矩阵 (RTTOV, 美国标准大气)

式 (8) 中提到的背景误差协方差矩阵 S_g 采用了欧洲卫星气象中心 EUMETSAT 数值天气预报应用研究组开发的物理反演软件 (NWP SAF 1D-Var) 中采用的值, 具体分布如图 2 所示。

观测误差协方差矩阵 S_{yx} 采用物理反演软件 (NWP SAF 1D-Var) 中的值, 即 IASI 各通道观测误差标准差, 常用对角矩阵表示, 具体分布如图 3 所示。

为了检验本实验的有效性和可行性, 采用 EUMETSAT 开发的 AAPP 系统 (IASI 业务预处理系统) 的 8461 个通道中对大气反演贡献最大的 300 个通道为对比组, 具体通道选择流程如图 4 所示。

3.3 实验结果及分析

采用图 5 的计算过程, 分别计算 IASI 的 8461 个通道的贡献指数。在美国标准大气状况下, 针对 RTTOVS 辐射模式反演大气温度的通道进行选择, 并将结果与 AAPP 产品发布的 300 个通道

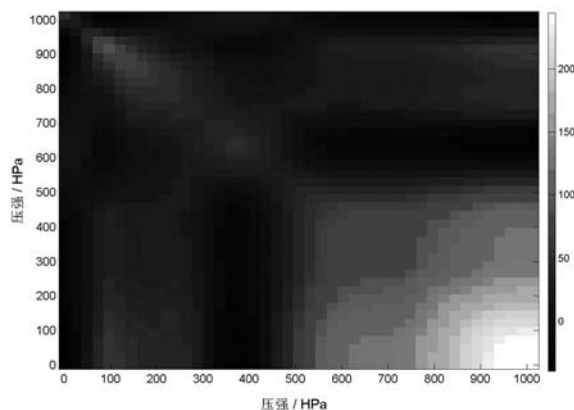


图 2 IASI 通道背景误差协方差矩阵分布图 (NWP SAF 1D-Var)

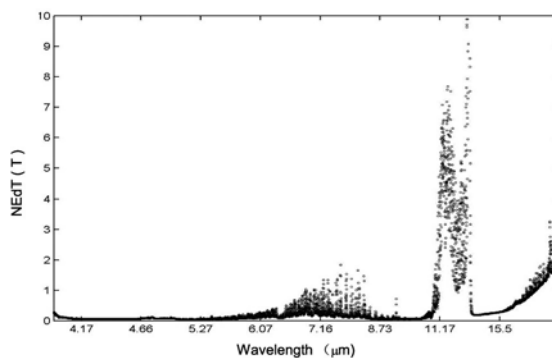


图 3 IASI 通道观测误差标准差 (NWP SAF 1D-Var)

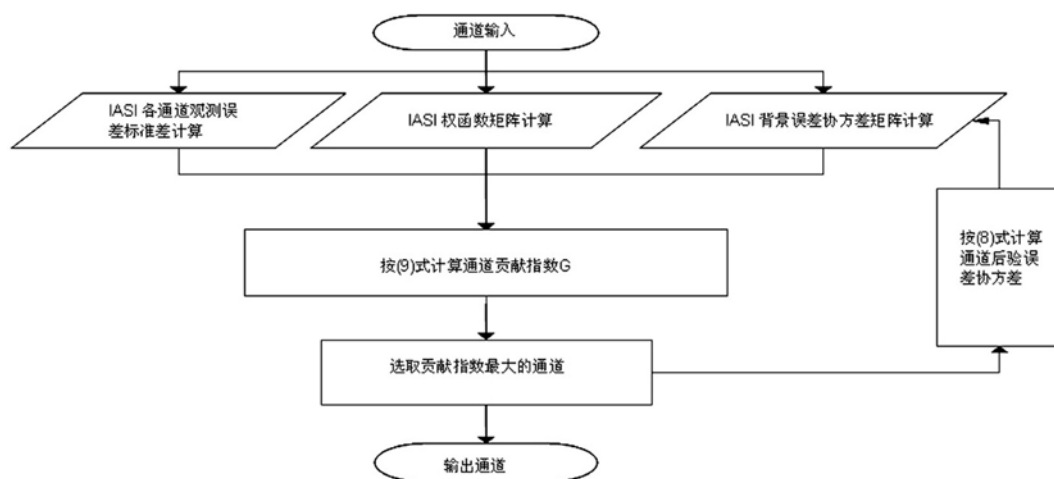


图 4 IASI 大气温度廓线反演通道的选择流程

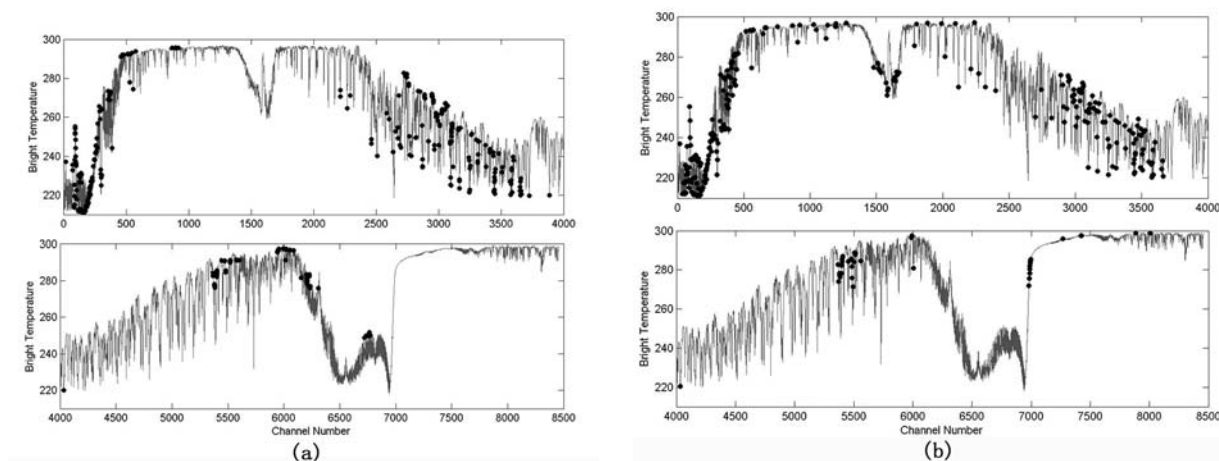


图 5 (a) 通道选择结果; (b) IASI 产品公布通道分布图

进行比较, 具体结果如图 5 所示。

图 5(a) 中标黑的通道表示本文算法选出的 300 个通道。图 5(a) 的上图表示 IASI 前 4000 个通道中对大气温度反演贡献最大的通道, 主要集中在

于 $0 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ 即 $15.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 区域和 $2500 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 即 $6.0 \sim 8.0 \mu\text{m}$ 区域。图 5(a) 的下图表示后 4461 个通道中对大气温度反演贡献最大的通道, 它们只分布在 5500 、 $6000 \sim 6500$ 、 6800 cm^{-1}

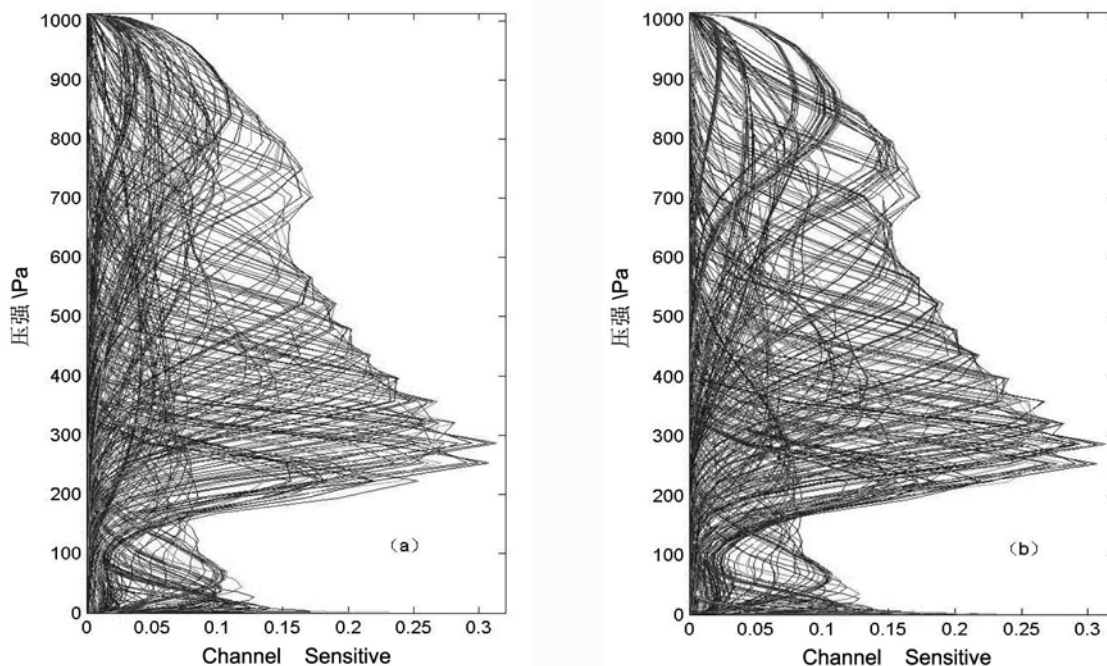


图 6 通道权重函数分布图 ((a) 为 AAPP 发布的应用通道; (b) 为本文方法所选出的通道)

处 ($4\sim 4.8\ \mu\text{m}$)。

图 5(b) 表示 AAPP 发布的 300 个通道。相比而言, 对于在短波区域选取的通道, 采用两类方法的结果相似。但在中长波区域, AAPP 被选通道的分布较均匀, 而在本文的方法中分布较集中。但总体分布一致, 两种方法所选的通道有 83.2% 是相同的, 这也说明本文所用方法是可行的和有效的。

通道权重函数代表了该通道受到不同高度大气层结构的影响情况, 也反应了通道探测信息来源的分布情况, 在卫星遥感反演应用中是一个关键参数。由图 6 可以看出, 本文方法所选通道在权重函数的分布上和 IASI 数值天气预报组 AAPP 发布的应用通道一致。为了进一步检验该方法的有效性, 将各层通道权重函数最大值对应的通道作了对比, 具体结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 从 250hPa 到 180hPa, 采用本文方法所选的通道和 AAPP 方法所选的通道有所差异, AAPP 选用通道的权重函数要略大于本文所选通道。造成这一差异的因素可能在于本文未曾考虑卫星观测角度和微量元素对通道权重函数的影响 (主要为臭氧的影响), 而

在其余各层则完全一致。这说明用本文方法选择反演大气温度廓线的通道是有效可行的。

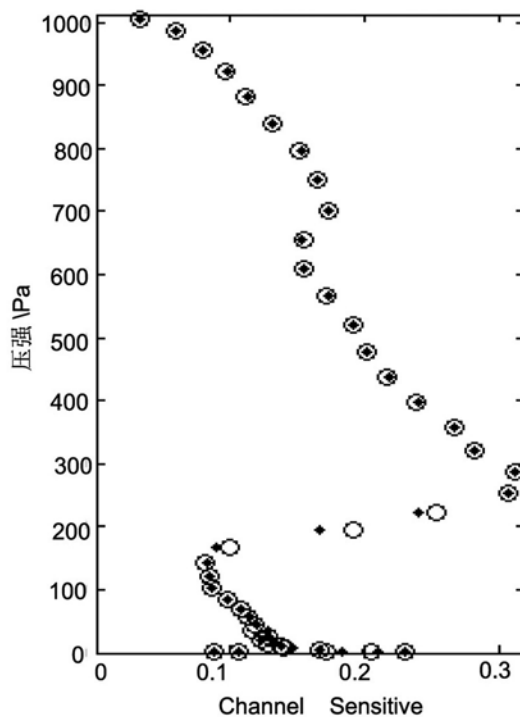


图 7 通道权重函数最大值分布图 (其中原点代表本文方法所选通道, 空心圆圈代表 AAPP 发布的通道)

4 总结

针对高光谱分辨率资料的特点以及在反演大气温度廓线过程中的应用缺点,分析了误差转移过程,提出了一个定量衡量通道对反演大气参数作贡献的指标,并利用 IASI 反演的大气温度廓线作了实验论证。实验结果表明,本文方法所选用的通道和 AAPP 发布的通道基本一致,但在 200 Hpa 处较 AAPP 方法有所不足。这一点也说明大气组成会影响大气温度廓线反演的过程。总而言之,在高光谱遥感时代,针对不同的气象参数,选择合适的通道将会成为一个新的研究热点。本文的方法为这一趋势提供了一个可以借鉴的方法。由于自身知识和条件的限制,未能考虑影响通道选择的其他因素如仪器状态、观测路径、大气组成、下垫面类型和季节天气等,这将有待于我们作进一步的研究。

参考文献

- [1] Li J, Wolf W, Menzel W. Global Sounding of the Atmosphere from ATOVS Measurements: The Algorithm and Validation [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, **39**(8): 1248–1268.
- [2] Pangaud T, Fourrie N, Guidard V. Assimilation of AIRS Radiances Affected by Mid-to Low-level Clouds [J]. *Monthly Weather Review*, 2009, **137**(12): 4276–4293.
- [3] Kwon E, Sohn B J. Validating IASI Temperature and Moisture Sounding Retrievals over East Asia Using Radiosonde Observations [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, **29**(9): 1250–1263.
- [4] Moreno R, Ponce G, Blumstein D, et al. Specification Technique de Besoin du logiciel operationnel IASI [R]. CNES, 2006: 90–97.
- [5] 杜华栋, 黄思训, 石汉青. 高光谱分辨率遥感资料通道最优选择方法及试验 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(12): 7685–7693.
- [6] Prunet P, Thepaut J N, Casse V. The Information Content of Clear Sky IASI Radiances and Their Potential for Numerical Weather Prediction [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1998, **124**(545): 211–241.
- [7] Aires Filipe, Alain Chédin, Noëlle A, et al. A Regularized Neural Net Approach for Retrieval of Atmospheric and Surface Temperatures with the IASI Instrument [J]. *J Appl Meteor*, 2002, **41**(2): 144–159.
- [8] Menke W. Geophysical Data Analysis Discrete Inverse Theory [M]. New York: Academic Press, 1984.
- [9] Thompson O E, Donald D D, Hou Y. The Ill-posed Nature of the Satellite Temperature Retrieval Problem and the Limits of Retrievalability [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1986, **3**: 643–649.
- [10] Huang H L, Smith W L, Woolf H M. Vertical Resolution and Accuracy of Atmospheric Infrared Sounding Spectrometers [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, **31**: 265–274.
- [11] Smith W L, Woolf H M, Fleming H E. Retrieval of Atmospheric Temperature Profiles from Satellite Measurements for Dynamical Forecasting [J]. *J Appl Meteor*, 1972, **11**(1): 113–122.
- [12] Rodgers C D. A General Error Analysis for Profile Retrieval [J]. *Advances in Remote Sensing Retrieval Methods Deepark*, 1987, **1**: 285–297.
- [13] Conrath B J. Vertical Resolution of Temperature Profiles Obtained from Remote Radiation Measurement [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1972, **29**(7): 1262–1272.

新闻动态 News

美国 Ball 航空航天技术公司开始 WorldView-3 卫星总装工作

据 www.spacedaily.com 网站报道, 美国 Ball 航空航天技术公司已经开始展开由 DigitalGlobe 公司研制的下一代商用遥感卫星——WorldView-3 卫星的总装工作。该卫星计划于 2014 年中期发射升空。

目前, 控制力矩陀螺 (CMGs) 和推进组件的安装工作正在进行, ITT Exelis 公司负责研制的成像传感器预计于 2013 年中期交付。在传感器的安装与检验工作顺利完成后, 整颗卫星的环境测试计划于今年秋天开始进行。

WorldView-3 卫星将可提供分辨率为 31 cm 的全色图像、分辨率为 1.24 m 的 8 波段多光谱图像以及分辨率为 3.72 m 的 8 波段短波红外图像。

□ 岳桢干