

文章编号: 1007 4619(2006)04 0586 07

利用 AIRS 观测资料进行红外高光谱 大气探测能力试验的研究

蒋德明^{1,3}, 董超华², 陆维松¹

(1. 南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044; 2. 中国气象局 国家卫星气象中心, 北京 100081;

3. 湖南省气象科学研究所, 湖南 长沙 410007)

摘 要: 利用 EOS Aqua 卫星平台上搭载的光栅式高光谱分辨率大气红外探测仪器 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 的实际观测资料, 采用经验正交函数展开法 (特征向量法) 进行了大气温度、湿度廓线的反演误差敏感性试验研究。试验内容包括光谱覆盖、通道覆盖、通道宽度等。通过这些试验, 研究在中国现有的经济、技术条件下要达到在对流层 1 km 气层温度、湿度分别小于 1K 和 20% 的反演精度和垂直分辨率所应该具备的光谱通道特征, 为发展中国自己的红外高光谱分辨率探测技术提供科学依据。试验计算结果表明, 基于中国现有的经济和技术基础, 发展具有 100 个左右的光谱通道, 通道宽度为 2—4 个波数的干涉式红外大气探测仪器 (比中国目前 FY-3 初期的滤光片式红外分光计的光谱波段宽度减小 3—4 倍), 可明显改善大气参数反演精度, 基本满足现阶段使用要求。

关键词: 红外; 高光谱; AIRS 大气廓线; 反演

中图分类号: P407.6 文献标识码: A

Preliminary Study on the Capacity of High Spectral Resolution Infrared Atmospheric Sounding Instrument Using AIRS Measurements

JIANG Deming^{1,3}, DONG Chao-hua², LU Wei-song¹

(1. Atmospheric Science Department, Nanjing Meteorological Institute, Jiangsu Nanjing 210044, China;

2. National Satellite Meteorological Center, CMA Beijing 100081, China;

3. Hunan Meteorological Institute, Hunan Changsha 410007, China)

Abstract Sensitivity experiments of spectral coverage, channel coverage and bandwidth are performed to investigate the channel characteristics designed to meet the basic requirements of atmospheric profile retrieval accuracy of 1K for temperature and 20% for humidity in 1 km thick tropospheric layers. Temperature and humidity profiles are retrieved from AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) real measurements via empirical orthogonal function (Eigenvectors of Covariance Matrix) expansion methodology. Results suggest that notable improvements of the atmospheric parameter retrieval accuracy can be achieved by developing infrared interferometric spectrometer/radiometer with about 100 channels and with bandwidth of 2—4 wave numbers on the current technical and economical basis of our country. This bandwidth is 3—4 times smaller than that of the earlier spectrometer/radiometer on FY-3 satellite which will be launched in the year of 2006.

Key words infrared; hyperspectral; AIRS; atmosphere; profile; retrieval

收稿日期: 2005-08-15; 修订日期: 2005-10-25

基金项目: 国家民用航天预研项目“《风云三号》卫星 02 批高光谱分辨率红外大气探测性能指标和模拟实验的研究”[2002]4402 号; 国家自然科学基金项目“红外高光谱分辨率卫星遥感大气参数反演研究”, 项目批准号: 40475016

作者简介: 蒋德明 (1962—), 男, 高级工程师, 2001 年毕业于南京气象学院大气物理学与大气环境科学系, 获理学硕士学位, 现为南京气象学院在职博士生, 主要从事红外高光谱分辨率大气探测研究工作。E-mail: dmjiang@nsm.cma.gov.cn

1 引言

近年来, 随着数值预报模式向高垂直分辨率和高水平分辨率的发展, 在业务数值天气预报资料同化系统中, 卫星反演温 湿度廓线对改善模式输出的作用显得越来越不明显。这种情况在有其他观测资料来源的地区尤其明显。问题出在目前卫星反演得到的大气参数垂直分辨率低于其他观测数据来源, 如无线电探空资料。事实上, 目前从亮温只能得到低阶的大气垂直结构信息, 而高阶结构的获得则依赖于背景信息。因此, 目前反演研究的主要精力放在了背景信息、先验信息等求解方程所需要的限制条件上^[1]。然而, 这种改善毕竟是有限度的, 因为影响垂直分辨率的本质因素是权重函数。由于目前使用的滤光片式辐射计的红外通道宽度(如 HIRS)比大气吸收线的宽度大数百倍, 一个通道所观测到的辐射是许多吸收强度完全不同的谱线的平均结果, 这样的直接后果是通道权重函数被显著加宽, 从而严重限制了卫星探测大气高阶垂直结构的能力^[2]。

卫星反演的水平分辨率和时间分辨率是其他探测手段无法相比的, 因此解决其垂直分辨率低的问题是目下大气垂直探测的当务之急, 也是中国卫星探测的努力方向。通过发展高光谱分辨率探测技术以达到改善大气参数的反演精度及其垂直分辨率的目的, 而不仅仅是单纯依靠研发新的反演算法, 是一个思维方向上的改变。

2002年 5月 4日在美国加州 Vandenberg 空军基地发射的 EOS Aqua 卫星平台上搭载的光栅式大气红外探测仪 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 在 $650\text{--}2700\text{cm}^{-1}$ 波数范围内构造了 2378 个光谱通道, 其标称光谱分辨率达到 $\lambda \Delta\lambda = 1200$ 。这些精细的光谱通道具有与大气吸收谱线更加接近的光谱分布, 因而可以构造出更为陡峭的权重函数, 可以探测到更加精细的高阶大气垂直结构^[3]。在 AIRS 进入轨道之前, NASA, CMSS / SSEC 等机构的研究人员进行了许多模拟研究^[4-6], 并在此后进行了许多实测资料的反演研究^[7-8]。研究结果表明, 将 AIRS 资料同化到数值模式中可改善一些主要的中尺度数值预报的结果^[9]。

本文的目的是要利用 AQUA AIRS 的实际观测资料, 研究在达到数值预报模式所需要的温度 湿度

垂直分辨率的基础上反演的均方根误差所表现出来的光谱通道特征, 为发展中国自己的高光谱分辨率探测技术提供科学依据。为此, 本文进行了一系列敏感性试验, 例如光谱覆盖、通道覆盖、通道宽度等。

2 样本与数据预处理

使用 2002 年 9 月 6 日 AQUA AIRS 上午轨道资料, 在第 043 044 045 060 061 076 077 078 (图 1) 八个 granule 中提取晴空样本 5917 个, 剔除样本资料中的坏通道 270 个, 每个样本实际可用通道 2108 个。(术语“granule”的标准定义是: “可独立管理的最小数据集”。大约是 AQUA 卫星 6 min 时间的资料, 或一条轨道的 1/15 长度, 对于 AMSU-A 而言是 45 条扫描线, 对于 AIRS 和 HSB 而言是 135 条扫描线)。八个 granule 的观测时间分别是 04: 17: 26 04: 23: 26 04: 29: 26 05: 59: 26 06: 5: 26 07: 35: 26 07: 41: 26 和 07: 47: 26 (世界时), 进行时间内插后将它们与 06 时 ECMWF 实时分析场格点资料相匹配。

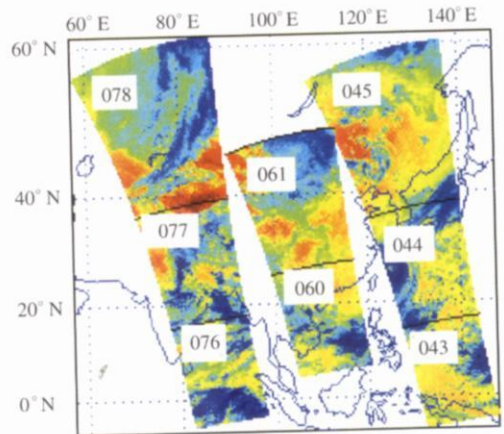


图 1 研究区域示意图(2002 年 9 月 6 日)

Fig. 1 Target area (6 September 2002)

AIRS 的垂直气压网格(垂直空间分辨率)由以下公式定义:

$$P_l = (a_l^2 + b_l + c)^{3.5}, \quad l = 1, 2, 3, \dots, 101$$

式中, P 为气压 (hPa); l 为层 (layers) 的边界序数(也称为“层”, 即“level”), 从地面往上到大气顶, 共 101 层 (totally 101 levels); a, b, c 为待定系数, 取 $P_1 = 5E - 3 \text{ hPa}$, $P_{38} = 300 \text{ hPa}$, $P_{101} = 1100 \text{ hPa}$ 可确定 a, b, c 的值; 由此确定的气压层 (layers) 的厚度从近地面层的十分之几公里, 到最高层的几公里均匀变化。这样可以保证在对流层区域的垂直空间间隔(垂直

分辨率)小于 1km,又不至于在整个大气中的分层数量太多(图 2)。

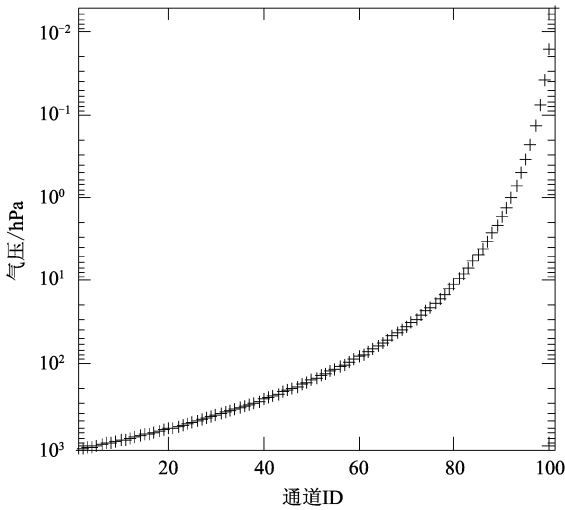


图 2 AIRS 垂直气压网格

Fig 2 AIRS atmospheric pressure layering grid structure

$$f=C''g$$

3 2 主成分分析

主成分分析的作用是使输入向量的分量正交化,以消除彼此之间的相关性。通过对主成分进行截断,可以去掉冗余信息和噪声信息,减小计算量。高光谱分辨率遥感通道之间相关性很大,冗余信息量也很大。同时,由于通道狭窄,对噪声的敏感性也比宽光谱遥感更加敏感^[11]。

图 3 是本文对 AQUA AIRS 实际观测的亮温(图 3(a))和大气温度廓线(图 3(b))、湿度廓线(图 3(c))分别进行主成分分析得到的 Pareto 图。横坐标是主成分序号,纵坐标是各主成分方差占观测值总方差的百分比。

3 反演方法

3 1 特征向量反演方法

基于协方差矩阵的特征向量反演方法^[10]算法的步骤为:

步骤一:计算温度廓线 f 和卫星观测值 g 的变分(仍记为 f 和 g)。

步骤二:对温度廓线的变分 f 进行经验正交展开:

(1)计算 f 的协方差矩阵 C_{ff}

(2)对 C_{ff} 进行主成分分析,取前 p 个主成分构成温度廓线 f 的经验正交展开矩阵 Φ_p 。

步骤三:与步骤二相似,对卫星观测值 g 进行经验正交展开,取 C_{gg} 的前 q 个主成分构成卫星观测值 g 的经验正交展开矩阵 Ψ_q 。

步骤四:由 $f\Phi_p$ 用最小二乘法求 f 的经验正交展开系数 U_q 。

步骤五:由 g, Ψ_q 用最小二乘法求 g 的经验正交展开系数 V_p 。

步骤六:由 U_p, V_q 计算

$$\text{互协方差矩阵 } C_{uv}=U_p V_q^T$$

$$\text{自协方差矩阵 } C_{vv}=(V_q V_q^T) \text{ 及其逆阵 } C_{vv}^{-1}$$

步骤七:计算经验正交回归系数

$$C''=\Phi_p C_{uv} C_{vv}^{-1} \Psi_q^T$$

步骤八:得到经验正交回归方程

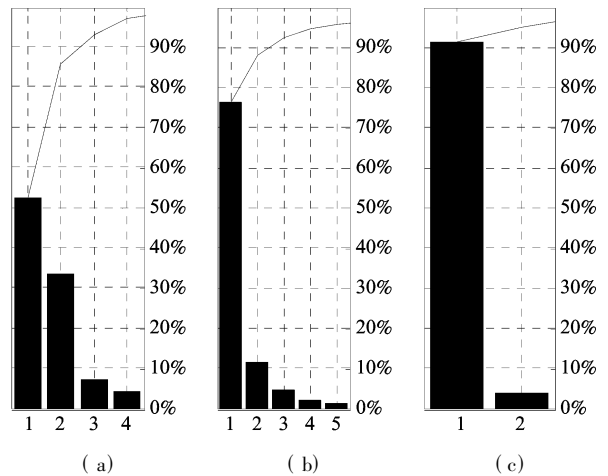


图 3 辐射亮温、温度、湿度的主成分分析

(a) 亮温主成分; (b) 温度主成分; (c) 湿度主成分

Fig 3 The percentage of the total variance in the

(a) brightness temperature derived from AIRS observations

(b) atmospheric temperature profiles

(c) humidity profiles explained by each principal

component in explained

从图 3 中可以看到,仅仅前若干个主成分就表征了观测值总方差的 95% 以上。因此从理论上来说,只要选取很少的前若干个主成分就可以表示出相应的物理量,并可以由此建立起相应的统计反演模型。然而,试验中发现,这样做的结果虽然可以大大减少计算量,但反演结果却并不好。当增加所使用的主成分个数的时候,反演误差将减小,直达到一定数量后,这种变化才变得不显著。对于本文所使用的 AIRS 的 2108 个通道而言,当主成分的个数增加到 100 个以上时反演误差的这种变化不再明显,而对于 101 层的温度廓线和湿度廓线而言,这个

数量在 50 以上。在本文所有的反演试验中, 各物理量的主成分个数都将按照这个标准选取。

4 反演试验结果及分析

4.1 光谱覆盖敏感性试验

光谱敏感性试验设计: 分别使用长波 L (8.80—15.4 μ m, 1101 个通道), 中波 M (6.20—8.22 μ m, 541 个通道), 短波 S (3.74—4.61 μ m, 466 个通道), 及通道组合: LM=LW+MW, LS=LW+SW, MS=MW+SW, LMS=LW+MW+SW 进行了大气温度廓线和湿度廓线反演, 试验结果如图 4、图 5 所示。

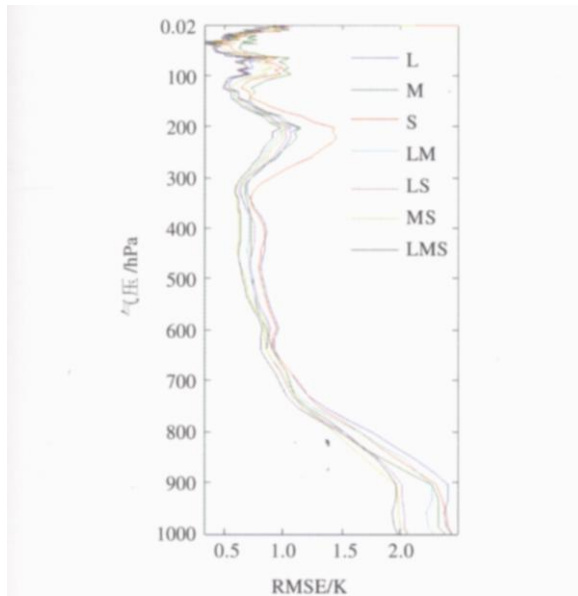


图 4 温度反演光谱覆盖敏感性试验

Fig. 4 Spectral coverage sensitivity in temperature profile retrieval

图中除了误差曲线 S 和 LMS 外, 其他误差曲线靠得很近 (说明反演误差之间的差别很小), 几乎无法区分, 因此图中只标出了 S 和 LMS 两个光谱范围的误差曲线。图 4 为温度反演试验的 RMS 误差。从图中可以看到, 当使用 LMS 时, 温度反演误差在各个气压层均小于 2K, 且主要出现在对流层顶 (200hPa) 附近和对流层低层。单独使用短波通道, 在这两个位置所产生的误差尤其明显, 而单独使用长波通道, 则低层误差比较明显; 组合使用长波通道和中波通道则可以从整体上获得最小均方根误差。在这两个位置上大气参数本身变化较大是原因之一。

事实上, 分析所有通道的方差就会发现短波通道观测值的方差远大于长波通道, 通过分析反演的各个

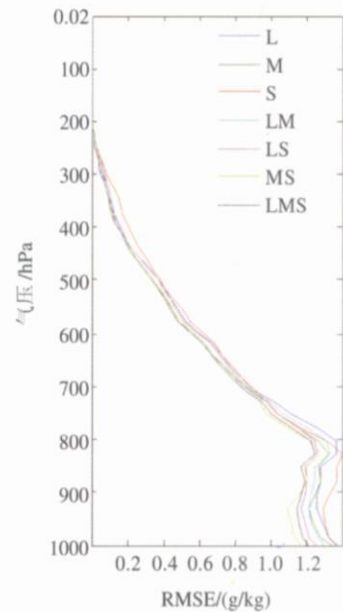


图 5 湿度反演光谱覆盖敏感性试验

Fig. 5 Spectral coverage sensitivity in humidity retrieval

大气层结上大气参数的方差则会发现在对流层顶附近和对流层中低层有较大的方差。短波通道的这种误差特征可能主要是由于卫星接收到的向上辐射中包含有少量的反射辐射分量造成的, 而长波通道的误差特征则表明对流层低层大气辐射对卫星探测器接收到的长波红外辐射贡献较小以及云污染的存在。图 5 是水汽反演的结果。单独使用短波通道的 RMSE 也大于其他通道及通道组合, 但均小于 15%。

4.2 通道覆盖敏感性试验

通道覆盖敏感性试验设计: 按等距间隔在 2108 个可用通道中抽取 90%, 50%, 10%, 5% 通道进行了大气温度廓线和湿度廓线反演 (通道个数分别为 1897, 1054, 211 和 106), 试验结果如图 6、图 7 所示。

可见, 在通道数大于 100 的情况下, 改变通道数量对反演精度影响比较小。那么这是否意味着在垂直探测中不需要设置这么多的光谱通道呢? 事实并非如此。试验中我们发现任何一个通道都对反演有正的贡献, 只是对处在不同高度上的温度层结的贡献大小有所差别。这也说明大气参数反演中有效信息的提取技术十分重要。仿照模式识别技术中的“特征提取”和“特征选择”术语, 可以称之为通道信息提取技术, 以区别于通常意义上的“通道选择”技术。

图 8 和图 9 是通道数减少到 3.4% (71 个光谱通道) 和 2.4% (51 个光谱通道), 以及使用 19 个 AIRS 通道 (中心波数与 HIRS B 相对应) 的反演均

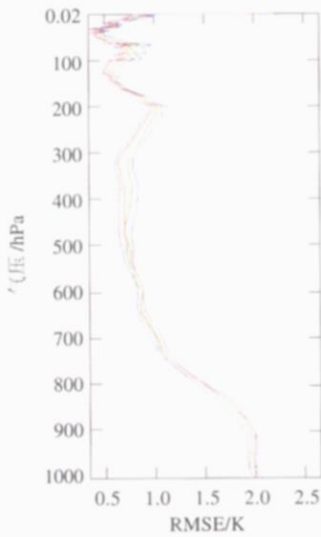


图6 温度反演通道覆盖敏感性试验一
Fig.6 Channel coverage sensitivity in temperature profile retrieval (test 1)

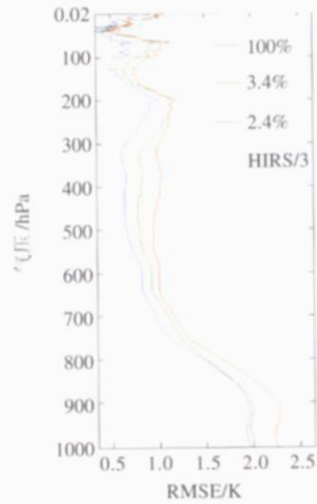


图8 温度反演通道覆盖敏感性试验二
Fig.8 Channel coverage sensitivity in temperature profile retrieval (test 2)

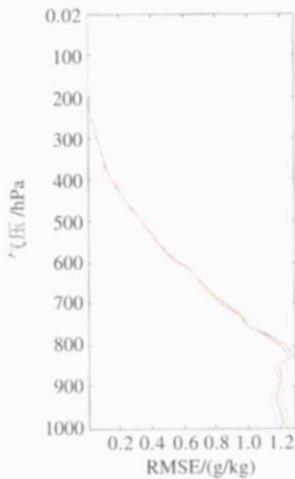


图7 湿度反演通道覆盖敏感性试验一
Fig.7 Channel coverage sensitivity in humidity profile retrieval (test 1)

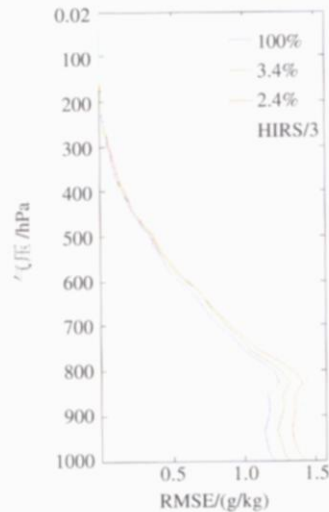


图9 湿度反演通道覆盖敏感性试验二
Fig.9 Channel coverage sensitivity in humidity profile retrieval (test 2)

方根误差。

从图 8 图 9 可以看出, 当光谱通道数小于 100 以后, 不同的通道覆盖其均方根误差之间的差别开始明显增大。当通道数减小到 3.4% 时, 仍可得到比较满意的反演结果。换句话说, 具有 100 个左右的通道数是获得较好的反演精度的最经济的探测仪器。虽然从大气探测的角度来说, 通道数越多, 探测到的大气信息越丰富, 通道选择的余地也越大, 但是大于 100 个通道数不仅在中国现有的技术上实现起来比较困难, 而且其相对成本也比较大。

4.3 通道加宽的影响

考虑到中国现有的技术及经济条件问题, 把通道宽度适当加宽, 改变通道数目, 研究在确定的空间垂直分辨率条件下, 能否得到符合要求的大气参数的反演精度。将 A IRS 通道用方波响应函数分谱段进行卷积合并, 在长波波段用 7 个 A IRS 通道合并成一个通道, 中波 6 个合并成一个, 短波 5 个合并成一个。合并后的通道宽度在 1.5—5.5 之间, 在长波波段通道宽度约 2 个厘米波数, 在中 短波波段约 4

个厘米波数。通道宽度变化如图 10 所示。图 11 是 AIRS 的通道宽度。在剔除一些不合要求的通道之后, 最后总共得到 252 个宽度加宽后的合并通道。

计的光谱波段宽度减小 3—4 倍), 明显改善大气参数反演精度, 同时也能够基本满足现阶段使用要求。

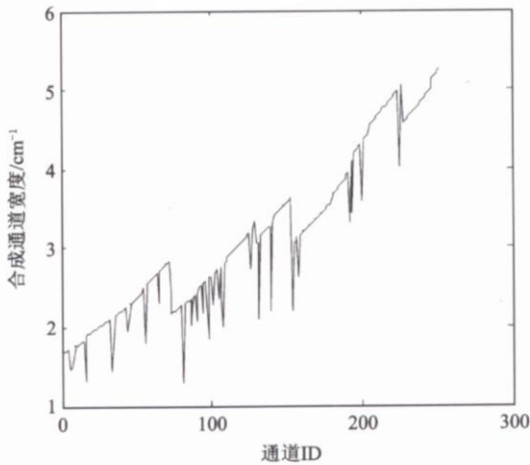
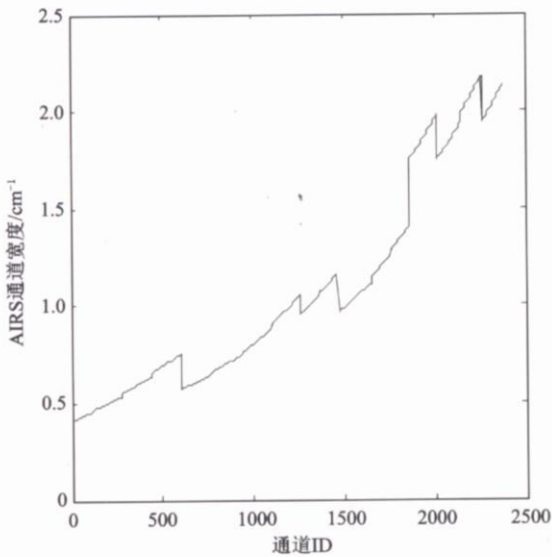


图 10 对 AIRS 通道进行卷积加宽后的通道宽度
Fig. 10 Widened bandwidth obtained from convolved AIRS channels



从加宽后的通道中均匀地抽出 10%, 20%, 33%, 50%, 100% 进行通道覆盖敏感性试验, 通道数依次为 26 51 84 126 252 个。试验结果如图 12 和图 13 所示。从图 12 和图 13 可以看到, 当通道数小于 33%, 即 84 个通道时, 温度 湿度 RMSE 开始明显增大。由此可见, 发展具有 100 个左右的光谱通道, 通道宽度为 2—4 个波数的干涉式红外大气探测仪器(比中国目前 FY-3 初期的滤光片式红外分光

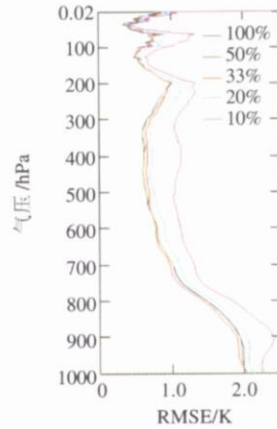


图 12 温度反演通道加宽试验
Fig. 12 Retrieved temperature RMS errors using widened bandwidth

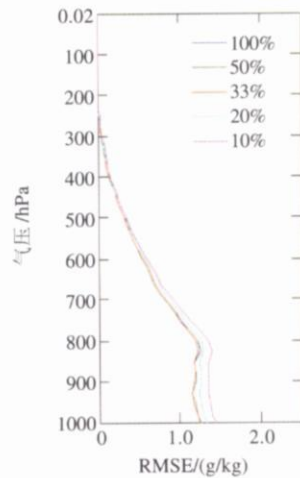


图 13 湿度反演通道加宽试验
Fig. 13 Retrieved humidity RMS errors using widened bandwidth

5 结 论

通过对 AIRS AQUA 高光谱分辨率红外大气实测资料各种计算试验, 可以得到以下结论:

(1) 不同的光谱段对大气温度的垂直分布的变化敏感性有差别, 同时这种差别在不同的位势高度上其表现也不一样。短波通道对对流层顶和对流层中低层的变化较为敏感, 而长波通道主要对对流层低层大气参数变化敏感。

(2) 从光谱覆盖试验和通道覆盖试验可以得到

如下结论:①反演误差和光谱覆盖有关,但是当通道数大于 100 时,除了在对流层顶和对流层低层仍有较大的误差外,这种差别从整体上看变得不明显;②在包含长、中、短波的情况下,当通道数大于 100 时,反演误差对通道数的变化不敏感;当通道数小于 100 时反演误差对通道数的变化的敏感性明显增加,增加通道个数使反演误差明显减小,减少通道个数则使反演误差明显增大。在通道数大于 100 的情况下,单纯增加或减少通道数量对改善反演精度作用不明显,问题的关键在于寻找从各个通道中综合提取有效信息的方法。

(3)仅仅提高光谱分辨率(减小通道宽度),如果没有一定的通道数量,仍然不能提高反演精度。在减小通道宽度的同时,增加光谱通道数量可以提高探测的空间垂直分辨率和大气参数反演精度。

(4)提高光谱分辨率,增加通道数目可以提高大气参数的反演精度和垂直空间分辨率,得到基本满足现阶段需要的反演廓线。基于中国现阶段的经济及技术条件,光谱分辨率还不能做到太高,通道数目也不能做到数千以上。研究表明,仪器通道数为 100 左右,通道宽度 2—4 个厘米波数,可得到基本符合现阶段要求的大气参数反演精度。这个结论为发展具有中国自己特点的高光谱红外大气探测仪器,提供了重要的科学依据。

致 谢 感谢威斯康星大学 CMSS SSEC 的 Dr. Jun Li 和 Dr. Allen Huang 的建议和帮助。

参 考 文 献 (References)

[1] Rodgers C. D. Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice. Series on Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics, Vol. 2 [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co.

- Pte. Ltd., 2000
- [2] Eyre J. R. Inversion Methods for Satellite Sounding Data. Meteorological Training Course Lecture Series [M]. Bracknell: ECMWF, 2002
- [3] Aumann H. H., Chahine M. T., Gautier C., et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: Design, Science Objectives, Data Products, and Processing Systems [J]. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 2003, **41**: 253—264.
- [4] Jun L. Optimal Use of High Resolution Infrared Sounder Channels in Atmospheric Profile Retrieval [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 1994, **11**(3): 271—276
- [5] Jun L. The Capability of Atmospheric Profile Retrieval from Satellite High Resolution Infrared Sounder Radiances [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 1994, **12**(2): 255—258.
- [6] Susskind J., Baret C. D., Blaisdell J. M. Determination of Atmospheric and Surface Parameters from Simulated AIRS/AMSU HSB Sounding Data: Retrieval and Cloud Clearing Methodology [J]. *Adv. Space Res.*, 1998, **21**(3): 369—384.
- [7] Susskind J., Baret C. D., Blaisdell J. M. Retrieval of Atmospheric and Surface Parameters from AIRS/AMSU/HSB Data in the Presence of Clouds [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2003, **41**: 390—409.
- [8] Chaohua D., Deming J., Chengli Q., et al. Experimental Study on Atmospheric Parameters Using New Atmospheric Sounding Instrument Data [A]. Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Instruments and Applications II. Proc. of SPIE, Vol. 5655 [C]. Bellingham: SPIE, 2005.
- [9] Goldberg M. D., Qu Y., McMillin L. M., et al. AIRS Near Real Time Products and Algorithms in Support of Operational Numerical Weather Prediction [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2003, **41**: 379—389.
- [10] Smith W. L., Woolf H. M. The Use of Eigen Vectors of Statistical Covariance Matrices for Interpreting Satellite Sounding Radiometer Observations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33**: 1127—1140
- [11] Huang H. L., Antonelli P. Application of Principal Component Analysis to High Resolution Infrared Measurement Compression and Retrieval [J]. *J. Appl. Meteor.* 2001, **40**: 365—388.