

文章编号: 1672-8785(2014)02-0026-07

红外高光谱资料云检测方法研究

郭海龙 何明元 杜华栋 董 毅

(中国人民解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘 要: 从红外高光谱资料的特点和应用现状出发, 通过用晴空时观测光谱和背景光谱偏差矢量最小原理研究了特定云状下不同云量、云高和云水含量对观测光谱的影响, 提出了一种新的红外高光谱资料云检测方法。从云污染视场中检测出不受云影响的通道, 并用通过辐射传输模式 (Radiative Transfer for (A)TOVS, RTTOV) 模拟的大气红外探测器 (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS) 资料和实测数据进行了方法可行性和有效性验证。结果表明, 该方法能有效地提高云污染区域红外高光谱资料的利用率, 可为有云覆盖情况下的大气参数反演提供有效途径。

关键词: 云窗口; 红外高光谱; 云检测

中图分类号: TP7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.02.005

Study of Cloud Detection Method for Infrared Hyper-spectral Data

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

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

Abstract: Starting from the characteristics and application status of infrared hyper-spectral data, the influences of different cloud amount, cloud height and water content on the observed spectra under different cloudy conditions are studied according to the minimum vector deviation theory of the observed spectra and background spectra under clear sky conditions. Then, a new method for detecting cloud in infrared hyper-spectral data is proposed. The channels which are not affected by cloud are detected in the cloud-polluted field of view. The feasibility and validity of the method are verified by using both the AIRS's data simulated by a RTTOV model and the measured data. The result shows that this method can effectively improve the utilization of infrared hyper-spectral data in cloud-polluted areas and can provide an effective approach to the inversion of atmospheric parameters under cloudy conditions.

Key words: cloud window; infrared hyper-spectral; cloud detection

0 引言

由于数值天气预报的精度要求越来越高, 卫星高光谱资料在资料同化中所占的比例越来

越大, 其重要性也日益增加^[1]。但是能准确有效利用的卫星高光谱资料很有限, 主要是因为云污染会影响高光谱资料。根据国际人造卫星云气候学项目 (International Satellite Cloud Clima-

收稿日期: 2013-11-04

基金项目: 国家自然科学基金 (41105012)

作者简介: 郭海龙 (1989-), 男 (藏), 甘肃卓尼人, 硕士研究生, 主要研究卫星红外高光谱资料反演与应用。

E-mail: guohailong07@gmail.com

tology Project, ISCCP) 统计, 全球每天有云覆盖的区域占全球面积的 70% [2]。云的多变性、复杂性使得云的定量遥感误差很难控制。越来越多的实验证实, 数值预报中那些重要的误差常常是由于云的不确定性导致的 [3]。与此同时, 高光谱仪器相对较低的空间分辨率 (如 AIRS 空间分辨率为 100 km^2 [4]) 使得大量观测数据因受云的污染而不能被有效利用。基于此, 本文提出一种针对红外高光谱资料的云检测方法。

传统的云检测从所有视场中找出有云或晴空区域, 检测方法主要有发展成熟的阈值法和图像法等 [5]。高光谱仪器具有多通道高光谱分辨率的特点, 如 AIRS 有 2378 个通道, 其光谱分辨率达到 $1200/\text{dr}$ 。由于仪器的不同观测波长对特定云的响应系数不同, 某些通道对某类云不敏感, 从而会形成云窗口。实验表明, 云窗口普遍存在于多类云中。本文尝试从云视场中找出这些云窗口, 通过用 RTTOV 模拟的 AIRS 数据进行方法可行性和有效性验证, 一方面提高红外高光谱资料的利用率, 另一方面为通过高光谱资料反演云参数提供一种思路。

1 方法介绍

在 RTTOV [6] 给定的某一大气状态下, AIRS 的晴空辐射亮温光谱曲线和有单一卷云污染时的亮温光谱曲线如图 1(a) 实线和虚线所示。如果这两条光谱曲线不包含其他误差, 则通过比较可以容易地找出不受云影响的通道 (即云观测亮温曲线与晴空亮温光谱曲线完全重合的通道), 同时也能看出不同通道受云影响的程度。在实际观测中, 由于仪器的误差和辐射模式的误差会使得观测曲线和晴空光谱曲线之间存在偏差漂移, 该方法的实现比较困难。

为有效地找出不受云污染的通道, 首先定义偏差矢量:

$$D = \frac{|BT_{clear} - BT_{cloud}|}{BT_{clear}} \quad (1)$$

式中, D 为偏差矢量, 如图 1(b) 所示, BT_{clear} 为晴空亮温值, BT_{cloud} 为云观测亮温值。按照通道对云的响应系数对辐射亮温和偏差矢量进行重新排列, 如图 2 所示。

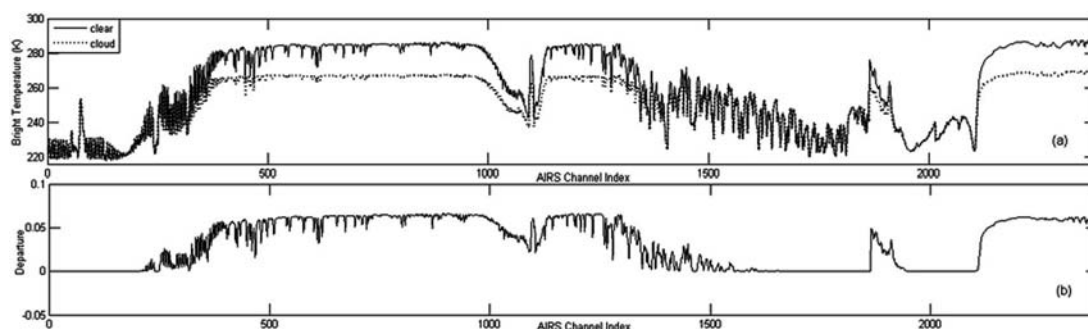


图 1 AIRS 光谱曲线

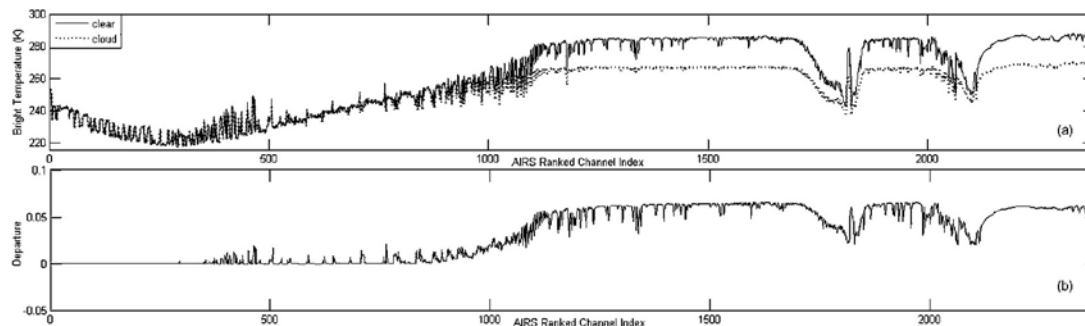


图 2 排列后的 AIRS 光谱曲线

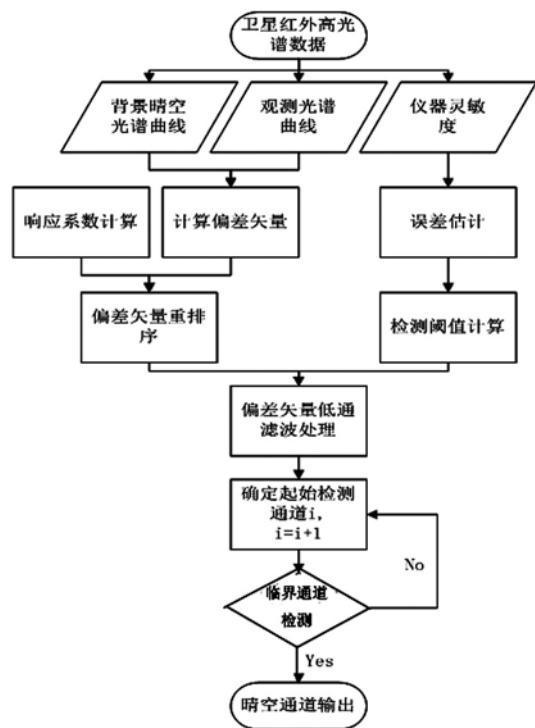


图 3 红外高光谱资料云检测的流程图

云的信号按照通道的灵敏度进行了重新排列, 排序后的第一个通道为 AIRS 接近大气层顶的通道, 最后一个通道为贴近地面的通道。当权重系数最大值处于同一层时按照权重系数的大小排列。对偏差矢量进行低通滤波处理, 修正不可估计的误差项。找出第一个恰好被云污染的

通道, 并定义其为临界通道, 则灵敏度大于临界通道的通道理论上为受云污染的通道, 而灵敏度小于临界通道的通道为理论上不受云污染的通道, 具体流程如图 3 所示。

2 临界通道检测

在排序后的偏差矢量中, 第一个通道对应高度最高的通道, 最后一个通道对应地表。首先对偏差矢量进行低通滤波, 平滑偏差矢量, 消去观测误差和仪器误差的影响。把潜在的起始检测通道分为三类: (1) 在对流层和边界层内偏差矢量最小的通道; (2) 整层大气中偏差矢量最小的通道; (3) 第一个通道; 如图 4 所示。

图 4 中, 实心五角星代表潜在的起始通道, 带箭头的矢量代表检测方向。临界通道满足: (1) $D^n \leq D_{threshold}^n$; (2) $D^{n+1} \geq D_{threshold}^{n+1}$; 式中, D^n 表示排列后的第 n 个通道的偏差, $D_{threshold}^n$ 为第 n 个通道的偏差阈值。偏差阈值定义为

$$D_{threshold}^n = \frac{G^* NEDT^n + \varepsilon_{total}^n}{BT_{clear}^n} \quad (2)$$

式中, $NEDT^n$ 为通道 n 的灵敏系数, G 为检测系数, 是实验室经验常数; ε_{total}^n 为观测误差和仪器误差之和, BT_{clear}^n 为通道晴空亮温值。

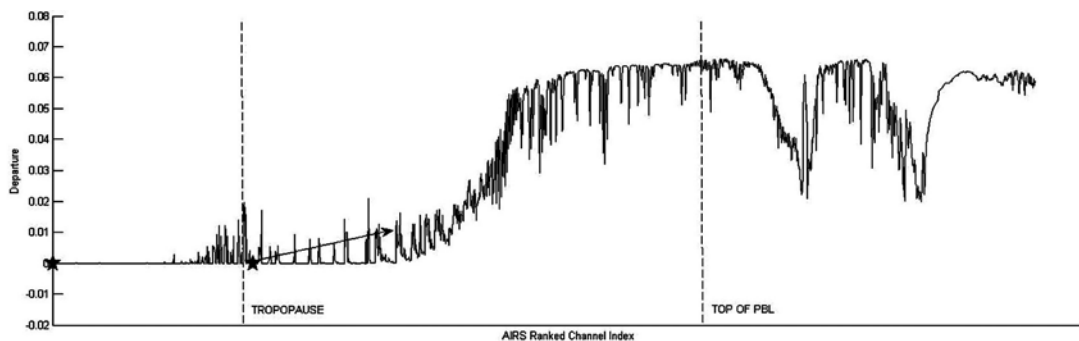


图 4 潜在起始检测通道的示意图

3 AIRS 模拟数据实验

为了测试本文方法的检测效果, 采用 Tiros 业务垂直探测器的辐射传输模式 RTTOV10.0 模拟有云污染的 AIRS 资料。辐射传输模式 RTTOV10.0 由欧洲中期数值预报中心和欧洲卫星

气象中心联合开发, 可考虑大气温度、湿度、组成成分、云类、云组成成分、云微观结构等的影响。在垂直方向上从 0.005 hpa 到 1100 hpa 共分为 101 层^[7]。

图 5 和图 6 为 RTTOV 模拟的不同云量 (0 为

晴空, 1 为完全被云覆盖) 在单一卷云覆盖下的 AIRS 探测亮温, 云水含量设为 0.6 g/m^3 , 云高设为 617.5 hpa , 其中图 6(b) 为通道按对云的响应系数排列后的亮温曲线。可以看出, 部分通道对卷云较敏感, 不同云量下曲线变化明显, 而部分通道则不敏感, 变化很小甚至没有变化。

图 6(a) 是云量为 0.1 时的云检测结果, 共有 897 个通道完全不受云的影响, 理论值为 1053。图 6(b) 为云量等于 0.5 时的云检测结果, 共有 746

个通道完全不受云的影响, 理论值为 938。图 6(c) 为云量等于 1 时的云检测结果, 共有 706 个通道完全不受云的影响, 理论值为 926。导致上述现象的原因有: (1) 模式误差的影响。随着云量的增加, 偏差矢量在未通过阈值检验的通道处误差较大; (2) 通道权重系数的影响。根据统计, 未通过阈值检验的通道其响应系数均在 0.03 以下, 对应的权重函数梯度较小。

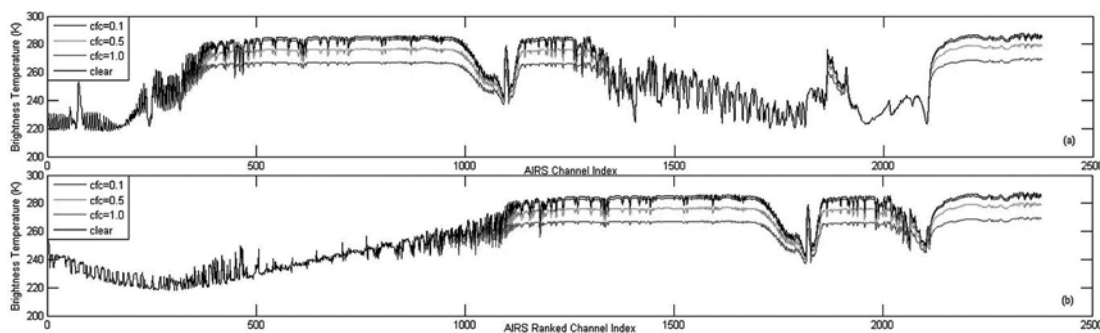


图 5 不同云量下的 AIRS 亮温曲线

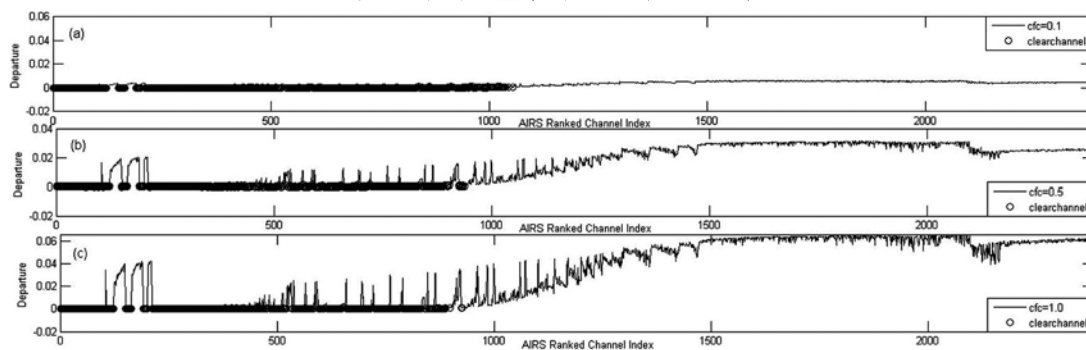


图 6 不同云量的 AIRS 云检测结果

图 7 为 RTTOV 模拟的不同云高的单一卷云覆盖下的 AIRS 探测亮温, 云水含量设为 0.6 g/m^3 , 云量设为 1。图 7(b) 为通道按对云的响应系数排列后的亮温曲线。可以看出, 部分通道对卷云云高较敏感, 因云高的不同有明显的变化, 而部分通道则不敏感, 变化很小甚至没有变化。

图 8(a) 是云高为 15 km 时的云检测结果, 共有 771 个通道完全不受云的影响, 理论值为 993。图 8(b) 是云高等于 18 km 时的云检测结果, 共有 706 个通道完全不受云的影响, 理论值为 926。图 8(c) 是云高等于 21 km 时的云检测结

果, 共有 632 个通道完全不受云的影响, 理论值为 840。导致此现象的原因与云量实验组相同。

图 9 为 RTTOV 模拟的不同云水含量的单一卷云覆盖下的 AIRS 探测亮温, 云高设为 617.5 hpa , 云量设为 1。图 9(b) 为通道按对云的响应系数排列后的亮温曲线。可以看出, 部分通道对卷云云水含量较敏感, 随着云水含量的不同有明显的变化, 而部分通道则不敏感, 变化很小甚至没有变化。

图 10(a) 为云水含量为 0.4 g/m^3 时的云检测结果, 共有 771 个通道完全不受云的影响, 理论值为 926。图 10(b) 为云水含量为 0.6 g/m^3 时的云

检测结果, 共有 706 个通道完全不受云的影响, 理论值为 926。图 10(c) 为云水含量为 0.8 g/m^3 时的云检测结果, 共有 632 个通道完全不受云的影响, 理论值为 926。可以看出, 不同云水含量

对应的理论晴空通道完全相同。云水含量增加时实验晴空通道数减少的主要原因是辐射传输模式的误差以及光谱对云水含量的响应系数不同。

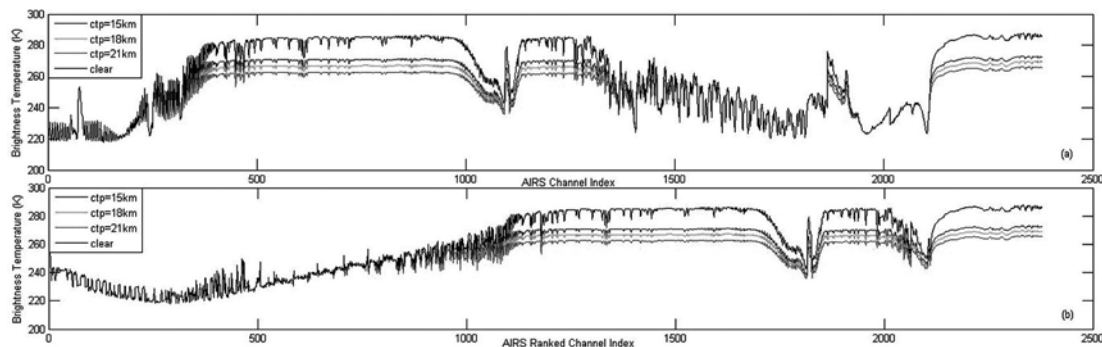


图 7 不同云高的 AIRS 亮温曲线

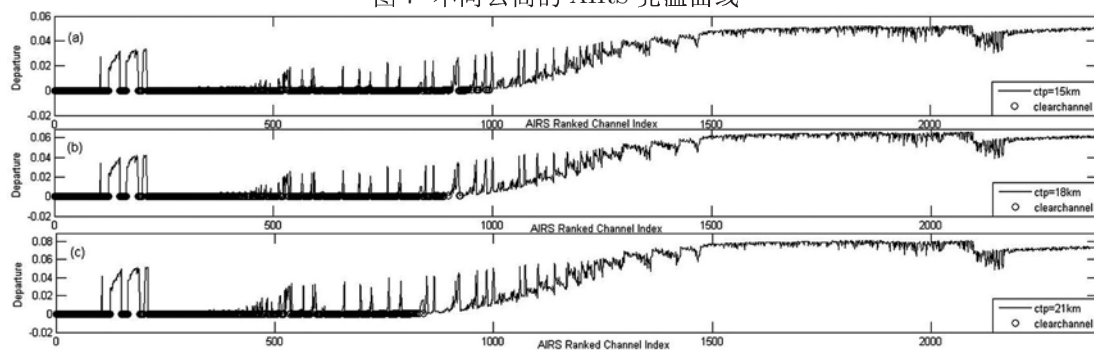


图 8 不同云量的 AIRS 云检测结果

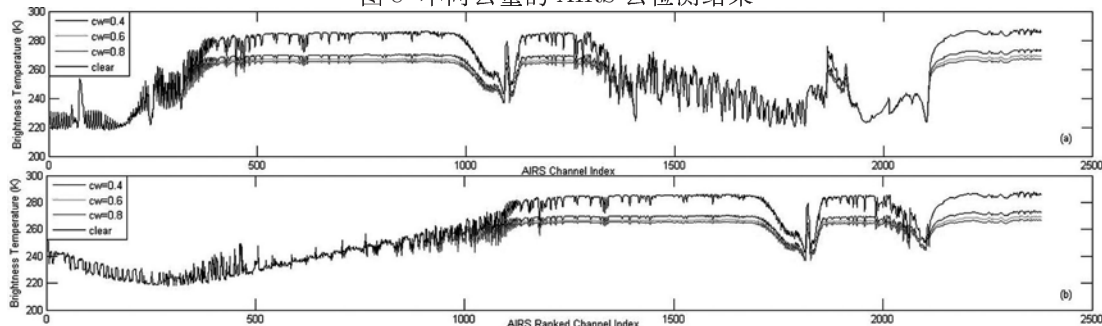


图 9 不同云水含量的 AIRS 亮温曲线

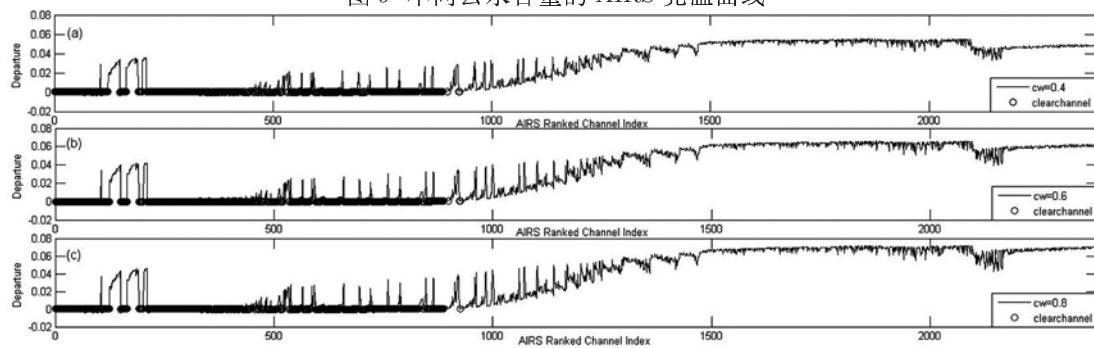


图 10 不同云水含量的 AIRS 云检测结果

4 AIRS 实测数据实验

选取 2013 年 05 月 06 日第 46 景 AIRS 数据, 地理位置为中国南海区域, 背景晴空光谱曲线由 AIRS 的二级数据提供。具体结果如图 11 所示。

图 10 是 AIRS 第 46 景中受云污染的一个像素点, 通过本文方法找出不受云影响的通道共计 630 个, 占总通道数的 26.5%, 因而能更好地利用 AIRS 的潜在信息。

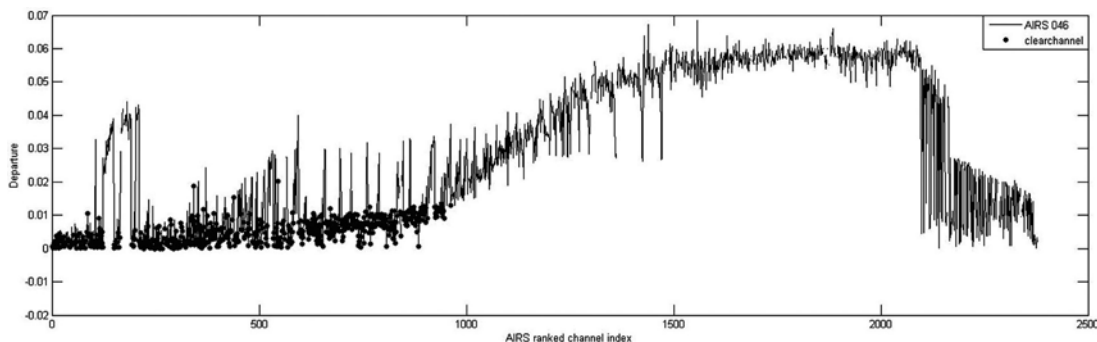


图 11 AIRS 晴空通道检测结果

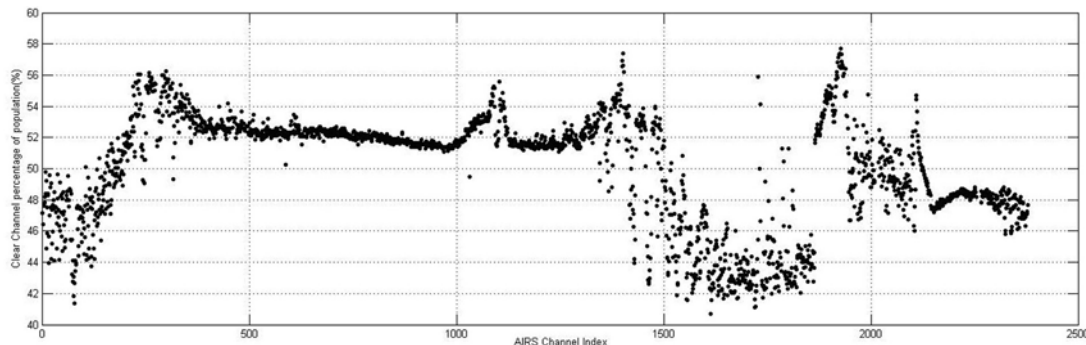


图 12 AIRS 云检测晴空通道频率

5 总结

针对高光谱数据的特点提出了一种新的云检测方法, 从受云污染的视场中找出未受云污染的晴空通道, 从而增加了数据的利用率, 大大节约了资源。通过实验发现, 云量、云高和云类对通道的检测结果影响很大。在单一的同类云、同高度下晴空通道随着云量的增加而减少; 在单一的同类云、同云量下晴空通道随着云高的增加而减少。

通过实验发现, 光谱噪声、观测误差、仪器误差和辐射模式误差对云检测方法的影响很大。

为了进一步验证该方法的可行性, 对第 46 景数据的全部 12150 个像素点进行了云检测处理。结果显示, 大部分通道均不同程度地出现晴空现象, 除了 178 个通道频率为 0, 为完全受云污染或观测数据缺失, 其余通道晴空概率均在 40% 以上。图 12 中出现了四个峰值区域, 这些区域最大权重系数对应的高度较高的通道易出现晴空状况。

通道的响应系数会受温度、水气含量以及大气成分的影响, 提高响应系数的精度将可大大改善云检测结果的精度。

本文只研究了夏季洋面上单一卷云的状况。实际中由于季节、大气温度廓线分布及下垫面类型的不同, 云的类别较复杂, 这有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 李俊, 曾庆存. 有云时大气红外遥感及其反演问题[J]. 大气科学, 1997, 21(4): 376-400.
- [2] Schiffer R A, Rossow W B, The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP)-The First

- Project of the World Climate Research Programme [J]. *American Meteorological Society*, 1983, **64**(7): 779-784.
- [3] Matricardi M. The Inclusion of Aerosols and Clouds in RTIASI, the ECMWF fast radiative transfer model for the infrared atmospheric sounding interferometer [M]. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 2005.
- [4] Young I, Zhang Y. Readme document for AIRS Level-2 Version 5 Cloud-cleared IR Radiance [R]. National

Aeronautics and Space Administration, 2009.

- [5] McNally A P, Watts P D. A Cloud Detection Algorithm for High-spectral-resolution Infrared Sounders [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003, **129**(595): 3411-3423.
- [6] Hocking J, Rayer P, Saunders R, et al. RTTOV v10 Users Guide [G]. NWP SAF, EUMETSAT, 2011.
- [7] Saunders R. RTTOV v10 Top Level Design [G]. NWPSAF-MO-DS-019, 2010.

新闻动态 News

美国 SBIRS GEO-2 卫星投入运行

据 www.lockheedmartin.com 网站报道, 美国洛克希德·马丁公司研制的第二颗天基红外系统 (SBIRS) 地球同步轨道 (GEO) 卫星最近投入运行, 该卫星能够为用户提供针对弹道导弹发射和其他战术情报活动的持续预警能力。



图 1 SBIRS GEO 卫星的概念图。与现有的预警卫星相比, 载有非常先进的扫描和凝视传感器的 SBIRS GEO 卫星具有更高的红外灵敏度和更短的重访时间。其中, 扫描传感器可以对全球导弹发射和自然现象进行广域监视, 而凝视传感器则可以出色的灵敏度对感兴趣的较小区域进行观测

GEO-2 卫星于 2013 年 3 月 19 日发射升空, 仅仅过了 8 个月, 该卫星就通过了美国空军太空司令部的运行验收, 其性能已经达到并部分超过了设计指标。GEO-1 卫星已于 2013 年 5 月 21 日宣布投入运行。

SBIRS 系统可以为国家领导、作战指挥官、情报机构以及其他的关键决策人员提供及时、可靠、准确的导弹预警与红外监测信息, 使美国在全球导弹发射探测、弹道导弹防御、技术情报收集以及战时态势感知等方面的能力得到加强。

SBIRS 系统是一个由 GEO 卫星、高椭圆轨道 (HEO) 有效载荷以及地面硬件与软件设施组成的有机整体。该系统可以同时支持多个任务, 并可提供持续覆盖全球的强劲性能。

洛克希德·马丁公司的 SBIRS 合同包括 4 个 HEO 有效载荷、4 颗 GEO 卫星以及用于接收、处理和传送红外任务数据的地面设施。HEO-1/2 有效载荷分别于 2004 年和 2005 年完成交付, HEO-3 有效载荷也于 2013 年 6 月顺利交付。它们能够提供超出设计指标的任务性能。

2013 年秋季, GEO-3 卫星已经成功通过了卫星平台的功能集成测试, 并计划于 2014 年交付给美国空军。仍处于研制中的 GEO-4 卫星计划于 2015 年完成交付。另外, 洛克希德·马丁公司还正在按照合同为 GEO-5/6 卫星采购先进元器件。

美国空军空间与导弹系统中心的红外空间系统部门负责领导 SBIRS 研究团队。洛克希德·马丁公司是 SBIRS 项目的主承包商, Northrop Grumman 公司则负责有效载荷的集成工作。另外, 美国空军太空司令部负责 SBIRS 系统的运行。

□ 岳桢千