

机载大气红外高分辨率光谱的信息量分析

吴欣^{1,2,3}, 戴聪明^{1*}, 武鹏飞¹, 唐超礼^{1,3}, 赵凤美^{1,4}, 魏合理¹

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031;
3. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001;
4. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230022)

摘要: 机载红外高分辨率干涉光谱仪(HIS)是遥感大气信息的大气红外背景辐射测量装置。基于 HIS 红外高光谱大气数据,对大气温度和主要大气吸收气体进行了敏感性分析;并通过引入信息容量的概念,利用一维变分方法,对 HIS 测量装置遥感探测大气参数的能力进行评估,定量描述了 HIS 测量的红外光谱反演大气温度和水汽的信息容量、自由度和垂直分辨率等信息,其中温度、水汽的信息容量分别为 49.5、25.2;自由度分别为 10.5、5.6,温度的平均垂直分辨率为 2.2 km,水汽的垂直分辨率为 2 km;讨论了 HIS 的反演精度与仪器测量误差之间的关系,获取了大气温湿廓线的最小可探测精度。

关键词: 机载; 红外高分辨率光谱; 大气参数; 信息容量; 探测精度

中图分类号: P414.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1104004

Information analysis of airborne atmosphere infrared high resolution spectral

Wu Xin^{1,2,3}, Dai Congming^{1*}, Wu Pengfei¹, Tang Chaoli^{1,3}, Zhao Fengmei^{1,4}, Wei Heli¹

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China;
3. Institute of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
4. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China)

Abstract: Airborne High-spectral Interferometer Sounder (HIS) is a detector designed to measure the infrared atmospheric background radiation in nadir viewing mode. Based on HIS infrared high-resolution spectral data, sensitivity analysis of atmospheric temperature and major atmospheric absorbers were carried out. By introducing the concept of information content and using the 1D-VAR method, the ability of detecting atmospheric parameters was analyzed with HIS measurement. The information content, degree of freedom and vertical resolution of temperature and water vapor have been used to characterize the observation system. The information content of temperature and water vapor was 49.5 and 25.2

收稿日期: 2019-07-11; 修订日期: 2019-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(41505023); 装备预先研究项目(41416020204)

作者简介: 吴欣(1991-), 女, 博士生, 主要从事大气红外遥感方面的研究。Email: wuxin.91@foxmail.com

导师简介: 魏合理(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事红外辐射大气传输、卷云红外辐射特性方面的研究。

Email: hlwei@aiofm.ac.cn

通讯作者: 戴聪明(1987-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事大气环境背景辐射和大气传输建模方面的研究。Email: cmdai@aiofm.ac.cn

respectively, the degree of freedom was 10.5 and 5.6 respectively, the average vertical resolution of temperature was 2.2 km, and the average vertical resolution of water vapor was 2 km. The relationship between the inversion accuracy and the instrument noise was discussed. It shows the minimum measurable accuracy of retrieved temperature and humidity profile.

Key words: airborne; infrared high-resolution spectral; atmospheric parameter; information content; detecting accuracy

0 引言

近十几年来,高光谱红外大气探测技术的发展,为地球大气遥感探测提供了大量的观测资料,典型的高光谱大气探测设备有红外高分辨率干涉光谱仪(High-spectral-resolution interferometer, HIS)、(Atmospheric Infrared Sounder, AIRS)、(Infrared Atmospheric Sounder Interferometer, IASI)、(Cross-track Infrared Sounder, CrIS)^[1-3]。我国的风云四号静止气象卫星也搭载了干涉式大气垂直探测仪 GIIRS,光谱分辨率 0.8 cm^{-1} ,可在垂直方向上对大气结构实现高精度定量探测。这些高光谱探测仪的运行可获取精细的大气和地表信息,广泛应用于数值天气预报同化和灾害天气监测预警^[4]等方面。机载大气探测为观察大气过程提供了一个独特的平台,观测的对象主要有对流层和平流层的辐射传输过程、大气化学、云特性、气溶胶特性。机载观测最初的目的是验证和改进大气辐射传输模型,如 CO_2 的线型和水汽的连续吸收、对云粒子和气溶胶的测量也被用于 Unified Model 中云和气溶胶模型^[5];如今,机载观测被广泛用于遥感测量的校准和星载遥感反演结果的验证,NASA 于 2007 年在墨西哥湾开展了 JAIVEx 外场试验^[6],在 IASI 过境的位置利用机载干涉仪获得红外辐射值,并使用下投式探空仪密集地测量大气状态,以确定 IASI 的绝对辐射精度和验证 IASI 反演算法。机载测量的空间分辨率很高(如飞行高度 20 km 对应的空间分辨率为 2.9 km 对应的空间分辨率为 0.4 km),可以弥补极轨卫星观测空间分辨率(如 AIRS 的空间分辨率为 13 km、IASI 的空间分辨率为 12 km)的不足^[7];机载观测对验证复杂场景的卫星遥感数据十分重要,例如飞机可在飞行高度范围内实现特定参数的原位测量,可以更好地约束、验证机载或星载红外遥感反演过程。近年来,一些研究人员将信息容量引用到高分辨率

光谱遥感中,并在星载高光谱探测仪器等大气参数反演中得到应用。2006 年,KW.Bowman 等^[8]将信息容量引入 TES 反演产品的特征描述中,比误差协方差矩阵这些多维的数据更加直观地描述产品的性能。在国内,2015 年,杜华栋等^[9]对 AMSU,HIRS,IASI,AIRS 四种仪器以及仪器组合所包含温度、湿度的信息容量进行计算来评估仪器特征;2016 年,狄迪等^[10]通过计算不同大气条件下的水汽信息容量,分析了青藏高原地表温度和地形高度对 AIRS 遥感水汽能力的影响;杨雨晗等^[11]在 2018 年利用信息熵-分步迭代法对 GIIRS 大气温度廓线反演的通道进行优选。

在利用辐射观测资料进行大气参数反演的过程中,对观测资料的特征描述和误差分析与反演本身同样重要,它们表述了反演产品的定量特征,包括精度、垂直分辨率等信息,反映了反演产品的应用潜力。在机载辐射测量数据反演大气温度、湿度等参数之前,对探测大气参数的能力进行评估十分必要。因此,文中基于 HIS 实测数据,分析了 HIS 探测大气温度和水汽的信息容量、自由度、垂直分辨率和测量精度等信息。

1 大气红外光谱探测精度的理论描述

图 1 是机载平台红外遥感的地-气辐射传输示意图,它表达了红外辐射的传播方向及相互作用过程。假设大气为局地热平衡的平面平行无散射介质,同时忽略地球曲率的影响,在给定波数 ν 处,机载平台观测到的辐射强度可以表示为^[12]:

$$I_z(\nu) = B(\nu^*, T_s) \tau_z(\nu^*, z_0) + \int_0^z B(\nu^*, T(z)) K(z) dz \quad (1)$$

式中: τ_z 为从高度 z 到机载平台的透射比; $K(z) = \frac{\partial \tau_z(\nu^*, z)}{\partial z}$ 为高度 z 上的权重函数。方程右端的第一

项代表地表发射辐射透过大气到达探测器的辐射；第二项表示机载平台以下部分大气向上发射辐射的贡献。

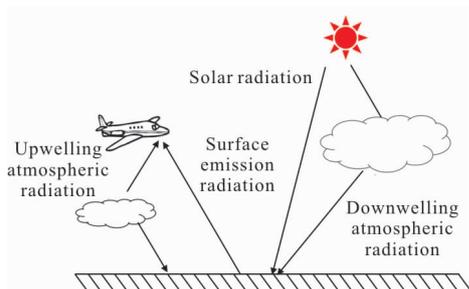


图 1 地-气系统辐射传输示意图

Fig.1 Schematic diagram of earth-atmospheric radiative transfer

设有两条温度廓线 T_1, T_2 , 对应的测量辐射亮度分别为 I_1, I_2 ; 依次记两者之差为 $\delta T, \delta I$, 由公式(1)可得 $\delta I = \int_0^z \delta T(z) \cdot K(z) dz$, 设 T_1, T_2 仅在高度 z_1 到 z_2

一小段有别, 则有:

$$|\delta I| = \left| \int_{z_2}^{z_1} \delta T(z) \cdot K(z) dz \right| \leq |\delta T| \cdot \int_{z_2}^{z_1} K(z) dz = |\delta T| \cdot (\tau(z_2) - \tau(z_1)) \quad (2)$$

$$|\delta T| \geq \frac{|\delta I|}{(\tau(z_2) - \tau(z_1))} \quad (3)$$

显然, 要分辨出最小温度变化 δT , 那么温度变化导致的辐射量变化 $|\delta I|$ 必须大于仪器测量误差。

$(\tau(z_2) - \tau(z_1))$ 有最大值, 即 $\frac{\partial \tau_z(v^*, z)}{\partial z}$ 在该层达到最

大值, 取 $\left| \frac{\partial \tau_z(v^*, z)}{\partial z} \right|_M$ 为所有通道中的最大值^[13]。由此, 定义温度反演精度:

$$\text{Precision} = \frac{NEDT}{|\text{Jacobian}|_M} \quad (4)$$

其物理意义为大气温度(或成分)变化超过该值时, 才能引起大气辐射观测值有超过 $NEDT$ 的变化, 其值越小, 精度越高。当该值大于给定的精度要求, 表明反演精度较差, 不能很好地按要求的精度分辨出大气温度或成分的变化。

2 HIS 观测光谱的敏感性模拟分析

高分辨率干涉仪(HIS)是威斯康星大学气象卫星研究所(UW-SSEC)研发的测量大气红外背景辐

射光谱的装置。该装置自从 20 世纪 80 年代研制成功后参与了众多世界范围内的外场气象实验, 包括 FIRE I、II、III, CAMEX I、II, SUCCESS 等^[14]。在 FIRE III 实验中, HIS 的主要目的是观测北极大气的红外辐射特性、北极云的辐射特性以及反演大气温度和湿度廓线。HIS 装置搭载在 NASA ER-2 飞机上, 飞行高度约 20 km, 对地表和大气进行红外高光谱观测的空间分辨率约 2 km。HIS 采用迈克尔逊干涉仪测量低层大气向上光谱辐射, 其 4 627 个通道覆盖了 600~2 650 cm^{-1} 光谱区域, 划分为 3.77~4.88 μm , 5.56~9.09 μm , 9.3~16.67 μm 谱段, 光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda$ 最高达到接近于 3 000, 每个通道最大光程差和光谱分辨率见表 1。光谱测量的绝对误差和噪声等效亮温(NEDT)分别约为 0.5 和 0.25 K^[1]。HIS 精确地观测地表和大气向上的红外辐射(绝对误差不超过 1 K), 并以 0.1 K 的再现力重现观测的上行辐射。

表 1 HIS 主要光谱参数

Tab.1 Characteristics of the HIS aircraft instrument

	Band range/ cm^{-1}	Maximum optical path difference/cm	Spectral resolution/ cm^{-1}	Spectral interval/ cm^{-1}
Band 1	600-1 075	1.550 731 1	0.322 428 5	0.275 512
Band 2	1 100-1 800	0.683 587 6	0.731 435 2	0.482 147
Band 3	2 050-2 650	0.518 514 1	0.964 294	0.482 147

高光谱干涉仪观测谱段覆盖了 $\text{CO}_2, \text{O}_3, \text{N}_2\text{O}, \text{CO}, \text{CH}_4$ 等大气成分的吸收波段。针对 HIS 的光谱特性, 利用 LBLRTM 辐射传输模型分别计算了大气温度廓线变化+1 K、 H_2O 廓线变化-20%、 CO_2 廓线变化-1%、 $\text{O}_3, \text{N}_2\text{O}, \text{CO}, \text{CH}_4$ 廓线变化-10% 情况下对应的模拟辐亮度变化, 用来分析 HIS 大气红外光谱的灵敏度和信息量, 以确定其遥感大气的的能力。

根据 HIS 测量时当地的大气探空廓线数据, 结合标准模式大气得到的大气参数廓线作为 LBLRTM 的输入, 其中 0~20 km 大气压强、温度、湿度廓线如图 2 所示。 CO_2 含量设置为 380 ppmv, $\text{O}_3, \text{N}_2\text{O}, \text{CO}, \text{CH}_4$ 等的浓度取自亚北极夏季大气模式。

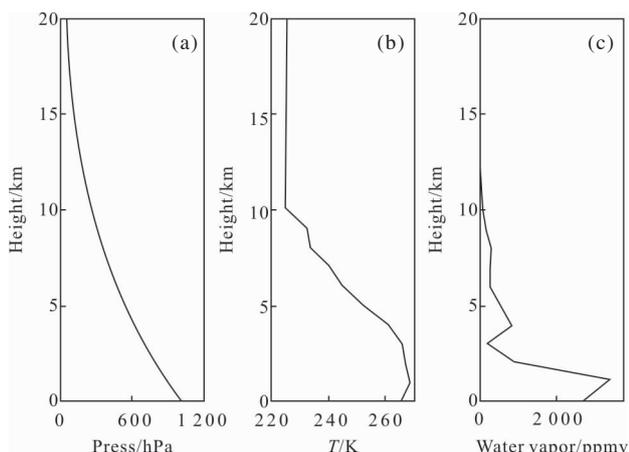


图 2 0~20 km 的压强、温度、湿度廓线

Fig.2 Profile of press, temperature and water vapor from 0 to 20 km

图 3 是计算的大气辐射对大气参数的敏感性(亮温差)。在 HIS 观测谱段,温度、水汽廓线是影

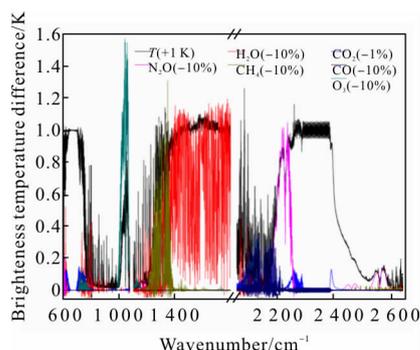


图 3 HIS 观测光谱敏感性模拟分析

Fig.3 Sensitivity analysis of simulated HIS observations

响观测辐亮度的主要因素,温度变化影响 HIS 大部分观测波段,1 K 的温度廓线变化在强吸收波段导致约 1 K 的辐亮度变化;水汽的敏感波段范围为 1 300~1 800 cm^{-1} ,10% 的水汽廓线变化会导致 0.2~1.2 K 的辐亮度变化; CO_2 的敏感性波段为 600~800 cm^{-1} 以及 2 200~2 430 cm^{-1} ,1% 的 CO_2 廓线变化导致 0.15 K 的辐亮度变化; O_3 的敏感性波段为 980~1 075 cm^{-1} 以及 2 050~2 150 cm^{-1} ,10% 的 O_3 廓线变化分别会导致 1.57、0.3K 的辐亮度变化; N_2O 的敏感性波段为 1 200~1 350 cm^{-1} 以及 2 150~2 280 cm^{-1} ,10% 的 N_2O 廓线变化分别会导致 0.55、1.05 K 的辐亮度变化; CO 的敏感性波段为 2 050~2 200 cm^{-1} ,10% 的 CO 廓线变化导致 0.36 K 的辐亮

度变化; CH_4 的敏感性波段为 1 200~1 400 cm^{-1} ,10% 的 CH_4 廓线变化导致 1.31 K 的辐亮度变化。若大气温度/气体变化导致的辐亮度变化范围大于噪声等效亮温(NEDT),则说明 HIS 能够遥感分辨出来,反之则不能遥感。

下面分析亮温差达到 0.25 K (标称的 NEDT) 时,HIS 最小可分辨的各大气参数的结果如表 2 所示。

表 2 6 种主要组份的最小探测精度和对应的波数

Tab.2 Minimum detecting precision and corresponding wavenumber of six major gases

Atmospheric composition	Minimum detecting precision	Wavenumber corresponding to the highest precision/ cm^{-1}
H_2O	2.11%	1 376.04
CO_2	1.68%	711.098
O_3	1.59%	1 038.406
N_2O	2.38%	2 231.86
CO	6.87%	2 127.716
CH_4	1.90%	1 346.637

3 HIS 大气参数探测精度评估

3.1 HIS 红外光谱所含的大气信息量和垂直分辨率

信息容量(Information Content, IC)和自由度(Degrees of Freedom for Signal, DFS) 都是量化遥感系统性能指标,信息容量可以表征由于反演导致的观测值不确定度的减少程度。但是一个精度很高的标量和一组精度较低的矢量数据可能具有相同的信息容量,为此可用自由度来表述遥测系统的性能^[15],自由度代表的是辐射测量值中包含的独立的信息。因此,使用信息容量和自由度两个参数来量化 HIS 遥测系统所携带的有效信息量,它们的定义如下:

$$IC = -\frac{1}{2} \log_2 \det(\hat{S}_{ap}^{-1}) \quad (5)$$

$$DFS = \text{Trace}(I - \hat{S}_{ap}^{-1}) \quad (6)$$

式中: S_{ap} 为背景场误差协方差矩阵; \hat{S} 为反演产品的误差协方差矩阵,也称为分析误差协方差矩阵,其对角线数据为分析误差的标准差。背景误差协方差矩

阵可通过统计背景场的特征得到。对于 \hat{S} ,利用一维变分方法,可以估计为:

$$\hat{S} = (K^T S_\varepsilon^{-1} K + S_{ap}^{-1})^{-1} \quad (7)$$

式中: S_ε 为观测误差协方差矩阵; K 为雅克比矩阵。平均核函数(Averaging Kernal, AK)定义如下:

$$AK = (K^T S_\varepsilon^{-1} K + S_{ap}^{-1})^{-1} K^T S_\varepsilon^{-1} K \quad (8)$$

平均核函数也称为模型分辨率矩阵,其对角元素的倒数就是对应层的垂直分辨率。

使用 FIRE III 任务中飞机航线上气球探空(Barrow 站点)获得的温湿廓线的平均值作为背景场廓线(见图 2),得到的 HIS 遥测系统的信息量分析如下:当飞机飞行高度为 20 km 时,HIS 温度产品包含的信息容量为 49.5;自由度为 10.5;水汽产品包含的信息容量为 25.2,自由度为 5.6。Huang 等^[16]使用自由度来描述 HIS 观测系统,其中,温度的自由度为 11,水汽的自由度为 9。文中自由度整体比他们低是因为分析时使用实际的等效噪声误差,而 Huang 在全部通道上使用理论上的等效噪声误差 0.25 K;并且北极地区水汽含量很少,其飞机飞行高度以下水汽柱浓度是中纬度夏季标准大气模式的 1/6。按照公式(8)计算获得温度和水汽的平均核函数如图 4 所示,对应层的垂直分辨率取平均核函数矩阵对角元素的倒数,

可以得到:温度的平均垂直分辨率为 2.2 km,在

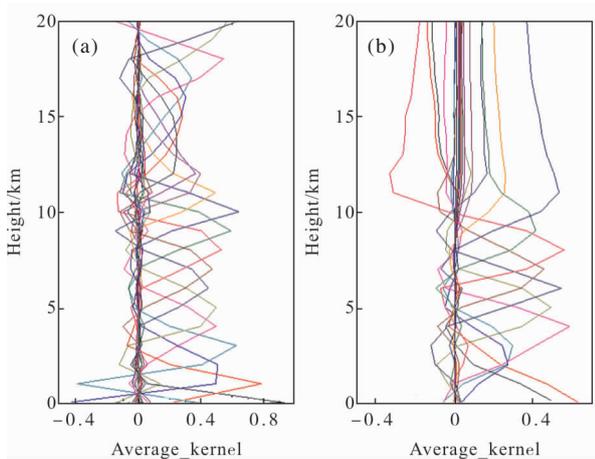


图 4 不同高度上温度(a)和水汽(b)的平均核函数
(图中不同颜色的曲线代表不同通道的核函数)

Fig.4 Averaging kernels for temperature (a) and water vapor (b) at different heights

近地面,温度的垂直分辨率可达 1.0 km 左右;在飞机飞行高度(20 km)附近,垂直分辨率约为 2 km;在 13~17 km 处,垂直分辨率为 3.5 km。在 10 km 高度以下,水汽的垂直分辨率约为 2 km。10 km 以上,水汽的垂直分辨率不高,计算得到 10 km 以下所含的水汽信息容量和自由度分别为 24.4、5.57,可以看出:观测值中所包含 10~20 km 内水汽有效信息量和独立信息量都很少,这可能是由于水汽含量很少导致的。

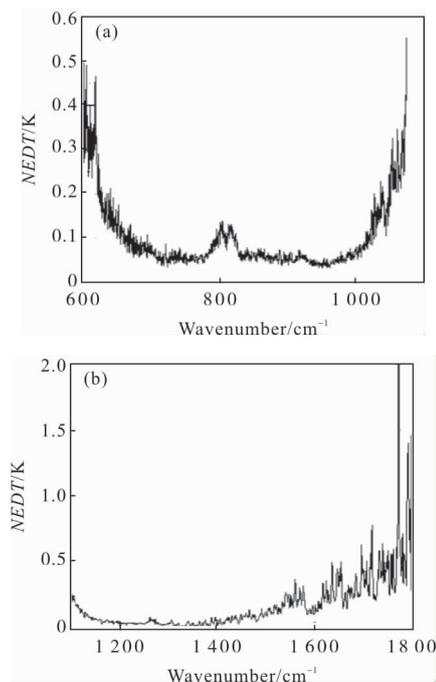
3.2 可探测精度

参考文献[17]报道 HIS 的绝对误差和噪声等效亮温(NEDT)分别约为 0.5、0.25 K。实际中,可以采用实际测量的光谱信号的标准差来描述仪器的噪声等效温差。

$$NEDT = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

式中: σ 为统计样本总体的标准差; n 为样本大小^[18]。计算得到的三个波段的 NEDT 如图 5 所示,可以看出:在光谱带边缘的 NEDT 相对较大,可能是由于波段边缘信噪比较差的原因。另外,在一些吸收带上,如 2 250~2 400 cm^{-1} 的 CO_2 吸收带,NEDT 也远大于标称值。

利用实际的气象探空数据,由逐线积分模式 LBLRTM 计算晴空大气地表和大气向上的辐射量,和 HIS 实际观测的光谱辐射量的对比如图 6 所示。



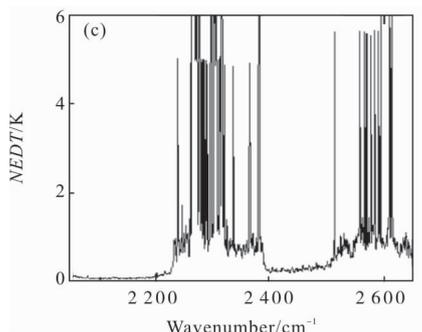


图 5 典型红外光谱仪的 *NEDT*

Fig.5 Typically noise equivalent temperature difference taken by HIS

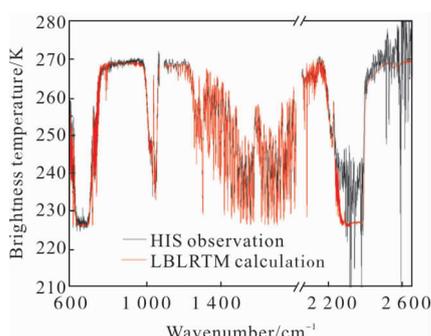


图 6 LBLRTM 计算的晴空大气的辐射量和 HIS 实际观测的辐射量的比较

Fig.6 Radiation comparison of the HIS observation and LBLRTM calculation under clear sky condition

图中显示, 在三个波段边缘以及强吸收带上, *NEDT* 显著增大, 其中 $2\ 050\sim 2\ 200\ \text{cm}^{-1}$, $2\ 400\sim 2\ 500\ \text{cm}^{-1}$ 范围内的均方根误差分别为 2.1、1.7 K; $2\ 200\sim 2\ 400\ \text{cm}^{-1}$, $2\ 500\sim 2\ 650\ \text{cm}^{-1}$ 分别为 6.8、8.6 K, 也进一步佐证了 *NEDT* 的计算结果。而在其他的波段上, LBLRTM 计算的结果和实际测量的结果吻合得非常好, 说明 LBLRTM 可以准确地模拟计算大气红外背景光谱。

根据上述研究获得的大气参数对应的敏感性波段, 分别对大气温度、湿度的可探测精度进行分析:

(1) 温度

雅克比(Jacobian)体现为波数为 ν 时, 目标成分廓线对观测辐射亮度的作用大小, 是大气成分物理反演中的重要参数。权重函数不仅反映通道对不同高度大气成分变化的敏感性, 也能用来估计反演大气状态的能力。图 7 为模拟计算的温度 Jacobian 随 HIS 观测波数的变化。

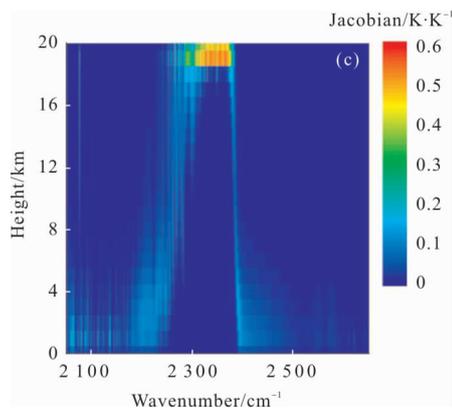
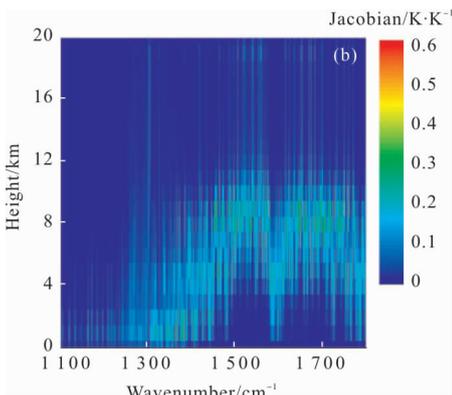
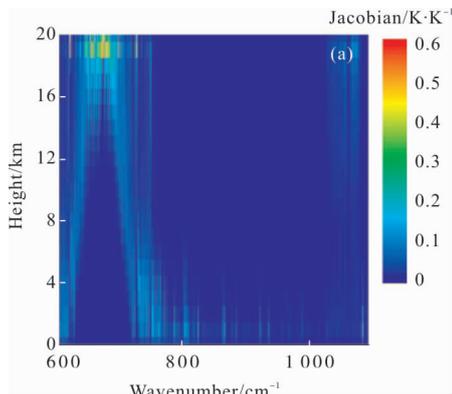


图 7 HIS 观测波段范围内的温度雅克比

Fig.7 Temperature Jacobian in HIS observation range

基于 HIS $600\sim 800\ \text{cm}^{-1}$ 高光谱数据, 模拟计算 HIS 反演温度廓线的精度, 得到每个高度层的精度, 如表 3 所示, 其平均值为 0.42 K, 最高精度出现在飞机飞行高度(20 km)附近, 这是由于该处的温度雅克比数值较大, 观测值对温度变化较敏感导致的。这也是利用机载平台进行遥感的优势之一。

在 HIS 的 $2\ 200\sim 2\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 范围内, 由于受到太阳散射辐射的影响比较严重, HIS 观测起伏较大, 基于该波段的温度可探测精度达不到 1 K 的要求。

表 3 温度廓线在不同高度上(0~20 km)的探测精度和对应波数

Tab.3 Detecting precision and corresponding wavenumber for temperature from 0 to 20 km

Height/km	Precision of band 1/K	Corresponding wavenumber/cm ⁻¹	Height/km	Precision of band 1/K	Corresponding wavenumber/cm ⁻¹
0	0.453	775.568 18	11	0.638	721.292 2
1	0.245	776.945 8	12	0.595	721.292 1
2	0.306	744.986 3	13	0.543	692.638 9
3	0.301	723.220 83	14	0.523	692.638 9
4	0.289	723.220 83	15	0.437	681.618 4
5	0.400	723.220 83	16	0.389	681.618 4
6	0.409	707.792 1	17	0.365	678.587 8
7	0.453	707.792 11	18	0.254	673.353 0
8	0.538	707.792 11	19	0.132	667.016 1
9	0.689	706.138 98	20	0.152	667.016 2
10	0.675	701.179 8			

(2) 水汽

图 8 是水汽在 1 100~1 800 cm⁻¹ 范围内的雅克比。鉴于水汽主要集中在 10 km 以下的对流层(占全部水汽含量的 95%以上), 所以仅对 0~10 km 的水汽进行分析。由图 8 可以看出: 无论采用什么通道, 雅克比在近地面层(0~4 km)的绝对值较小, 因此该高度范围内的水汽可探测精度较低, 这也是使用红外被动方法遥测水汽含量的局限性。此时, 水汽在 0~10 km 的平均可探测精度为 7.9%。

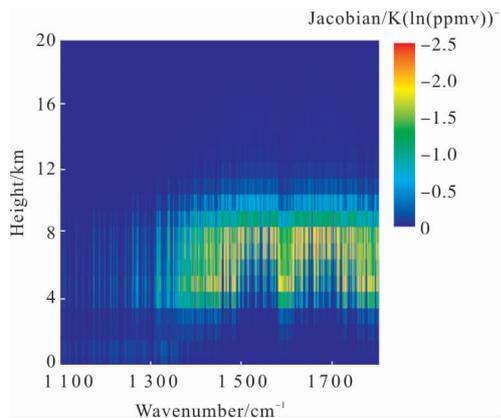


图 8 第二波段内的水汽雅克比

Fig.8 Water vapor Jacobian in band2

根据上述方法, 0~10 km 每个高度层上的水汽精度如表 4 所示。

表 4 水汽廓线在不同高度上(0~10 km)的探测精度和对应波数

Tab.4 Detecting precision and corresponding wavenumber for water vapor from 0 to 10 km

Height/km	Precision of band 2	Corresponding wavenumber/cm ⁻¹
0	14.08%	1 344.70
1	9.88%	1 345.19
2	23.8%	1 353.86
3	13.1%	1 320.60
4	2.84%	1 400.63
5	2.11%	1 376.04
6	2.64%	1 400.15
7	2.42%	1 354.83
8	2.72%	1 379.42
9	4.58%	1 340.36
10	8.81%	1 399.19

4 结 论

文中对 HIS 红外高光谱分辨率观测系统进行信息分析, 获得的温度、水汽的信息容量分别为

49.5、25.2;自由度分别为 10.5、5.6,高于 AIRS 机载模拟器所包含的信息量;温湿廓线的平均垂直分辨率约为 2 km;实现了对观测系统的所含有效信息的定量评估,有利于不同红外遥感系统之间性能的比较。

对红外波段的温度和主要大气吸收分子进行了敏感性分析,获得其敏感的波段范围和对应辐射值变化幅度。进一步得到了用 HIS 测量的大气红外光谱反演大气参数的最小可探测精度,其中温度的精度为 0.42 K,水汽精度为 7.9%;这些信息可用于反演通道的最优选择、反演算法优化设计;并且最小探测精度对应的波数是对大气参数变化最敏感的波段,因此,对大气探测仪器的光谱分辨率和观测通道的设计有参考价值。

参考文献:

[1] Revercomb H E, Laporte D D, Buijs H, et al. Radiometric calibration of IR Fourier transform spectrometers: solution to a problem with the High-Resolution Interferometer Sounder [J]. *Appl Opt*, 1988, 27(15): 3210-3218.

[2] Susskind J, Barnett C D, Blaisdell J M. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds [J]. *Geoscience & Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2003, 41(2): 390-409.

[3] Clerbaux C, Boynard A, Clarisse L, et al. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2009, 9(16): 724-5.

[4] Hong Jun, Yao Zhigang, Han Zhigang, et al. Numerical simulations and AIRS observations of stratospheric gravity waves induced by the Typhoon Muifa [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(7): 2283-2293. (in Chinese)
洪军,姚志刚,韩志刚,等.台风“梅花”诱发平流层重力波的数值模拟与 AIRS 观测[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(7): 2283-2293.

[5] Mcbeath K. The use of aircraft for meteorological research in the United Kingdom [J]. *Meteorological Applications*, 2014, 21(1): 105-116.

[6] Newman S M, Larar A M, Smith W L, et al. The joint

airborne IASI validation experiment: an evaluation of instrument and algorithms [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2012, 113(11): 1372-1390.

[7] Illingworth S, Allen G, Newman S, et al. Atmospheric composition and thermodynamic retrievals from the ARIES airborne FTS system-Part 1: technical aspects and simulated capability [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(4): 1133-1150.

[8] Bowman K W, Rodgers C D, Kulawik S S, et al. Tropospheric emission spectrometer: retrieval method and error analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1297-1307.

[9] Du H D, Huang S X, Fang H X, et al. Study of the information content contained in remote sensing data of atmosphere [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(1): 683-691. (in Chinese)
杜华栋,黄思训,方涵先,等.星基大气探测资料信息容量研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 683-691.

[10] Di Di. The effect of surface characteristics on remote sensing atmospheric parameters over the Tibetan Plateau [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2016. (in Chinese)
狄迪.青藏高原地表特征对卫星遥感大气状态参数影响研究[D].北京:中国气象科学研究院,2016.

[11] Yang Yuhan, Yin Qiu, Shu Jiong, et al. Channel selection of atmosphere vertical sounder (GIIRS) onboard the FY-4A geostationary satellite [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(5): 35-42. (in Chinese)
杨雨晗,尹球,束炯,等. FY-4A 大气垂直探测仪(GIIRS)温度探测通道优选 [J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(5): 35-42.

[12] Dong Chaohua, Li Jun, Zhang Peng, et al. Principle and Application for Satellite Hyperspectral Infrared Atmospheric Remote Sensing [M]. Beijing: Science Press, 2013: 5-217. (in Chinese)
董超华,李俊,张鹏,等.卫星高光谱红外大气遥感原理和应用[M].北京:科学出版社,2013: 5-217.

[13] Zeng Qingcun. Principles for Atmospheric Infrared Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 1974: 22-24. (in Chinese)
曾庆存.大气红外遥测原理[M].北京:科学出版社,1974:

- 22-24.
- [14] SSEC/FIRE Arctic Cloud Experiment Home Page. http://cimss.ssec.wisc.edu/fireiii/arctic_fire.html[EO/OL]. 2019-07-11.
- [15] Rodgers C D. Information content and optimisation of high spectral resolution remote measurements [J]. *Advances in Space Research*, 1998, 21(3): 361-367.
- [16] 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(3): 265-274.
- [17] Smith W L, Revercomb H E, Knuteson R O, et al. Cirrus cloud properties derived from high spectral resolution infrared spectrometry during FIRE II. Part I: The High Resolution Interferometer Sounder (HIS) Systems[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1995, 52(23): 4238-4245.
- [18] Nicholas Nalli. Sea surface skin temperature retrieval using the high-resolution interferometer sounder (HIS) [D]. US: University of Wisconsin-Madison, 1995.