

光学学报

MIGHTI/ICON 卫星的中高层大气温度反演与验证

胡向瑞¹, 李发泉², 王后茂³, 张子豪¹, 郭建军¹, 武魁军¹, 何微微^{1*}

¹烟台大学物理与电子信息学院, 山东 烟台 264005;

²中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430071;

³中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

摘要 中间层顶-低热层区域是地球大气中重要的空间区域。基于剥洋葱算法及氧分子气辉光谱理论,利用迈克耳孙全球高分辨率热层成像干涉仪(MIGHTI)测量的 O₂-A 波段气辉辐射强度图像,反演得到海拔为 92~140 km 的大气温度廓线。首先,根据氧分子气辉光谱理论,结合 MIGHTI 仪器参数,计算了其各光谱通道信号强度随温度的变化关系;然后,利用剥洋葱算法提取各光谱通道的目标层信号强度,并结合信号强度与温度的函数关系,反演得到大气温度廓线;最后,通过与 SABER 卫星的观测结果及 NRLMSIS-00 大气模型的仿真数据的对比,验证了 MIGHTI 温度反演的可靠性与合理性。误差分析结果表明,MIGHTI 的温度探测误差随高度增加而增大,在 92 km 处为 1 K,在 140 km 处为 13 K。

关键词 大气光学; 温度反演; 气辉辐射; 临边观测; 剥洋葱算法

中图分类号 P412.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221914

1 引言

中高层大气温度是表征空间大气环境最为重要的气象参数之一,其三维分布的精确测量对于研究大气热力学结构、物质密度以及能量分布及其时空变化具有重要的科学价值^[1]。此外,中高层空间是“海陆空天电”五位一体战场与国家空天安全的重要组成部分,准确探测中高层大气温度场,能够提高中长期高层大气天气预报的准确性,提升各种航天器的发射与再入过程的安全性,为航空航天和国防安全提供保障^[2]。

中间层顶-低热层区域(90~140 km)是中高层大气中探测较少的空间区域^[3]。激光雷达等地基探测设备可以对中高层大气进行长时间的连续探测,气象火箭也可以提供很高空间分辨率的中高层大气温度廓线。但上述探测手段均具有难以克服的局限性,即只能探测特定区域上空的中高层大气的垂直分布,无法获得全球温度的分布情况^[4]。

卫星遥感技术不受天气与地理情况的限制,能够在全球大尺度条件下进行全天候长期观测,是获取全球中高层大气温度三维分布及时空演化的重要探测手段。1991年,高层大气研究卫星(UARS)上搭载的风成像干涉仪(WINDII)与高分辨率多普勒成像仪

(HRDI)通过观测大气中 O₂ 分子及 O 原子的气辉辐射谱线,测量了 10~120 km 和 75~320 km 区域的温度廓线,其探测精度分别达 7 K 与 20~75 K^[5]。2001年,热层-电离层-中层能量学和动力学卫星(TIMED)上搭载的宽带辐射大气测量仪(SABER)通过探测 CO₂ 分子在 4.3 μm 与 15 μm 波段的辐射光谱,反演得到 15~110 km 区域的温度信息,其在中间层顶(100 km)附近的温度误差为 ±2 K,但在 110 km 以上,由于信号强度减小以及非局域热力学平衡(non-LTE)效应加剧,温度反演误差迅速增大^[6]。WINDII、HRDI 以及 SABER 为探测中高层大气温度场分布作出了重大贡献,但对于中间层顶-低热层区域,尚存在空间覆盖不全或探测精度低等问题。

2019年10月,美国 NASA 发射的电离层连接探索卫星(ICON)上搭载的迈克耳孙全球高分辨率热层成像干涉仪(MIGHTI),使用 5 个离散波长(754.1、760.0、762.8、765.2、780.1 nm)通道对 O₂-A 波段的辐射强度进行测量,并获得连续 3 年的观测数据^[7]。

本文利用 MIGHTI 近红外通道的 O₂-A 波段气辉观测数据,实现中间层顶-低热层区域的大气温度廓线反演。首先,介绍了 ICON 卫星的数据产品以及利用 O₂-A 波段气辉观测数据反演大气温度的原理与方法;

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2022-11-29; 录用日期: 2022-12-12; 网络首发日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(41975039,61705253)、山东省自然科学基金(ZR2021QD088)、山东省高校青年创新技术项目(2021KJ008)

通信作者: heweiwei@ytu.edu.cn

其次,通过与 SABER 的观测结果以及大气模式的仿真结果对比,验证 MIGHTI 温度廓线反演的准确性;最后,分析了系统的不确定性并得出温度的误差廓线。

2 数据产品及反演方法

2.1 MIGHTI/ICON 卫星数据产品

2019 年美国 NASA 发射了 ICON 卫星,旨在研究高层大气和空间环境之间的物理联系,其上搭载了 MIGHTI、极紫外光谱仪(EUV)、粒子速度计(LVM)、

远紫外成像光谱仪(FUV) 4 个主要载荷。其中 MIGHTI 用来测量全球中高层大气的风场和温度场三维分布及时空演化信息。MIGHTI 使用两个指向地球的垂直视场进行临边扫描,通过观察 630.0 nm [O(¹D→³P)] 与 557.7 nm [O(¹S→¹D)] 波长处氧原子红线与绿线的多普勒频移,反演得到 90~300 km 的风速廓线信息;通过测量 O₂-A 波段气辉的辐射光谱形状,得到 90~140 km 区域的温度廓线信息^[8]。MIGHTI 载荷的任务及参数见表 1。

表 1 MIGHTI 载荷任务及参数^[7]
Table 1 MIGHTI scientific tasks and parameters^[7]

Parameter	Target source	Altitude /km	Vertical resolution /km	Horizontal resolution /km
Wind speed	630.0 nm O atom red line airglow	Daytime: 90-170 Night: 210-300	Daytime: 5 Night: 30	500
	557.7 nm O atom green line airglow	Daytime: 170-300 Night: 90-105	Daytime: 30 Night: 5	
Temperature	762 nm O ₂ -A band near-infrared airglow	Daytime: 90-140 Night: 90-108	5	500

MIGHTI 通过 5 个通道对 O₂-A 波段信号进行采样:中间的 3 个光谱通道(760.0、762.8、765.2 nm)对于大气温度变化十分敏感,通过测量该波长范围内 A 波段信号的光谱形状,可以反演大气温度;通过两翼的光谱通道得到背景信号,并在测得的信号强度中减去背景信号,以进一步减小温度的反演误差^[9]。MIGHTI 测量的 O₂-A 波段近红外气辉的 5 个光谱通道的信号图像如图 1 所示。

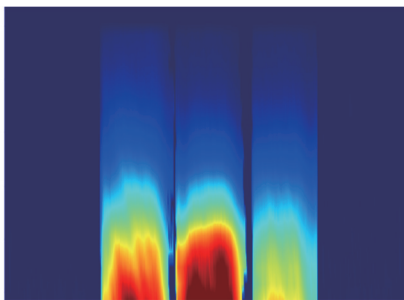


图 1 MIGHTI 的 5 个光谱通道测得的 O₂-A 波段的气辉辐射信号图像

Fig. 1 O₂-A band airglow radiation signal image measured by five spectral channels of MIGHTI

2.2 MIGHTI 温度测量原理

O₂ 分子在 762 nm 波段的 A 带近红外气辉是由第二激发态到基态的基频振动跃迁产生的,即 O₂(b¹Σ_g⁻, v'=0 → X³Σ_g⁻, v'=0)。该光谱带分为双 R 支和双 P 支共 4 支分转动带,共包含约 50 条转动谱线。每条谱线的相对气辉辐射强度受温度影响,服从玻尔兹曼分布。图 2 中的五角星与圆点线型分别显示了温度为 100 K 与 400 K 时 O₂-A 波段的转动辐射光谱的分

布情况。可以看到,当温度升高时,波段中心的辐射强度降低,两翼的强度增加。因此,利用 O₂-A 波段光谱形状随温度的变化关系,可以反演得到大气温度廓线。图 2 还展示了利用 MIGHTI 提取的 O₂-A 波段气辉光谱形状的 B、C、D 3 个信号通道的滤光片透射谱型。这 3 个滤光片的透射带宽均约 2 nm,其中心波长分别位于 O₂-A 波段气辉光谱温度最敏感的区域。

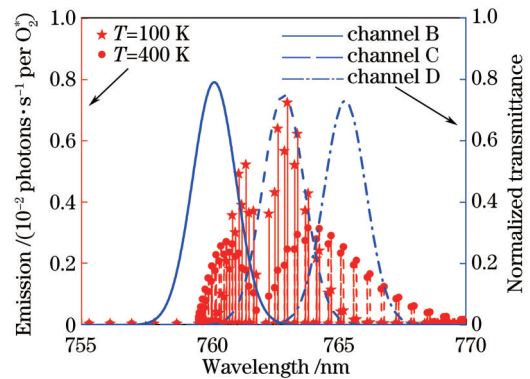


图 2 O₂-A 波段的气辉辐射光谱特征的温度敏感性以及 MIGHTI 的 B、C、D 采样通道的滤光片透射函数

Fig. 2 Temperature sensitivity of spectral characteristics of airglow radiation in O₂-A band and filter transmission functions of B, C, and D sampling channels of MIGHTI

图 3(a)所示为 B、C 和 D 3 个光谱通道测量的 O₂-A 波段气辉辐射的相对强度随温度的变化关系。可以看到,B、D 通道的信号强度随温度的升高而增大,C 通道情况正好相反。具有不同温度响应的信号通道的比值不受气辉体辐射率的影响,且随温度单调变化,因而可以通过测量通道信号强度比值实现大气温度的精确

反演。图 3(b)所示为 B/C 及 D/C 通道强度比值随温

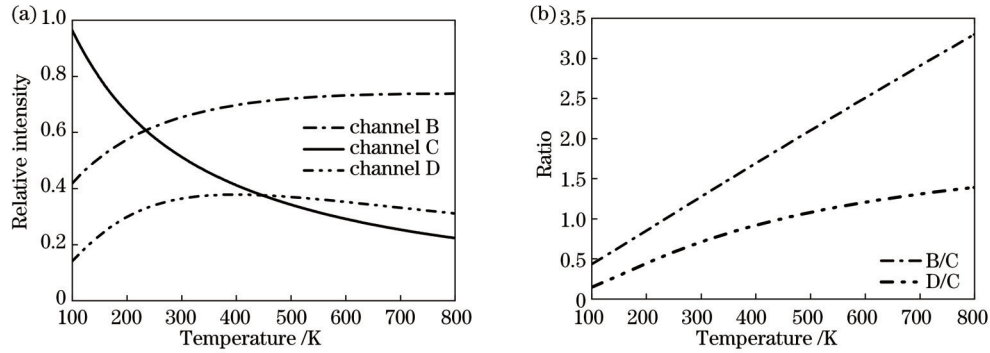


图 3 MIGHTI 的 B、C、D 采样通道的相对强度及其比值随温度的变化关系。(a) B、C、D 通道相对强度与温度的关系；(b) B/C 与 D/C 通道组合相对强度比值与温度的关系

Fig. 3 Relationship between relative intensity and its ratio of B, C, and D sampling channels of MIGHTI and temperature. (a) Relationship between relative intensity and temperature of B, C, and D channels; (b) relationship between relative intensity ratio of B/C and D/C channel combinations and temperature

2.3 剥洋葱算法

对于临边观测模式,卫星载荷直接测得的信号是视线方向上辐射量沿路径的积分值。从最高切点处开始,采用自上而下的处理方式逐一剥除其他层信号的干扰,提纯目标层信号的反演方法为剥洋葱算法,它是一种经典的物理求解方法。

由于 90 km 以上大气层的氧分子数密度降低, O_2 -A 波段的自吸收作用可以忽略不计,因此视线方向上的辐射总强度^[10]可以表示为

$$B(v, Z_t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(s) S(s) D(v, s) ds, \quad (1)$$

式中: s 为视线路径; η 为气辉体发射率; D 为多普勒线型。

在实际的临边模式观测中,各光谱通道图像(图 1)的每一行信号都来自不同的大气层,而每个大气层的风速、温度、体发射率都是不同的^[11]。因此,无论是正演仿真,还是反演算法,都需要考虑视线方向上各大气层参数的影响。将 MIGHTI 的 CCD 第 m 行视场观察到的光谱强度定义为 $I_{k,m}^{\text{obs}}$, 该强度可以被写成沿该行视线的积分^[8], 即

$$I_{k,m}^{\text{obs}} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} R(v, h) \cdot F_k(v) dv ds, \quad (2)$$

式中: $R(v, h)$ 为 h 高度下的辐射光谱; $F_k(v)$ 为第 k 个光谱通道的滤光片透射函数; v 为波数。

剥洋葱算法的实施前提是大气分布呈球形对称,即同高度层大气在被观测区域内对纬度和经度的依赖可以忽略不计。通过将切线高度的光谱作为未知数来离散这个问题,可将式(2)中的积分近似为一个求和,即

$$B_m^{\text{obs}}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \int_0^{\infty} R_{mn}(v) \cdot F_k(v) W_{mn} dv, \quad (3)$$

式中: n 为大气层的数量; 函数 $B_m^{\text{obs}}(k)$ 为离散化后 CCD 第 m 行的视场所观察到的光谱强度; W_{mn} 为由求

度的变化关系。

和规则决定的权重。

式(3)中的非线性方程组可以通过剥洋葱算法进行求解: 顶部高度的温度由于没有其他层的贡献,可以直接从顶部临边测量中获得; 从第二层测量值中去除顶部高度的贡献,可以得到第二层的温度分布; 以此类推,可得到其他各层的温度分布。在数学上,这种反演可以写成

$$\begin{cases} V_0(k) = \frac{1}{\omega_{00}} B_{00}(k) \\ V_m(k) = \frac{1}{\omega_{mm}} \left[V_m(k) - \sum_{n=0}^{m-1} V_n(k) \omega_{mn} \right] \end{cases}, \quad (4)$$

反演从 $m=0$ 开始,迭代进行。

图 4(a)显示了由 MIGHTI 的 5 个光谱通道观测的沿视线方向 O_2 -A 波段气辉路径积分的相对辐射强度。采用剥洋葱算法对视线方向上的临边观测强度信号进行处理,可以得到目标层相对强度,如图 4(b)所示。假设临边观测模型关于地球中心呈球对称分布,且视线不存在吸收效应。可以看到, B、C、D 3 个通道内目标层的相对强度分布随高度变化不一致,这些差异随高度的变化蕴含着大气温度的廓线信息。

2.4 温度反演方法

如 2.2 节所述, B/C 及 D/C 通道强度比值随温度单调变化,可以用来反演大气温度信息。根据图 3(b)所示的通道比值与温度的变化关系,可以拟合得到

$$\begin{cases} T_{B/C} = 243.5 R_{B/C} - 9.75 \\ T_{D/C} = 106.4 \exp(1.44 R_{D/C}) - 123 \exp(-8.49 R_{D/C}) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $R_{B/C}$ 与 $R_{D/C}$ 分别为 B/C 通道组合和 D/C 通道组合使用剥洋葱算法得到的相对强度比值; T 为反演得到的大气温度。

根据图 4 所示的采用剥洋葱算法获得的 B、C、D 通道目标层的相对强度,结合式(5)给出的强度比值与

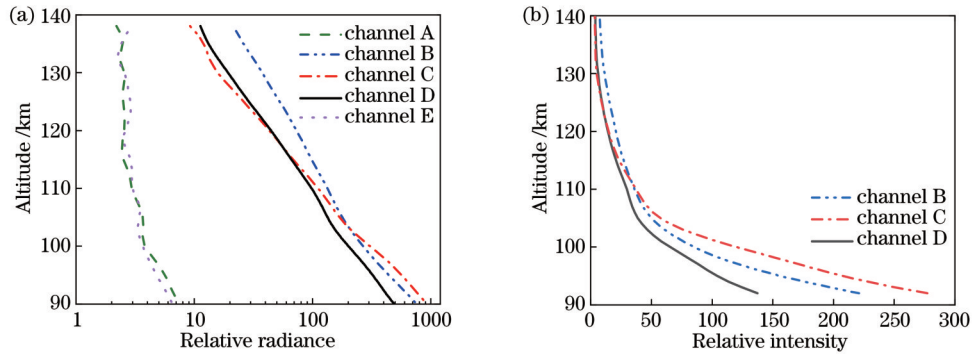


图 4 MIGHTI测得的 O_2 -A 波段气辉路径积分的相对辐射强度以及利用剥洋葱算法提取的目标层的相对强度。(a)沿视线方向的 O_2 -A 波段气辉的相对辐射强度;(b)B、C、D 3 个信号通道目标层的相对强度

Fig. 4 Relative radiance of path integral of O_2 -A band airglow measured by MIGHTI and relative intensity of target layer extracted by onion peeling algorithm. (a) Relative radiance of O_2 -A band airglow along the line of sight; (b) relative intensity of target layer for three signal channels B, C, and D

温度的函数关系,即可反演得到大气温度廓线信息。

3 MIGHTI 的温度反演验证

为评估 MIGHTI 温度反演结果的合理性与可靠性,从实测数据和大气模式两个方面对 MIGHTI 的反演结果进行对比验证。实测验证采用 SABER 的观测数据,将 MIGHTI 反演的温度结果与相近位置 and 对应时段的 SABER 温度产品进行对比;在与大气模式的对比中,通过与大气模式在 MIGHTI 的覆盖范围的对比,验证了 MIGHTI 在全球尺度上的反演可靠性。根据全年中高层大气温度变化特点,分别选取 4 个季节中的一天内的 MIGHTI 数据,并将其与相应时段的 SABER 数据结合起来反映 MIGHTI 全年探测的反演情况。

3.1 MIGHTI 与 SABER 的对比

2001 年发射的 TIMED 卫星上搭载的 SABER 采用临边观测模式对平流层到低热层大气进行扫描,利用 $4.3 \mu\text{m}$ 与 $15 \mu\text{m}$ 的 CO_2 辐射信号可以反演 15~110 km 区域的温度信息,精度约为 $\pm 2 \text{ K}$ (100 km 处),高度分辨率为 2 km,可以用来验证 MIGHTI 的温度反演结果。

MIGHTI 和 SABER 是两个独立运行的航天器,时空交汇的概率比较低。图 5 绘制了 2021 年 1 月 1 日当地时间 7 时与 4 月 24 日当地时间 6 时, MIGHTI 和 SABER 的温度廓线的测量结果,两台仪器相近位置的数据点已在图中标注。可以看出, SABER 与 MIGHTI 的温度反演结果在 92~100 km 表现出较好的一致性,证明 MIGHTI 在该区域的温度反演结果具有合理性。随着高度增加, MIGHTI 与 SABER 的温度廓线之间的差异愈加明显,这是因为 SABER 利用 CO_2 振动带辐射信号反演大气温度,而 CO_2 分子在 100 km 以上的中层与低热层处于 non-LTE 状态,导致 SABER 的温度反演误差较大。从图 5(b) 可以看到, 130 km 以上温度反演结果存在异常现象,这可能是因

为该区域存在 N_2 1Pg 3-1 波段的气辉辐射,其与 O_2 -A 波段的气辉光谱区域重叠,导致光谱信号受到污染^[12]。

3.2 MIGHTI 与大气模式的对比

ICON 卫星轨道的倾角为 27° , 搭载在 ICON 上的 MIGHTI 可在 12°S 和 42°N 之间提供昼夜覆盖的温度测量。为研究 MIGHTI 探测纬度范围内中高层区域的大气温度分布,在纬向上以 4° 为间隔,绘制出 12°S ~ 42°N 的纬向温度分布,并与大气模式的仿真结果进行对比。

图 6 所示为 2021 年 1 月 8 日 MIGHTI 观测到的温度分布与大气模式的对比。可以看到:在 130 km 以下的高度范围内, MIGHTI 的探测结果与经验模式的温度分布基本一致;在 130 km 以上,两者的温度分布差异较大。造成该差异的原因主要有:1)海拔越高,大气模式越不准确;2)130 km 以上大气区域存在 N_2 1Pg 3-1 波段的气辉辐射光谱污染,导致 MIGHTI 的温度反演结果不准确。与大气模式的良好一致性验证了 MIGHTI 在全球尺度的温度反演的可靠性。

如 3.1 节所述, MIGHTI 与 SABER 独立运行,时空交汇的数据较少,无法得出统计上连续观测的温度比较结果。为了解决数据采样难的问题,分别获取 MIGHTI 与 SABER 整日连续扫描的大气温度分布,并将每次扫描对应的时间与经纬度输入 NRLMSIS-00 大气模型,而仿真的大气温度分布以模型结果为参考,计算 MIGHTI 与 SABER 的探测温度与模型温度的比值,分别定义为 R_M 与 R_S , 对其进行分析与比较。图 7 所示为 4 个观测日的 92~108 km 的 R_M 与 R_S 值。比较高度的上限设置为 108 km, 是因为 SABER 在该高度以下的测温精度尚可,而比较高度的下限设置为 92 km, 是为了避免 O_2 -A 波段的自吸收效应对 MIGHTI 温度反演产生不良影响。

从图 7 可以看出,在 92~100 km 的高度范围内, MIGHTI 与 SABER 温度比廓线形状比较相似,而且

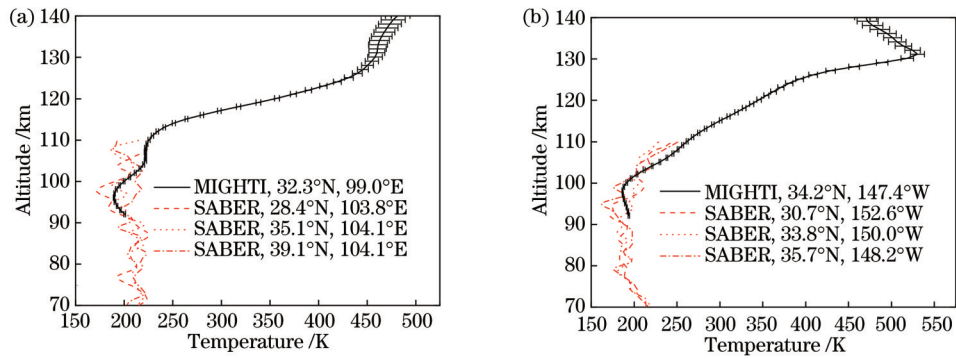


图 5 MIGHTI与SABER在时空交汇时的温度廓线对比,其中MIGHTI线条上的误差棒反映了仪器本身和反演过程中的估计误差。(a)MIGHTI与SABER在2021年1月1日当地时间7时相近位置的温度对比;(b)MIGHTI与SABER在2021年4月24日当地时间6时相近位置的温度对比

Fig. 5 Comparison of temperature profiles between MIGHTI and SABER at similar geographical locations. The error bar on MIGHTI line reflects the estimation error of the instrument and the retrieval process. (a) Temperature comparison between MIGHTI and SABER at close positions at 7:00 local time on January 1, 2021; (b) temperature comparison between MIGHTI and SABER at 6:00 local time on April 24, 2021

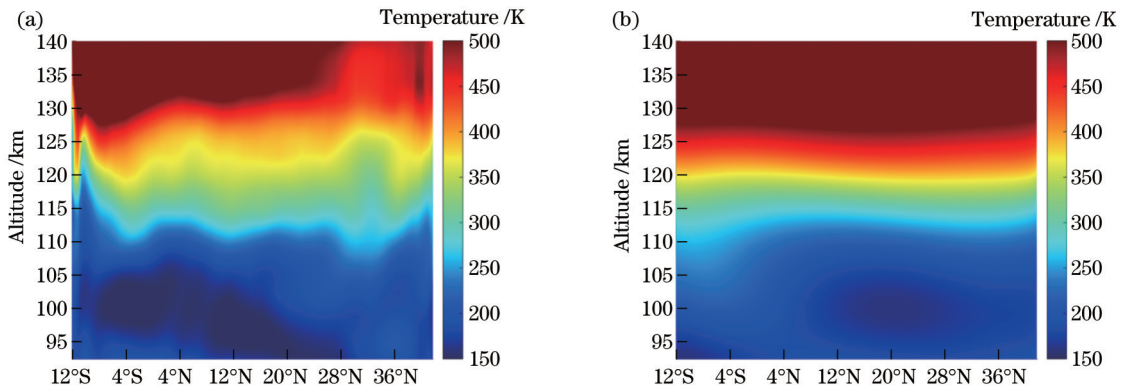


图 6 MIGHTI与大气模式在12°S~42°N的温度对比。(a)12°S~42°N MIGHTI中间层顶-低热层的温度分布;(b)12°S~42°N大气模式中间层顶-低热层的温度分布

Fig. 6 Temperature comparison between MIGHTI and atmospheric model at 12°S-42°N. (a) Temperature distribution of 12°S-42°N of mesosphere-lower thermosphere obtained by MIGHTI; (b) temperature distribution of 12°S-42°N of mesosphere-lower thermosphere obtained by atmospheric model

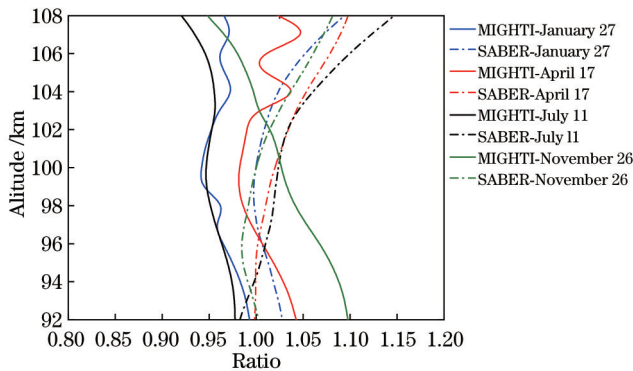


图 7 2021年的4个观测日MIGHTI和SABER与相应大气模式的温度比值随高度的变化关系

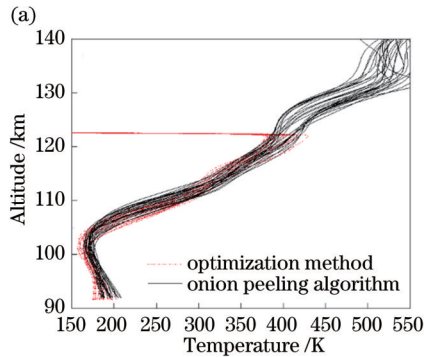
Fig. 7 Variation of the ratio of MIGHTI and SABER to corresponding atmospheric model temperature with altitude in four days in 2021

都非常接近1,这表明MIGHTI与SABER在该高度范围都具有很高的温度测量精度。在100 km以上,SABER的探测温度比值逐渐偏离1,在108 km处SABER的探测温度比大气模式高出10%;相比而言,MIGHTI与大气模式的偏离现象并不明显。该趋势与前文的分析结果相印证,即在100 km以上,SABER的温度反演结果存在较大误差,而对于MIGHTI,其温度反演误差较小的原因主要有:1)O₂-A波段在该区域的辐射信号非常强,MIGHTI的信噪比相对较高;2)在低温情况下,O₂-A波段的光谱形状对温度非常敏感,可进一步提高其温度反演精度。因此,在100 km以上,尽管MIGHTI探测的温度存在波动,但其温度廓线与大气模式更为接近。此外,还可从图7中观察到,MIGHTI在11月份的温度廓线偏差相对较大,这是因为O₂-A波段气辉是由光化学反应产生的^[13],冬季时太阳日照强度弱,导致气辉强度低,这就使得

MIGHTI在冬季时的反演误差相对较大。

3.3 剥洋葱算法与最优化算法的对比

为了进一步评估剥洋葱算法反演大气温度廓线的合理性,将其与ICON团队采用最优化算法获得的温度廓线进行对比。两种反演方法根据MIGHTI于2021年1月8日当地时间14时采集的近红外氧气气辉图像数据绘制的温度廓线如图8(a)所示。可以看到,在O₂-A波段气辉信号较强的92~122 km高度范围内,两种方法反演得到的温度廓线具有较好的一致性,验证了剥洋葱温度反演算法的可靠性。随着高度的上升,O₂-A波段气辉强度降低,使得MIGHTI采样通道



的信噪比降低。在低信噪比情况下,最优化算法难以收敛,导致其反演精度较差,因此ICON团队未提供122 km高度以上的温度廓线反演结果。剥洋葱算法在信噪比较低的情况下依然能够反演温度廓线,基本可以覆盖MIGHTI近红外通道的探测高度范围(92~140 km)。图8(b)所示为剥洋葱算法与最优化算法根据2021年1月8日当地时间8—18时MIGHTI探测数据反演得到的温度廓线相对误差随时间的变化。可以看出,在最优化算法能够反演的高度范围内,两种方法反演的温度值相差较小,在±5%以内,进一步验证了剥洋葱算法反演温度的合理性。

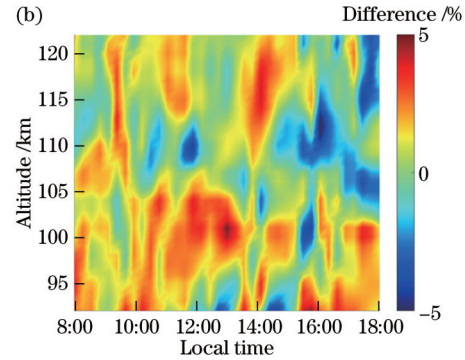


图 8 剥洋葱算法与最优化方法得到的温度对比。(a)2021年1月8日当地时间14时的温度廓线对比;(b)2021年1月8日当地时间8—18时的温度相对误差随时间的变化

Fig. 8 Temperature comparisons between the onion peeling algorithm and the optimization method. (a) Comparison of temperature profiles at 14:00 local time on January 8, 2021; (b) variation of relative temperature error with time from 8:00 to 18:00 local time on January 8, 2021

4 MIGHTI的温度反演验证

4.1 MIGHTI温度内禀稳定性验证

MIGHTI测温的主要误差来源之一是5个光谱通道滤光片因温度波动导致的中心波长漂移效应。由于B/C通道组合与D/C通道组合的温度敏感性受滤光片中心波长漂移的影响正好相反,将两通道组合进行协同反演,可以在一定程度上消除滤光片中心波长漂移效应的影响。

利用MIGHTI的两个相互正交视场分别测得的O₂近红外气辉强度信号,独立反演相同经纬度坐标的大气温度廓线,可以验证MIGHTI温度反演结果的内禀稳定性。如前所述,MIGHTI使用两个独立分析的视场进行临边观测,两个视场相互正交,随着卫星的运动,相隔约7 min以后,后时刻的后向视场会与前时刻的前向视场在空间上相互交叠。由于时间间隔较短,大气状态一般不会发生较大变化,因此两次测量反演得到的大气温度廓线应该具有较好的一致性。图9为使用STK软件模拟的MIGHTI运行轨迹以及两个视场临边观测的示意图。

图10显示了MIGHTI在2021年1月17日11时两个视场相隔7 min时反演得到的温度。可以看到,两

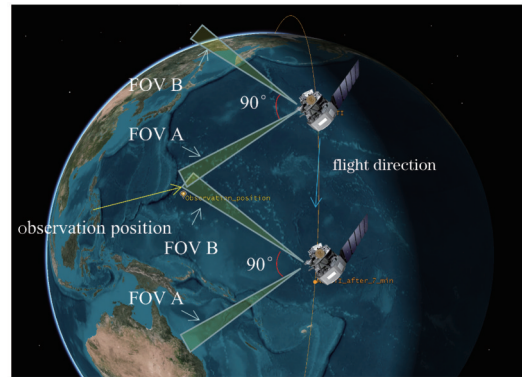


图 9 MIGHTI两个视场临边观测示意图
Fig. 9 Limb-viewing schematic of two field of view (FOV) in MIGHTI

个视场的温度呈现较为一致的变化趋势,两个视场的温度拟合近似为Y=X的一次函数,证明了MIGHTI温度反演的内禀稳定性较好。

4.2 MIGHTI的温度误差

MIGHTI的温度测量误差主要由B、C、D 3个光谱通道的信噪比决定,即

$$R_{SN} = \frac{I_{Intensity}}{N}, \quad (6)$$

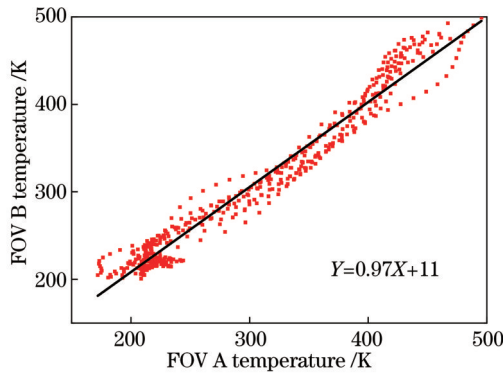


图 10 MIGHTI 两个视场的温度反演结果

Fig. 10 Temperature inversion results for two FOVs of MIGHTI

式中: $I_{\text{Intensity}}$ 为目标层的信号强度; N 为 MIGHTI 仪器 CCD 的探测噪声。

暗噪声 N_d 是由 CCD 基底材料热激发效应引入的不确定性噪声, 其电子数服从泊松分布且依赖于器件的工作温度, MIGHTI 载荷中 CCD 被冷却至 $-45\text{ }^\circ\text{C}$, 从而将暗噪声降低至 $0.01\text{ electron}/(\text{s}\cdot\text{pixel})$ 以内; 读出噪声 N_r 是 CCD 将每个像素的电荷读出并转换为数值时产生的噪声, MIGHTI 通过像元合并降低图像的分辨率, 以缩短需要数字化的像素和图像的读取时间, 使得读出噪声控制在 $6\text{ electron}/(\text{s}\cdot\text{pixel})$ 水平; 散粒噪声, 亦称光子噪声, 是由 CCD 入射光子到达时间的随机性引起的具有统计性特征的噪声, 其噪声水平 N_p 服从高斯分布, 且与信号强度 I_{Radiance} 有关:

$$N_p = \sqrt{I_{\text{Radiance}}} \quad (7)$$

需要注意的是, I_{Radiance} 为 MIGHTI 临边观测视线上的信号强度, 而 MIGHTI 采样通道的信噪比中的信号强度 $I_{\text{Intensity}}$ 由目标层的强度值决定。

根据噪声叠加原理, MIGHTI 载荷近红外通道的总噪声水平可以表示为

$$N = \sqrt{N_d^2 + N_r^2 + N_p^2} \quad (8)$$

在低空空域, $\text{O}_2\text{-A}$ 波段的气辉信号相对较强, 因此相应的散粒噪声也相对较强, 在总噪声中占据主导地位, 读出噪声和暗噪声均可忽略; 在较高空域, 气辉信号相对较弱, 散粒噪声随之减弱, 读出噪声和暗噪声对温度反演结果的影响也随之增大。

根据 MIGHTI 采样通道的信号强度及噪声情况, 基于误差传递原理, 可以计算出 MIGHTI 的温度反演误差, 其表达式为

$$\begin{cases} \Delta T_{\text{B/C}} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{\text{B/C}}}{\partial I_{\text{B}}} \cdot \Delta I_{\text{B}}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{\text{B/C}}}{\partial I_{\text{C}}} \cdot \Delta I_{\text{C}}\right)^2} \\ \Delta T_{\text{D/C}} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{\text{D/C}}}{\partial I_{\text{D}}} \cdot \Delta I_{\text{D}}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{\text{D/C}}}{\partial I_{\text{C}}} \cdot \Delta I_{\text{C}}\right)^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\frac{\partial T}{\partial I}$ 为温度对两通道组合相对强度的偏导数; ΔI 为两通道组合相对强度的改变值。

由式 (9) 可知, MIGHTI 的温度误差 ΔT 是由 MIGHTI 测温通道内信号强度的不确定性 ΔI 产生的, 其不确定性主要由上述 3 种噪声引起。MIGHTI 使用两通道组合联合反演大气温度, B/C 通道组合与 D/C 通道组合反演温度的综合误差的计算公式为

$$1/\sigma = \sqrt{\frac{1}{(\Delta T_{\text{B/C}})^2} + \frac{1}{(\Delta T_{\text{D/C}})^2}} \quad (10)$$

根据上述理论, 可以计算得到 MIGHTI 的温度误差廓线, 如图 11 所示。可以看出: MIGHTI 的温度误差随着海拔的增加而增大; 在 92 km 附近, 温度误差最小, 为 1 K; 在 140 km 处, 温度反演误差最大, 为 13 K。这是因为 $\text{O}_2\text{-A}$ 波段气辉的信号强度随观测高度的增加而减小, 使得通道信噪比相应降低。此外, 根据图 3 (b) 所示的通道比值与温度的数值关系, D/C 通道比值的温度敏感性会随温度的增加而降低, 这进一步导致了 MIGHTI 的温度反演精度随高度增加而降低的结果。

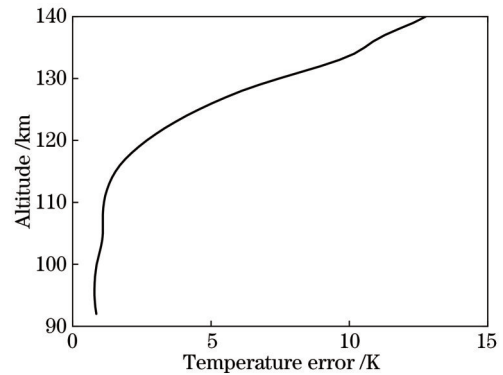


图 11 MIGHTI 反演的温度误差

Fig. 11 Temperature error of MIGHTI

5 结 论

利用临边观测模式的剥洋葱反演方法, 对 MIGHTI 测量的 $\text{O}_2\text{-A}$ 波段气辉反演得到了中间层顶-低热层区域的大气温度廓线。通过与 SABER 卫星的观测结果及 NRLMSIS-00 大气模型的仿真数据的对比, 验证了 MIGHTI 温度反演的可靠性与合理性。

通过测量 $\text{O}_2\text{-A}$ 波段气辉辐射光谱的形状, MIGHTI 能够探测 92~140 km 高度范围的大气温度廓线, 其测量范围可有效覆盖中间层顶-低热层这一空间区域。MIGHTI 的温度误差随着海拔的增加而增大; 在海拔为 92 km 处, 其温度误差最小, 为 1 K; 在海拔为 140 km 处, 其温度反演误差最大, 为 13 K。MIGHTI 在海拔 130 km 以上受 $\text{N}_2\text{ 1Pg 3-1}$ 气辉光谱干扰, 可能会出现结果异常现象。

MIGHTI在中高层大气廓线探测方面的优越性能,表明其具有巨大的科学价值和重要工程意义,将成为研究低热层这一物理与化学过渡区域的温度遥感的有力工具,并有助于促进对中间层与低热层耦合机制的理解。在未来的工作中,将重点解决MIGHTI在95 km以下区域的受自吸收效应影响以及在130 km以上受 N_2 1Pg 3-1光谱污染影响两个技术难题,开发一种消除自吸收效应和光谱污染影响的反演算法,以提高MIGHTI的温度反演精度。

致谢 感谢MIGHTI研究团队在一级产品数据以及SABER团队在二级产品数据等方面提供的支持;感谢加拿大纽布朗什维克大学Wang Dingyi教授在气辉辐射传输理论方面给予的帮助;感谢中国科学院西安光学精密机械研究所光谱成像技术重点实验室冯玉涛研究员在仪器概念方面的指导。

参 考 文 献

- [1] 黄鹏宇, 郭强, 韩昌佩, 等. FY-4A/GIIRS资料云上温度廓线反演研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1701002.
Huang P Y, Guo Q, Han C P, et al. Research on retrieval of temperature profile on cloud based on FY-4A/GIIRS data[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1701002.
- [2] 高飞, 黄波, 石冬晨, 等. 全天时大气温度探测的纯转动拉曼激光雷达系统设计与仿真[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0301004.
Gao F, Huang B, Shi D C, et al. Design and simulation of pure rotational Raman lidar system for daytime detection of atmospheric temperature[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0301004.
- [3] Huang T Y, Vanyo M. Trends in the airglow temperatures in the MLT region: part 2: saber observations and comparisons to model simulations[J]. Atmosphere, 2021, 12(2): 167.
- [4] 于思琪, 刘东, 徐继伟, 等. 激光雷达反演大气边界层高度的优化方法[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0728002.
Yu S Q, Liu D, Xu J W, et al. Optimization method for planetary boundary layer height retrieval by lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0728002.
- [5] Reber C A. The upper atmosphere research satellite (UARS)[J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20(12): 1215-1218.
- [6] Liu X, Xu J Y, Yue J, et al. Global balanced wind derived from SABER temperature and pressure observations and its validations[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(12): 5643-5661.
- [7] Englert C R, Harlander J M, Brown C M, et al. Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI): instrument design and calibration[J]. Space Science Reviews, 2017, 212(1): 553-584.
- [8] Harlander J M, Englert C R, Brown C M, et al. Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI): monolithic interferometer design and test[J]. Space Science Reviews, 2017, 212(1): 601-613.
- [9] Stevens M H, Englert C R, Harlander J M, et al. Retrieval of lower thermospheric temperatures from O_2 A band emission: the MIGHTI experiment on ICON[J]. Space Science Reviews, 2018, 214(1): 4.
- [10] Wu K J, He W W, Feng Y T, et al. Effect of OH emission on the temperature and wind measurements derived from limb-viewing observations of the $1.27 \mu m$ O_2 dayglow[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13(4): 1817-1824.
- [11] He W W, Wu K J, Feng Y T, et al. The radiative transfer characteristics of the O_2 infrared atmospheric band in limb-viewing geometry[J]. Remote Sensing, 2019, 11(22): 2702.
- [12] Slinger T G, Pejaković D A, Kostko O, et al. Atmospheric dayglow diagnostics involving the O_2 ($b-X$) atmospheric band emission: global Oxygen and Temperature (GOAT) mapping[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2017, 122(3): 3640-3649.
- [13] Yee J H, Demajistre R, Morgan F. The $O_2(b^1\Sigma)$ dayglow emissions: application to middle and upper atmosphere remote sensing[J]. Canadian Journal of Physics, 2012, 90(8): 769-784.

Retrieval and Verification of Mid-Upper Atmospheric Temperature from MIGHTI/ICON Satellite

Hu Xiangrui¹, Li Faquan², Wang Houmao³, Zhang Zihao¹, Guo Jianjun¹, Wu Kuijun¹,
He Weiwei^{1*}

¹School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, Shandong, China;

²Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China;

³National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract

Objective The mesosphere-lower thermosphere (MLT) region is an important space region in the earth's atmosphere. As a significant parameter of atmospheric thermodynamics in the MLT region, the temperature is of great academic significance and application value. Since it is not affected by weather and geographical conditions, satellite-borne temperature detection can perform all-weather and long-term observation on a global scale. Thus, it becomes an important detection method to obtain the three-dimensional distribution and spatio-temporal evolution in the mid-upper atmospheric

temperature. Previous satellite payloads, such as the wind imaging interferometer (WINDII) and the high-resolution Doppler interferometer (HRDI) on the UARS satellite, and the sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry (SABER) on the TIMED satellite, have made contributions to the distribution detection of the mid-upper atmospheric temperature field. However, the MLT region still suffers from problems including incomplete space coverage or low detection accuracy. In October 2019, the Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI) on NASA's ionospheric connection (ICON) explorer measured the radiation intensity of the O₂-A band through five discrete wavelength channels and obtained three years of continuous observation data. Based on the onion peeling algorithm and the theory of the O₂-A band airglow spectrum, this paper retrieves the atmospheric temperature profile in the 92–140 km area via the O₂-A band airglow radiation intensity measured by MIGHTI. In addition, comparisons with the observation results of the SABER satellite, the simulation data of the NRLMSIS-00 atmospheric model, and the temperature product of MIGHTI obtained by the ICON team using an optimization algorithm are conducted systematically to verify the rationality of MIGHTI temperature retrieval.

Methods The relative radiation intensity of each spectral line in O₂-A band airglow which follows the Boltzmann distribution is affected by temperature. MIGHTI samples the O₂-A band signal through five channels, and the strength of signals in the B and D channels increases with the rising temperature, whereas the strength of the signal in channel C is just the opposite. The ratio of signal channels with different temperature responses is independent of the emission rate, and also changes monotonously with the temperature. Therefore, the atmospheric temperature can be accurately retrieved by measuring the ratio of channel signal strengths. The relative radiance of O₂-A band on the line of sight obtained from the limb-viewing observation of MIGHTI is stripped by the onion peeling algorithm to obtain the relative intensity of the target layer. Then, according to the relative intensity of the target layer of channels B, C, and D, the atmospheric temperature profile information is retrieved through combining the functional relationship between the channel strength ratio calculated by the MIGHTI instrument parameters and the temperature.

Results and Discussions To evaluate the rationality and reliability of the MIGHTI temperature retrieval results obtained by the onion peeling algorithm, this paper verifies the MIGHTI retrieval results by comparing the measured data of SABER and simulation data of atmospheric model NRLMSIS-00. The results show that MIGHTI temperature retrieval is in good agreement with SABER at 92–100 km, and the temperature distribution of MIGHTI is basically consistent with that of the empirical model in the altitude range below 130 km, which shows the overall retrieval reliability of MIGHTI on a global scale. According to the characteristics of annual mid-upper atmospheric temperature changes, the detected temperature ratio of MIGHTI and SABER to the model temperature is calculated in one day of four seasons respectively. In the altitude range of 92–100 km, the temperature ratio profiles of MIGHTI and SABER are similar and very close to 1, which proves that MIGHTI has a strong temperature retrieval rationality in this altitude range. It is also compared with the temperature profile obtained by the optimization algorithm adopted by the ICON team to further evaluate the rationality of the onion peeling algorithm for retrieving MIGHTI temperature. Within the height range that can be retrieved by the optimization algorithm, the difference between the temperature values retrieved by the two algorithms differs slightly within $\pm 5\%$, which further verifies the rationality of the temperature retrieval by the onion peeling algorithm.

Conclusions The O₂-A band airglow measured by MIGHTI is retrieved and the atmospheric temperature distribution in this region is calculated by the onion peeling algorithm. By comparing the observation results of the SABER satellite, the NRLMSIS-00 atmospheric model data, and the MIGHTI temperature products obtained by the ICON team using the optimization method, the paper verifies the reliability and rationality of MIGHTI temperature retrieval. By measuring the shape of the O₂-A band airglow radiation spectrum, MIGHTI can detect the atmospheric temperature profile between 92–140 km, which covers the MLT area effectively. The minimum temperature error is 1 K at 90 km, and the maximum temperature retrieval error is 13 K at 140 km.

Key words atmospheric optics; temperature retrieval; airglow radiation; limb-viewing; onion peeling algorithm