

## 基于大气廓线合成背景的目标气云透过率反演\*

胡运优<sup>1)2)</sup> 徐亮<sup>1)†</sup> 沈先春<sup>1)</sup> 束胜全<sup>1)2)</sup> 徐皖焱<sup>1)2)</sup>  
 邓亚颂<sup>1)2)</sup> 徐寒扬<sup>1)</sup> 刘建国<sup>1)</sup> 刘文清<sup>1)</sup>

1) (中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽光学精密机械研究所, 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学, 合肥 230026)

(2022年8月22日收到; 2022年11月21日收到修改稿)

天空向下热红外辐射具有随时空变化而变化的特性, 当扫描傅里叶变换红外遥测成像系统以天空为背景对目标气云进行成像扫描时, 各扫描像素对应的背景辐射差异较大且没有恒定的基线, 因而影响目标气云透过率的精确反演. 针对这类问题, 提出了基于大气廓线合成背景的目标气云透过率反演方法, 首先采用实测地点的温度、湿度、压强和臭氧廓线及大气模式生成天空红外背景, 以解决化工园区内难以实时测量纯净天空红外背景谱的问题, 其次验证了天空红外背景与天顶角余弦逐波数存在连续可导的关系, 使得少量具有天顶角梯度的天空红外背景即可快速插值生成任意仰角位置的天空红外背景谱. 本文以中分辨率大气辐射传输模型 (MODTRAN) 软件仿真和 SF<sub>6</sub> 气体的遥测成像实验进行了方法验证, 所提方法可以快速生成梯度仰角内任意角度对应的天空红外背景谱, 准确反演出各扫描像素的目标气云透过率, 反演得到的 SF<sub>6</sub> 柱浓度气云分布与实际分布一致, 相关性达到 0.99979.

**关键词:** 傅里叶变换红外光谱, 合成背景, 透过率反演, 气云扫描成像

**PACS:** 32.30.Bv, 98.70.Vc, 07.57.Ty, 42.30.-d

**DOI:** 10.7498/aps.72.20221670

## 1 引言

扫描傅里叶变换红外 (FTIR) 遥测成像技术<sup>[1-3]</sup>是具有空间和光谱维度探测能力的一种新型气体成像技术, 它具有远距离、非接触式采样、高灵敏度和高分辨率等优点, 对于化工园区定点 360 度覆盖式气体泄漏常态化监测具有极大的应用价值. 扫描 FTIR 遥测成像技术在对场景目标成像过程中, 由于仪器架设位置和目标监测区域的高度等因素, 经常出现扫描像素对应的红外背景来自天空辐射, 天空红外背景具有冷空特性, 且各种大气分子具有程辐射累积特征<sup>[4]</sup>, 因此与近地面的被测目标成分有较大的温差, 也使得从实测天空红外辐射中提取目标特征的难度加大.

在扫描 FTIR 遥测成像系统对目标的常态化监测过程中, 获取背景光谱是对目标气体特征提取、识别和定量分析<sup>[5-7]</sup>的前提条件, 目前有多种背景提取方法可供参考或应用. Theriault<sup>[8]</sup>提出了测量同等条件下干净背景谱的方法, 该方法简单有效, 但在复杂场景下的实用性和实时性低. Flanigan<sup>[9]</sup>和 Evans 等<sup>[10]</sup>分别采用中分辨率大气辐射传输模型 (MODTRAN) 和快速大气信息程序 (FASCODE) 并结合测量环境模拟生成了背景光谱, 该方法可确保仿真背景的纯净性, 但仅能模拟低仰角下的天空背景且实时性低. 高闽光等<sup>[11]</sup>提出了测量热烟羽上风口气背景谱的方法, 该方法对时间和空间临近要求很高. Harig 等<sup>[12,13]</sup>认为被测气体特征是线性叠加在背景光谱上的, 通过目标、干扰物和背景基线拟合测量谱来提取气体特征, 这种方法的时间复杂度低, 具有良好的实时性, 但标准光谱仅能够仿真

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41941011, 52027804) 和安徽省重点研发计划 (批准号: 2022m07020009) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xuliang@aiofm.ac.cn

设定的大气状态和观测参数. 焦洋等<sup>[2]</sup>通过实测光谱实时提取背景的方法反演被测污染气体透过率, 该方法只适用于低平天空或对地观测. Li 等<sup>[14]</sup>使用 ECMWF 廓线<sup>[15]</sup>计算低仰角 (小于  $35^\circ$ ) 下各种大气条件的光谱特征, 利用 Lasso 算法<sup>[16]</sup>进行快速特征优选, 选择最优目标与背景组合重构测量光谱, 以提取目标特征, 该方法实时性较高, 然而相比于短时间临近区域的实测背景依然存在较大差异, 此外还需要建立包含各类场景的背景库. 上述背景提取算法对于单点测量或小范围内探测具有良好的效果, 然而对于具有复杂工业环境、大范围成像监测等情况<sup>[17]</sup>适用程度低.

在复杂的化工园区和大范围成像监测前提下, 本文提出了基于大气廓线合成背景的目标气云透过率反演方法, 开展了天空红外背景辐射与天顶角余弦关系的研究, 通过实测地点的温度、湿度、压强和臭氧廓线及大气模式预先生成随天顶角梯度变化的少量天空红外背景辐射, 随后通过逐波数插值生成扫描阵列中各个像素的红外背景谱, 反演各扫描像素的目标透过率. 对于难以测得纯净的天空背景辐射与具有实时性需求等情况下, 本研究可以确保实测气云的柱浓度分布趋势不会受到破坏, 为化工园区气体泄漏成像监测提供了技术支持.

## 2 基本原理

### 2.1 基本测量原理

扫描 FTIR 遥测成像系统在对场景目标气云成像的过程中, 由于存在仪器架设位置较低和目标监测区域较高等因素, 系统的入瞳辐射亮度由大气辐射、目标气云红外特征和天空背景辐射组成. 图 1 是天空场景下目标气云被动遥测 3 层辐射传输模型示意图<sup>[4,18]</sup>.

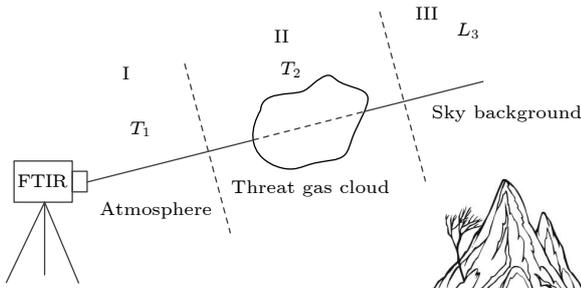


图 1 天空场景下的 3 层辐射传输模型

Fig. 1. Three-layer radiative transfer model under sky background.

来自第 3 层的天空背景辐射为

$$L_{bg} = L_3. \quad (1)$$

其中  $L_3$  为第 3 层的总辐射. 在 3 层辐射传输模型中, 散射的贡献可以忽略不计, FTIR 光谱仪的入瞳辐射亮度  $L_1$  可表示为

$$L_1 = (1 - \tau_{A1})B_1 + \tau_{A1}[(1 - \tau_{A2}\tau_{T2})B_2 + \tau_{A2}\tau_{T2}L_{bg}], \quad (2)$$

式中  $B_i$  为第  $i$  层对应温度的黑体辐射亮度,  $\tau_{A_i}$  为第  $i$  层的大气透过率,  $\tau_{T_2}$  为目标气体云团透过率. 一般情况下, 气体云团高度不超过 50 m, 因此大气层温度 ( $T_1$ )、目标气云层 ( $T_2$ ) 和背景层温度 ( $T_{bl}$ ) 近似相等, 可令  $T_1 = T_2 = T_{bl}$ , 则  $B_1 = B_2 = B_{bl}$ , 其中 bl 为边界层. (2) 式可简写为

$$L_1 = B_{bl} + \tau_{A1}\tau_{A2}\tau_{T2}(L_{bg} - B_{bl}). \quad (3)$$

将第 1 层和第 2 层的大气透过率合并为  $\tau_A$ , 并将 (3) 式化简可得气体云团透过率为

$$\tau_{T2} = \frac{L_1 - B_{bl}}{\tau_A(L_{bg} - B_{bl})}. \quad (4)$$

为计算目标气云的透过率, 需要获取气体云团不存在时的背景光谱, (4) 式可以改写为

$$L_{bg} = \frac{L'_1 - B_{bl}}{\tau_A} + B_{bl}, \quad (5)$$

式中,  $L'_1$  是无目标气体云团存在时的测量光谱,  $\tau_A$  取决于目标气云后边界与测量系统之间的距离和大气环境等因素决定. 上述光谱辐射亮度与绝对温度的关系可由黑体辐射亮度  $B(\nu, T)$  公式给出, 可表示为

$$B(\nu, T) = \frac{\varepsilon C_1 \nu^3}{\exp(C_2 \nu / T) - 1}, \quad (6)$$

式中,  $\varepsilon$  为发射率,  $C_1 = 1.191 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$  为第一辐射常数,  $C_2 = 1.4388 \text{ K} \cdot \text{cm}$  为第二辐射常数,  $\nu$  为波数 ( $\text{cm}^{-1}$ ).

然而, 在气体泄漏的常态化监测过程中, 无法获取到目标气云后边界到测量系统之间的距离, 一般情况下遥测距离不超过 1 km, 大气吸收较弱, 因此 (4) 式改可写为

$$\tau_{mix} = \tau_{T2}\tau_A = \frac{L_1 - B_{bl}}{L_{bg} - B_{bl}}, \quad (7)$$

式中,  $L_{bg}$  为天空背景辐射, 混合透过率 ( $\tau_{mix}$ ) 是目标气云透射比与大气透射比的乘积. 由 (7) 式可知, 为计算混合透过率只需要获取边界层大气温度和天空背景辐射.

## 2.2 天空向下热红外辐射传输基础

在平面平行大气中,忽略散射的情况下,热红外辐射传输方程如下:

$$\mu \frac{dI_v(\delta, \mu)}{d\delta} = I_v(\delta, \mu) - B_v(T_\delta), \quad (8)$$

式中,  $\mu$  为天顶角 ( $\theta$ ) 余弦,  $\delta$  为光学厚度,  $T_\delta$  是光学厚度为  $\delta$  对应层的温度,  $I_v(\delta, \mu)$  为单色光辐射亮度,  $B_v(T_\delta)$  为辐射源函数. 在晴空大气条件下,以地面观测为基准,假定大气顶的红外辐射强度为 0, 则到达探测器上的天空向下热红外辐射为

$$I_v^\downarrow(\delta^*, -\mu) = \int_0^{\delta^*} B_v(T_{\delta'}) \cdot \exp\left[\frac{-(\delta^* - \delta')}{\mu}\right] \frac{d\delta'}{\mu}, \quad (9)$$

式中,  $\delta^*$  为大气层总光学厚度. 通过分析 (9) 式可知, 在大气层总光学厚度不变的前提下, 天空向下热红外辐射与天顶角余弦有关, (9) 式中与天顶角余弦相关部分如下:

$$\frac{d\tau_v\left(\frac{\delta^* - \delta'}{\mu}\right)}{d\delta'} = \frac{1}{\mu} \cdot \exp\left[\frac{-(\delta^* - \delta')}{\mu}\right], \quad (10)$$

式中,  $\tau_v$  为单色透射比. (10) 式部分在  $\mu \in (0, 1)$  定义域内具有连续可导的特性, 因此, (2) 式相对于天顶角余弦也具有该特性.

## 2.3 天空背景辐射生成

8—14  $\mu\text{m}$  波段是大气红外窗口,也是气体分子的指纹区,在该波段内,到达地面探测器上的向下红外辐射受到大气分子、云、气溶胶粒子等物质的散射和吸收作用的影响<sup>[19]</sup>. 水汽、二氧化碳、臭氧、甲烷等大气分子是斜程测量路径上的主要吸收气体,该波段内由于气体红外吸收而引起的大气总透射率是由这些气体透过率的乘积组成. 水汽在该波段产生连续吸收,在大气中的含量也随时间和空间的变化而变化. 二氧化碳的含量低且变化较小,因而对到达地面探测器的向下红外辐射的变化不大. 大气中臭氧含量很少,它主要位于离地面 10—40 km 高度,特别是集中在 20—30 km 高度上,因此在水平仰角下,臭氧的吸收作用可以忽略不计,但在斜程测量过程中需要考虑. 在大气中甲烷含量很低,且吸收中心位于 8—14  $\mu\text{m}$  波段之外,在气体被动遥测中可以忽略不计. 此外,在 8—14  $\mu\text{m}$  波段内,红外辐射与方位角无关,在固定测量区域,

相同天顶角下,向下红外辐射与水汽含量之间存在近似的线性关系<sup>[4]</sup>. 综上考虑,温度廓线与湿度廓线是红外向下辐射需要考虑的首要因素. MODTRAN<sup>[18,20]</sup> 提供了 6 种通用大气模式及用户自定义大气模式,表 1 为 MODTRAN 所含有的 6 种标准大气模式与下边界层温度,图 2 为 MODTRAN 中 6 种标准大气模式下的温度廓线. 通用大气模式分为 34 层,各层均包含压强、温度和 12 种气体分子的浓度(水汽 ( $\text{H}_2\text{O}$ )、臭氧 ( $\text{O}_3$ )、二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )、一氧化碳 ( $\text{CO}$ )、甲烷 ( $\text{CH}_4$ )、氮氧化物 ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$ )、氨 ( $\text{NH}_3$ )、氧气 ( $\text{O}_2$ )、二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ ) 和硝酸 ( $\text{HNO}_3$ )) 等数据. 如果选用自定义大气模式,需要获取大气的温湿压廓线等作为输入参数,因为这些参数随时间、空间变化较大,而其他气体分子在全球分布均匀且随时空变化较小,这些分子的廓线在各个大气模式中是近乎一致的.

表 1 MODTRAN 大气模式  
Table 1. Atmospheric models of MODTRAN.

模型序号	大气模式	边界层温度/K
1	热带	299.7
2	中纬度夏季	294.2
3	中纬度冬季	272.2
4	亚极地夏季	287.2
5	亚极地冬季	257.2
6	美国标准大气(1976)	288.2

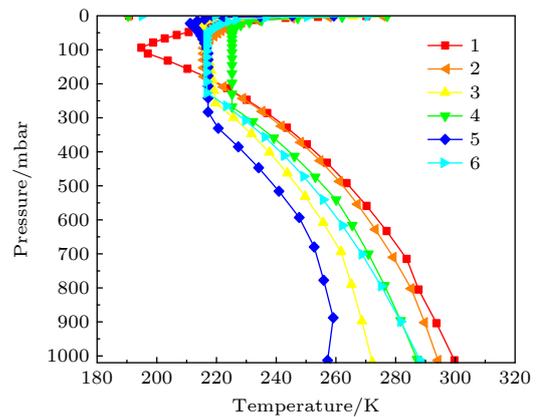


图 2 MODTRAN 中 6 种大气模式的温度廓线

Fig. 2. Temperature profiles of six atmospheric models in MODTRAN.

气体被动遥测时,很多情况需要低仰角观测,观测背景为低平天空时,观测数据与近地面的大气状态相关,随着测量仰角的增高,实测光谱受冷空背景的影响越来越大,不同天顶角下大气温度、湿

度变化明显. 欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供了三维大气状态参数 ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的空间分辨率, 1 h 的时间分辨率), 该三维大气参数部分字段如表 2 所列, 将该数据输入到 MODTRAN 的用户自定义模式即可仿真得到实测场景不同天顶角下的背景辐射光谱.

表 2 ECMWF 部分数据字段  
Table 2. Some data fields of ECMWF.

序号	字段	注释
1	Longitude	经度( $^\circ$ )
2	Latitude	纬度( $^\circ$ )
3	Time	时间(h)
4	Pressure level	压强(mbar)
5	Temperature	温度(K)
6	Relative humidity	相对湿度(%)
7	Ozone mass mixing ratio	臭氧(kg/kg)
8	Geopotential	海拔参数( $m^2/s^2$ )

### 2.4 天空背景辐射与天顶角余弦关系的仿真分析

扫描 FTIR 遥测成像系统对监测视场进行扫描成像时, 受到系统摆放位置的水平程度和系统运行稳定程度等影响, 因而同行像素的仰角存在差异. 如果每一个像素位置的天空背景辐射均需要采用 MODTRAN 仿真, 则大幅度地降低了目标气云透过率反演的实时性. 因此, 本文提出了基于预先模拟生成的背景光谱与天顶角余弦的关系进行逐波数插值生成任意天顶角 (大于  $60^\circ$ ) 对应的背景光谱. 利用 MODTRAN 的 6 种经典大气模式的仿真验证基于该关系插值生成背景光谱的可行性. 在仿真距离为 50 km、天顶角在  $60^\circ - 90^\circ$  范围内  $1^\circ$  的角度间隔条件下, 分别对 6 种大气模式下斜程大气热红外辐射进行仿真. 通过仿真发现, 在  $740 - 1250 \text{ cm}^{-1}$  波段内, 各波数下辐射亮度随天顶角余弦缓慢变化, 不存在陡变等情况, 可用 1—2 个宽高斯函数进行拟合, 在该波段内天空向下红外辐射亮度与天顶角余弦逐波数具有连续可导的关系, 图 3 所示为  $800.4976 \text{ cm}^{-1}$  处辐射亮度随天顶角余弦的变化关系. 图 4 为美国标准大气模式下天顶角为  $78.5^\circ$  的仿真红外辐射亮度曲线与插值生成的辐射亮度曲线, 在该波段内的均方根 (RMS) 为  $1.86 \times 10^{-9} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ . 图 5 为图 4 中仿真谱与生成谱之间的差谱.

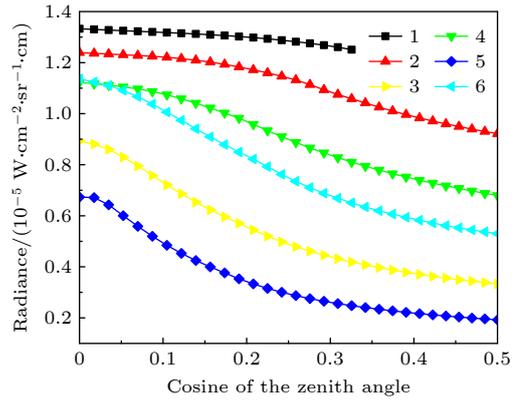


图 3 在  $800.4976 \text{ cm}^{-1}$  处的辐射亮度随天顶角余弦值的变化

Fig. 3. Variation of radiance at  $800.4976 \text{ cm}^{-1}$  with the cosine of zenith angle.

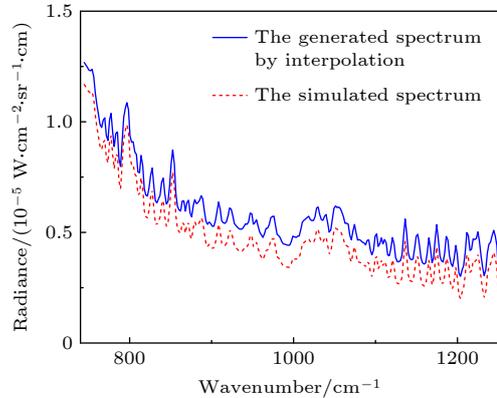


图 4  $78.5^\circ$  天顶角下的仿真谱与生成谱 (插值生成谱进行了平移)

Fig. 4. Simulated spectrum and the generated spectrum with a zenith angle of  $78.5^\circ$  (the interpolation generated spectrum has been shifted).

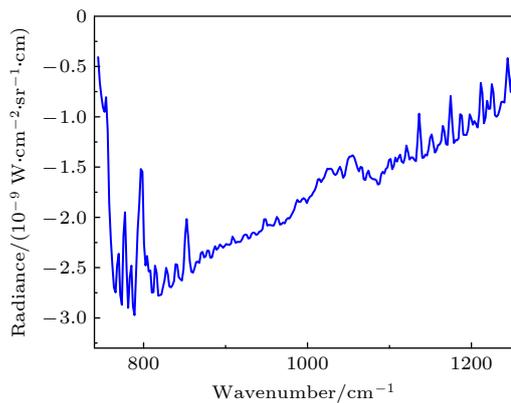


图 5  $78.5^\circ$  天顶角下的仿真谱与生成谱的差谱

Fig. 5. Difference spectrum between the simulated spectrum and the generated spectrum at a zenith angle of  $78.5^\circ$ .

通过预先仿真得到与各梯度天顶角相对应的辐射亮度曲线, 通过插值方式得到  $84.5^\circ, 78.5^\circ,$

71.5°和 64.5°下的生成谱, 并与同天顶角下的仿真谱, 计算差谱, 得到均方根如表 3 所列, 其中 Nan 代表数据为空. 通常来说, 如果信号高于噪声 RMS 的 5 倍, 误警率则低至 1/500000<sup>[18,20]</sup>. 从表 3 可知, 插值生成的背景谱与仿真背景谱之间的差异很小, 低于仪器自身的噪声等效辐射亮度 (NESR), 可用于仿真背景的替代品.

表 3 插值生成谱与仿真谱的均方根 (单位:  $10^{-10}$  W/(cm<sup>2</sup>·sr·cm<sup>-1</sup>))

Table 3. Root mean square error between the generated spectrum by interpolation and the simulated spectrum (unit:  $10^{-10}$  W/(cm<sup>2</sup>·sr·cm<sup>-1</sup>)).

模型序号	天顶角/(°)			
	84.5	78.5	71.5	64.5
1	2.92	1.6	35.03	Nan
2	1.77	0.93	12.47	1.0
3	4.81	21.26	0.38	0.18
4	4.59	32.97	4.41	1.05
5	4.76	1.57	0.43	0.12
6	3.41	18.56	0.44	0.39

### 3 实验系统及遥测放气实验

#### 3.1 实验系统

扫描 FTIR 遥测成像系统 (图 6) 由 FTIR 干涉仪、反射式望远镜、工业相机、2 自由度 (2-DOF) 云台、GPS、九轴陀螺仪、干涉图数据采集和处理系统及台式电脑等部件组成. 该光谱仪的光谱范围为 600—1800 cm<sup>-1</sup>, 最大光谱分辨率为 1 cm<sup>-1</sup>, 采集 4 cm<sup>-1</sup> 光谱的扫描速率为 10 spectra/s. 反射式望远镜的最大探测距离为 5 km, 视场为 7.5 mrad.

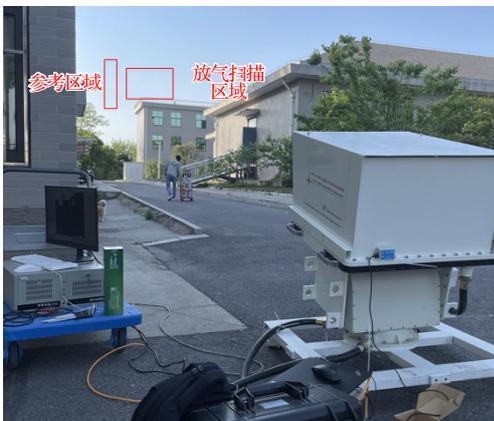


图 6 扫描 FTIR 遥测成像系统与测试场景

Fig. 6. Scanning FTIR remote sensing imaging system and test scene.

扫描云台的角分辨率为 0.01°, 可扫描范围为 360°×60°.

扫描 FTIR 遥测成像系统可以测量立体气云的二维投影, 系统根据用户预设的采样阵列, 利用红外光谱仪对监测空间进行扫描和可视化. 每个像素的辐射光谱由数据采集与处理系统采集并传输到计算机进行成分识别、半定量分析和可视化.

#### 3.2 实验过程

为验证天顶角余弦与天空红外背景光谱之间逐波数连续可导的关系, 分析基于实测地点温湿压廓线和结合大气模式仿真的背景谱对目标透气云过率谱反演的影响, 因此, 进行了一次外场放气遥测实验, 如图 6 所示, 将含有 SF<sub>6</sub> 的压力气瓶放置于小平层楼顶上, 扫描系统与楼房之间的距离约为 82 m. 放气实验前, 首先对参考区域进行扫描, 得到 15 行 1 列的参考光谱及各扫描像素的仰角. 放气实验过程中, 分为两步, 首先放气前对放气扫描区域进行背景采集, 其次对钢瓶内的六氟化硫气

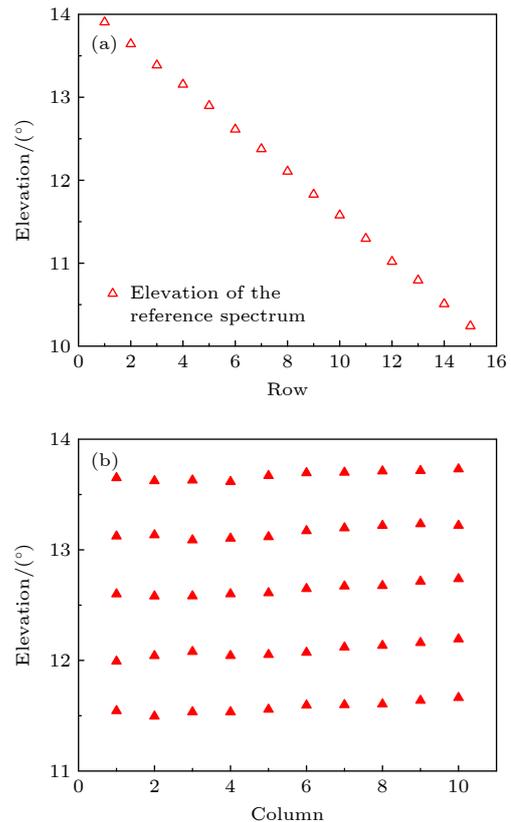


图 7 像素光谱对应的测量姿态仰角 (a) 参考区域各像素位置仰角; (b) 扫描区域各像素位置仰角

Fig. 7. Measured elevation corresponding to the pixel spectrum: (a) The elevation of each pixel in the reference area; (b) the elevation of each pixel in the scanning area.

体以连续点源的方式进行释放并进行扫描测量, 扫描阵列为 5 行 10 列. 此外, 对目标气体扫描时也需要测量各扫描像素的仰角. 图 7 为参考区域与放气扫描区域内各扫描像素的仰角.

图 8 为 4 行 7 列的实测背景谱和 SF<sub>6</sub> 目标谱, 该像素测量姿态仰角为 12.1°. 从图 8 可知, 700—1300 cm<sup>-1</sup> 内含有天空背景的水汽累积发射光谱及臭氧结构特征, 若无背景光谱, 很难从测量谱中准确地提取出目标光谱特征, 将目标光谱与实测背景光谱作差, 使得 SF<sub>6</sub> 吸收结构清晰显现出来.

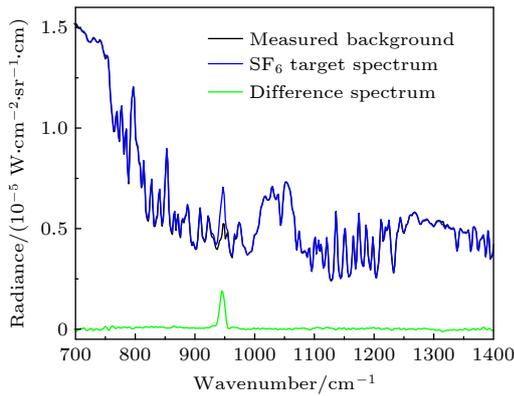


图 8 4 行 7 列像素位置的实测背景光谱、目标光谱及差谱  
Fig. 8. Measured background spectrum, target spectrum and difference spectrum of pixel position in 4 row and 7 column.

## 4 结果与讨论部分

### 4.1 基于参考区域生成背景的透过率反演与精度分析

将图 7 中测量光谱的姿态仰角换算为天顶角的余弦值, 采用三次样条插值算法 [21], 以参考区域的天空红外背景光谱为基准逐波数进行插值, 得到放气扫描区域内各个像素位置的天空背景光谱, 称之为基于参考区域生成的背景. 图 9 为 4 行 7 列处基于参考区域生成的背景谱与实测天空背景光谱, 从逼近程度来看, 在 800—950 cm<sup>-1</sup> 波段存在微小偏移, 但是其结构完全一致. 此外, 造成基于参考区域生成背景谱与实测背景谱之间的偏差, 很大程度来自于九轴陀螺仪传感器测量角精度的影响.

为验证基于参考区域生成的背景谱对半定量分析的影响, 将像素同位置的实测背景与基于参考区域生成的背景均用于目标气云透过率反演, 反演方法基于 (7) 式, 反演的透过率如图 10 所示, 从反演的 SF<sub>6</sub> 透过率可知, 以天空为背景进行气体测量

时, 具有更高的信噪比, 吸收峰更为纯净.

采用非线性最小二乘法将反演的透过率与标准参考光谱进行拟合, 计算出 SF<sub>6</sub> 气云柱浓度, 实测背景与基于参考区域生成的背景反演的柱浓度关系曲线如图 11 所示, Y 轴为基于参考区域生成

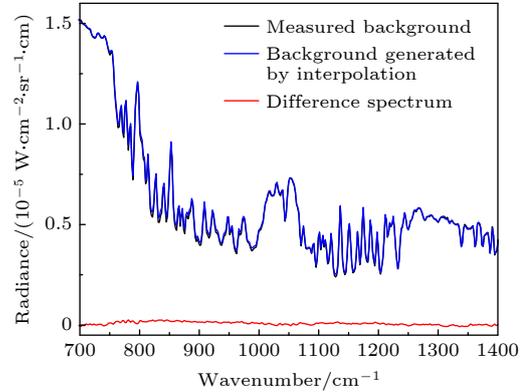


图 9 基于参考区域生成的背景谱与实测背景谱  
Fig. 9. Background spectrum generated based on reference area and measured background spectrum.

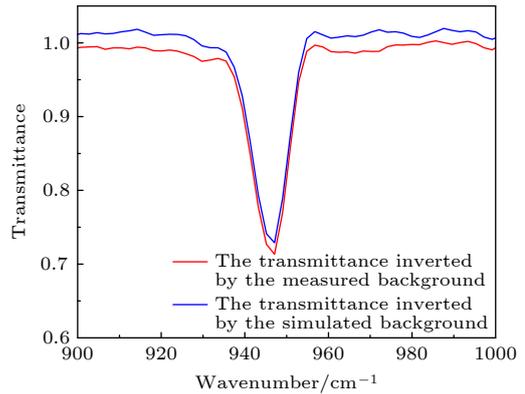


图 10 SF<sub>6</sub> 透过率  
Fig. 10. SF<sub>6</sub> transmittance.

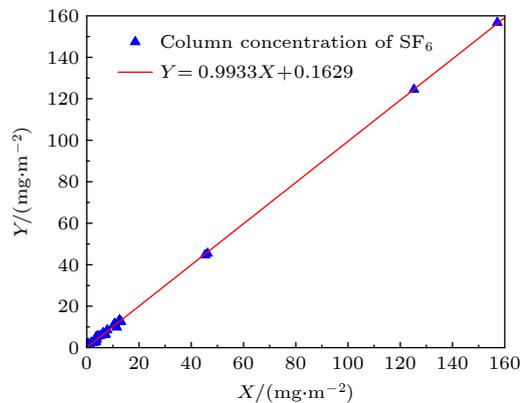


图 11 两种背景反演的 SF<sub>6</sub> 柱浓度拟合分析结果  
Fig. 11. Fitting analysis results of SF<sub>6</sub> column concentration of two backgrounds.

背景反演的目标气云柱浓度值, X轴为实测背景反演的目标气云柱浓度值, 两种背景计算的 SF<sub>6</sub> 气云浓度值相关性达到 0.99965, 从半定量结果的精度来看, 基于参考区域生成的背景完全可以代替实测背景, 可确保气云分布趋势与实际分布一致.

图 12 为基于参考区域生成背景反演的柱浓度图像, 为方便观察和分析气云分布, 图 12(a) 和图 12(b) 分别设置 19.6 mg·m<sup>-2</sup> 和 163.0 mg·m<sup>-2</sup> 为 SF<sub>6</sub> 气云分布假彩色图像的最大显示阈值, 从图 12(a) 可

看出 SF<sub>6</sub> 气云分布趋势, 自右向左进行扩散, 第 4 行末尾 4 个像素的浓度值均高于显示阈值, 从图 12(b) 只能大致观察到几个高浓度值点及高值的扩散羽流.

#### 4.2 基于 ECMWF 廓线合成背景的透过率反演与精度分析

图 13 为试验地点、临近时间的 ECMWF 廓线, 利用大气模式与 ECMWF 廓线仿真生成背景光谱, 如图 14 所示, 第 4 行第 7 列处 ECMWF 廓

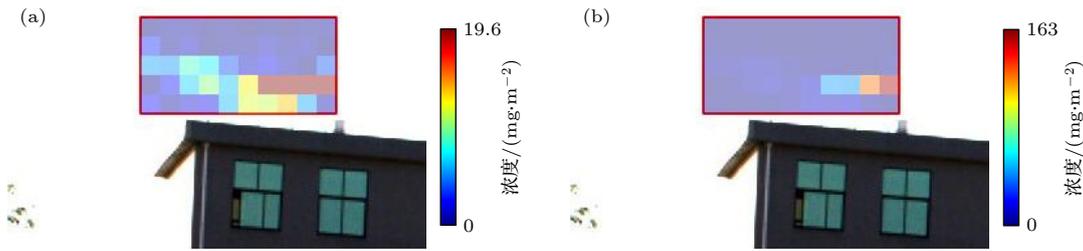


图 12 基于参考区域生成背景反演的柱浓度图像 (a) 低阈值显示的 SF<sub>6</sub> 柱浓度图像; (b) 高阈值显示的 SF<sub>6</sub> 柱浓度图像  
Fig. 12. Column concentration images based on background generated by the reference area: (a) SF<sub>6</sub> column density image displayed at a low threshold; (b) SF<sub>6</sub> column density image displayed at a high threshold.

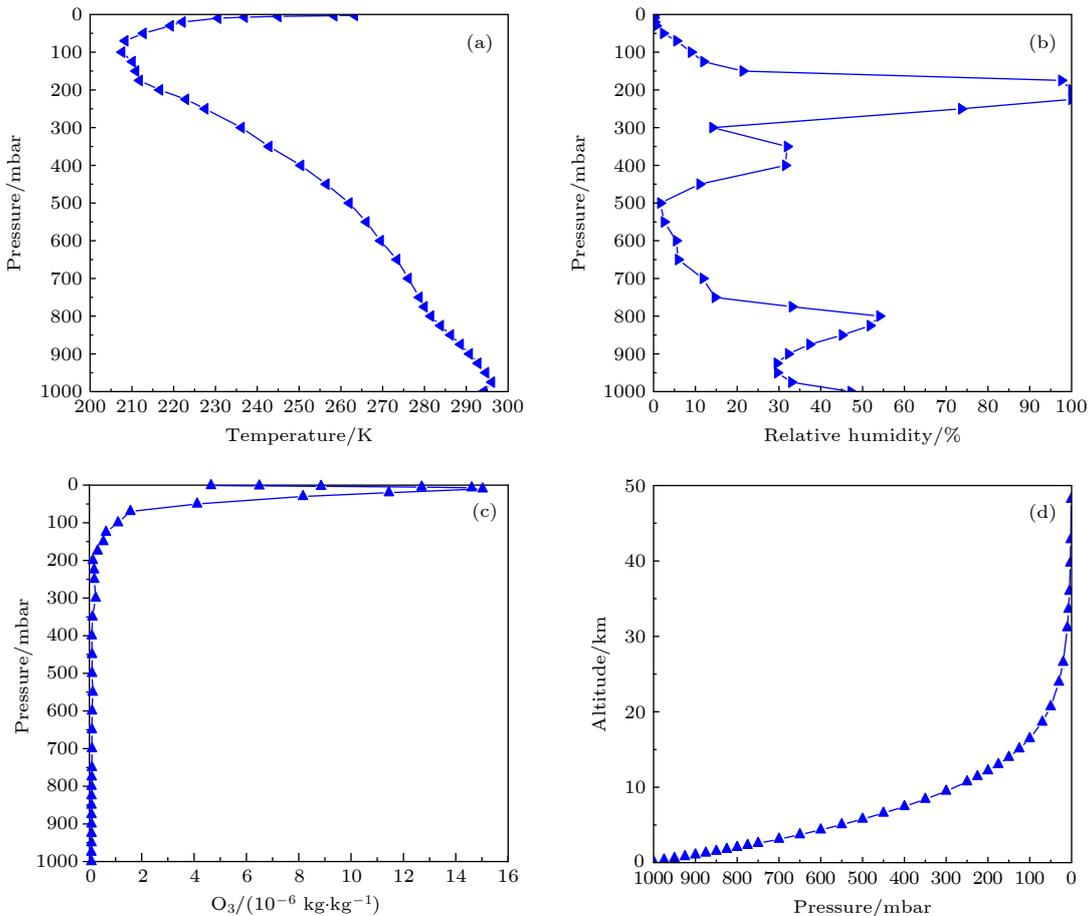


图 13 实验场景的 ECMWF 廓线 (a) 温度廓线; (b) 相对湿度廓线; (c) 臭氧廓线; (d) 海拔  
Fig. 13. ECMWF profiles of experimental scenarios: (a) Temperature profile; (b) relative humidity profile; (c) ozone profile; (d) altitude.

线仿真生成的背景光谱与实测背景光谱的各个水汽吸收峰相匹配. 由于本工作关注的重点是目标气云空间浓度分布, 图 7(b) 给出了各个像素光谱的仰角, 基于 ECMWF 廓线仿真背景与天顶角余弦的连续可导关系, 对  $11^\circ\text{--}14^\circ$ , 以  $0.3^\circ$  为仰角梯度, 仿真生成 11 条不同仰角的背景光谱, 并以此为基础, 通过三次样条插值算法逐波数插值生成各个像素对应的背景光谱, 称之为基于 ECMWF 廓线合成的背景.

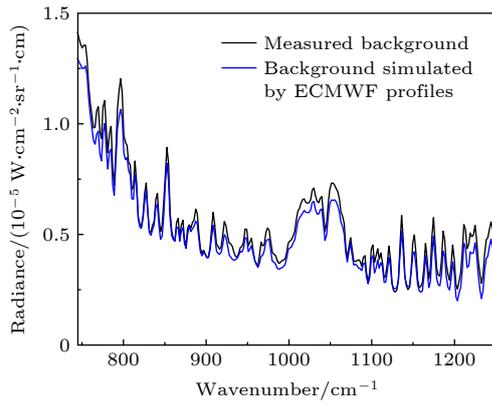


图 14 实测背景与 ECMWF 廓线仿真背景

Fig. 14. Measured background and ECMWF profile simulation background.

将各个像素背景光谱结合 (7) 式反演目标透过率, 生成目标透过率如图 15 所示, 反演的透过率依然存在部分水汽吸收峰, 因此对目标气体半定量反演时, 需要将水汽吸收峰也代入拟合计算. 将 ECMWF 廓线合成背景反演的柱浓度与实测背景反演的柱浓度进行相关性分析, 如图 16 所示, Y 轴为基于 ECMWF 廓线合成背景反演的目标气云柱

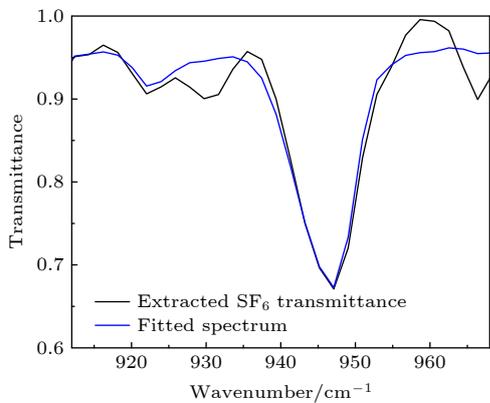


图 15 基于 ECMWF 廓线合成背景提取的 SF<sub>6</sub> 目标光谱

Fig. 15. SF<sub>6</sub> target spectrum extracted by the synthesis background based on ECMWF profiles.

浓度值, X 轴为实测背景反演的目标气云柱浓度值, 两种背景计算的 SF<sub>6</sub> 气云浓度值相关性达到 0.99979, 基于 ECMWF 廓线合成的各个背景完全可以用于代替实测天空背景.

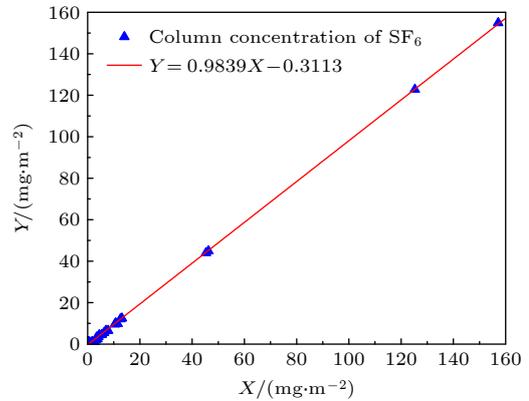


图 16 两种背景反演的 SF<sub>6</sub> 柱浓度拟合结果

Fig. 16. Fitting analysis results of SF<sub>6</sub> column concentration of two backgrounds.

图 17 为基于 ECMWF 廓线合成背景反演的柱浓度图像. 图 17(a) 和图 17(b) 为 SF<sub>6</sub> 气云分布假彩色图像, 为了便于观察设置了不同的最大阈值, 其 SF<sub>6</sub> 气云分布与图 12(a) 和图 12(b) 趋势一致, 满足空间分布的一致性, 因此采用基于 ECMWF 廓线合成的背景与基于参考区域生成的背景, 对目标气云透过率反演的结果精度是等效的. 尽管基

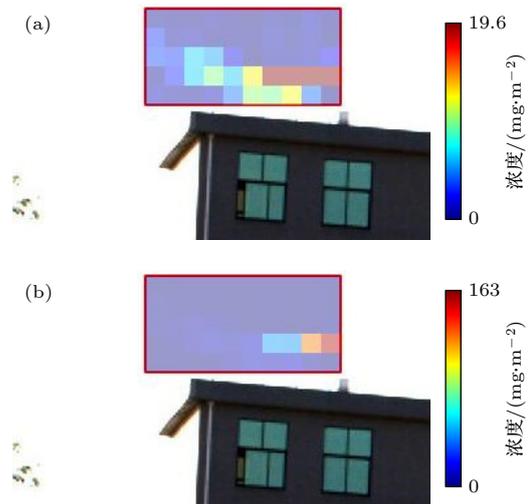


图 17 基于 ECMWF 廓线合成背景反演的柱浓度图像 (a) 低阈值显示的 SF<sub>6</sub> 柱浓度图像; (b) 高阈值显示的 SF<sub>6</sub> 柱浓度图像

Fig. 17. Column concentration images based on ECMWF profiles synthesis background: (a) SF<sub>6</sub> column concentration image displayed at a low threshold; (b) SF<sub>6</sub> column concentration image displayed at a high threshold.

于 ECMWF 廓线合成的背景与实测纯净背景存在差异, 实测背景基本可以将大气中的分子吸收扣除干净, 而 ECMWF 廓线合成背景则因为大气模式及廓线等具有的自身精度因素, 不能将大气中的水汽分子吸收等扣除干净, 但是将水汽吸收与目标光谱一块进行拟合, 其效果也逼近于实测背景. 对于复杂场景中, 无法采集纯净天空背景谱, 且需要满足实时性的情况下, 采用基于 ECMWF 廓线合成背景谱来代替各个像素位置的实测背景光谱是一种非常具有应用前景的有效方法.

## 5 结 论

本文通过 MODTRAN 的 6 种大气模式和 SF<sub>6</sub> 遥测实验验证了天空向下红外背景辐射与天顶角余弦逐波数具有连续可导的关系, 可以采用少量具有天顶角梯度的天空背景谱逐波数插值生成梯度范围内任意角度的天空背景辐射光谱, 并提出了基于大气廓线合成背景的目标气云透过率反演方法. 通过 SF<sub>6</sub> 气云柱浓度分布趋势和半定量精度, 验证了基于 ECMWF 廓线合成的背景与实测背景对目标气云反演精度是近乎相同的效果. 本文所提方法可以有效提升了天空红外背景辐射生成效率, 确保了目标气云透过率反演的准确性.

## 参考文献

- [1] Hu Y Y, Xu L, Shen X C, Jin L, Xu H Y, Deng Y S, Liu J G, Liu W Q 2021 *Appl. Opt.* **60** 9396
- [2] Jiao Y, Xu L, Gao M G, Jin L, Tong J J, Li S, Wei X L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 140705 (in Chinese) [焦洋, 徐亮, 高闽光, 金岭, 童晶晶, 李胜, 魏秀丽 2013 物理学报 **62** 140705]
- [3] Sabbah S, Rusch P, Gerhard J H, Harig R 2013 *Proc. SPIE* **8743** 370
- [4] Liou K N 2002 *An Introduction to Atmospheric Radiation* (Vol. 84) (Elsevier)
- [5] Chen M H, Yuan C S, Wang L C 2015 *Aerosol Air Qual. Res.* **15** 1110
- [6] Smith T E L, Wooster M J, Tattaris M, Griffith D W T 2011 *Atmos. Meas. Tech.* **4** 97
- [7] Stremme W, Krueger A, Harig R, Grutter M 2012 *Atmos. Meas. Tech.* **5** 275
- [8] Theriault J M, Puckrin E, Lavoie H, Turcotte C S, Bouffard F, Dube D 2004 *Proc. SPIE* **5584** 100
- [9] Flanigan D F 1997 *Appl. Opt.* **36** 7027
- [10] Evans W F, Puckrin E, McMaster D 2002 *Proc. SPIE* **4574** 44
- [11] Gao M G, Liu W Q, Zhang T S, Liu C, Liu J G, Wei Q N, Lu Y H, Wang Y P, Zhu J, Xu L 2006 *Spectrosc. Spec. Anal.* **26** 47 (in Chinese) [高闽光, 刘文清, 张天舒, 刘诚, 刘建国, 魏庆农, 陆亦怀, 王亚萍, 朱军, 徐亮 2006 光谱学与光谱分析 **26** 47]
- [12] Harig R 2004 *Appl. Opt.* **43** 4603
- [13] Harig R, Rusch P, Peters H, Gerhard J, Braun R, Sabbah S, Beecken J 2009 *Proc. SPIE* **7475** 74750Z
- [14] Li D C, Cui F X, Wang A J, Li Y Y, Wu J, Qiao Y L 2020 *IEEE Trans. Geosci. Electron.* **58** 8649
- [15] Xia M H, Zhi X F 2020 *Trans. Atmos. Sci.* **43** 652 (in Chinese) [夏旻惠, 智协飞 2020 大气科学学报 **43** 652]
- [16] Cui F X, Li D C, Wu J, Wang A J, Li Y Y 2019 *Acta Opt. Sin.* **39** 406 (in Chinese) [崔方晓, 李大成, 吴军, 王安静, 李扬裕 2019 光学学报 **39** 406]
- [17] Chi X M, Xiao A S, Zhu L, Jia R Z, Li M J, Gao S H, Wang G L, Ding D W, Zhu S J 2021 *Safety Health Environ.* **21** 1 (in Chinese) [迟晓铭, 肖安山, 朱亮, 贾润中, 李明骏, 高少华, 王国龙, 丁德武, 朱胜杰 2021 安全、健康和环境 **21** 1]
- [18] Flanigan D F 1996 *Appl. Opt.* **35** 6090
- [19] Berk A, Conforti P, Kennett R, et al. 2014 *6th IEEE GRSS Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing Lausanne June 25, 2014* p1
- [20] Feng M C, Xu L, Liu W Q, Liu J G, Gao M G, Wei X L 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 014210 (in Chinese) [冯明春, 徐亮, 刘文清, 刘建国, 高闽光, 魏秀丽 2016 物理学报 **65** 014210]
- [21] Keller W, Borkowski A 2019 *J. Geod.* **93** 1251

# Inversion method of target gas cloud transmittance based on atmospheric profile synthesis background\*

Hu Yun-You<sup>1)2)</sup> Xu Liang<sup>1)†</sup> Shen Xian-Chun<sup>1)</sup> Shu Sheng-Quan<sup>1)2)</sup>  
Xu Huan-Yao<sup>1)2)</sup> Deng Ya-Song<sup>1)2)</sup> Xu Han-Yang<sup>1)</sup>  
Liu Jian-Guo<sup>1)</sup> Liu Wen-Qing<sup>1)</sup>

1) (*Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China*)

2) (*University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

( Received 22 August 2022; revised manuscript received 21 November 2022 )

## Abstract

The sky infrared background radiation varies greatly with spatial distribution and time. When scanning Fourier transform infrared remote sensing imaging system scans the target gas cloud with the sky as the background, the background radiation corresponding to each scanned pixel is different, and the background does not have a constant baseline. It is extremely difficult to obtain the background spectrum of each pixel in real time, which affects the inversion accuracy of the target gas cloud transmittance. An inversion method of target gas cloud transmittance based on atmospheric profile synthesis background is proposed in this work. The temperature, humidity, pressure, and ozone profiles of the measured locations and the atmospheric model are used to generate the sky infrared background in order to solve the problem, i.e. the difficulty in measuring the clean sky infrared background spectrum in the chemical industry park. This paper proposes that there is a continuous derivable relationship between the sky infrared background spectrum and the cosine of zenith angle at each wavenumber, so a small amount of sky infrared background spectrum with a zenith angle gradient can quickly generate a sky infrared background spectrum at any elevation angle. The proposed method is verified by the moderate resolution atmospheric radiative transfer model (MODTRAN) software simulation and the remote sensing imaging experiment of SF<sub>6</sub> gas. The proposed method can quickly generate the sky infrared background spectrum corresponding to any angle within a gradient elevation angle and accurately invert the target gas cloud transmittance at each pixel. The results show that the distribution trend of the column concentration of the SF<sub>6</sub> gas cloud is consistent with the actual distribution, and the correlation is 0.99979.

**Keywords:** Fourier transform infrared spectroscopy, synthetic background, transmittance inversion, gas cloud scanning imaging

**PACS:** 32.30.Bv, 98.70.Vc, 07.57.Ty, 42.30.-d

**DOI:** [10.7498/aps.72.20221670](https://doi.org/10.7498/aps.72.20221670)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41941011, 52027804) and the Key R&D Program of Anhui Province, China (Grant No. 2022m07020009).

† Corresponding author. E-mail: [xuliang@aiofm.ac.cn](mailto:xuliang@aiofm.ac.cn)

## 基于大气廓线合成背景的目标气云透过率反演

胡运优 徐亮 沈先春 束胜全 徐皖垚 邓亚颂 徐寒扬 刘建国 刘文清

### Inversion method of target gas cloud transmittance based on atmospheric profile synthesis background

Hu Yun-You Xu Liang Shen Xian-Chun Shu Sheng-Quan Xu Huan-Yao Deng Ya-Song Xu Han-Yang Liu Jian-Guo Liu Wen-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 033201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221670

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221670>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

利用地基高分辨率傅里叶变换红外光谱技术探测大气氟氯烃气体 $\text{CCl}_2\text{F}_2$ 的时空变化特征

Detection of atmosphere  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  spatio-temporal variations by ground-based high resolution Fourier transform infrared spectroscopy  
物理学报. 2021, 70(20): 200201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210640>

基于激光外差探测的大气 $\text{N}_2\text{O}$ 吸收光谱测量与廓线反演

Measurement and profile inversion of atmospheric  $\text{N}_2\text{O}$  absorption spectrum based on laser heterodyne detection  
物理学报. 2021, 70(21): 217801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210710>

基于傅里叶变换的波长扫描腔衰荡光谱

Wavelength-scanned cavity ring down spectroscopy based on Fourier transform  
物理学报. 2019, 68(20): 204204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191062>

傅里叶红外光谱气体检测限的定性分析

Qualitative analysis of gas detection limit of Fourier infrared spectroscopy  
物理学报. 2022, 71(9): 093201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212366>

中波红外微型静态傅里叶变换光谱仪的设计与分析

Design and analysis of medium wave infrared miniature static Fourier transform spectrometer  
物理学报. 2018, 67(6): 060702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172599>

基于高分辨率激光外差光谱反演大气 $\text{CO}_2$ 柱浓度及系统测量误差评估方法

Atmospheric  $\text{CO}_2$  column concentration retrieval based on high resolution laser heterodyne spectra and evaluation method of system measuring error  
物理学报. 2020, 69(14): 144201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200125>