

仪器分辨率对氧气 A 带被动测距的影响分析

李晋华^{1,2}, 张敏娟^{1,2}, 王志斌^{1,2}, 李世中^{1,2*}

1. 中北大学, 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051
2. 中北大学前沿交叉科学研究院, 山西 太原 030051

摘要 透过率的计算是红外目标被动测距技术的核心, 其精度直接影响到被测距离的精度, 而仪器分辨率又直接影响到光谱信号的精度。为了研究光谱仪器分辨率对带平均透过率的影响, 选用氧气 A 带为研究对象, 采用基线拟合方式计算被测目标的带平均透过率, 利用随机 Malkmus 模型计算被测目标距离, 从而获得仪器分辨率对被动测距的影响。为此, 搭建了被动测距实验系统, 通过对卤素灯光源在不同距离的光谱测量, 验证仪器分辨率对带平均模式被动测距的影响。首先, 介绍氧气 A 带透过率的计算方法, 计算理论值; 以卤素灯为光源, 利用光谱仪分别测量相同距离不同分辨率的光谱曲线, 计算实测大气透过率, 分析光谱分辨率对单谱线的影响; 然后, 在分析比较透过率模型和实测透过率谱线的基础上, 对透过率计算模型进行拟合、校正, 验证光谱分辨率对带模型的影响。对于单条谱线, 仪器的不同分辨率可测得的谱线区别较大, 而对带平均谱线, 相同波数点的光谱信号取平均, 获得平均效应, 使得被测谱线几乎没有变化; 分辨率的模型选择需根据不同的应用场合、不同的精度要求选择合适的分辨率。实验结果表明: 分辨率对单谱线的透过率影响较大, 随着分辨率的降低, 被捕获的光谱信息点取值越少, 被测目标距离相关系数越小; 分辨率对带平均透过率的计算影响较小, 不同分辨率下测得的目标距离, 几乎重合; 而仪器分辨率越高则测量时间越长, 当使用带平均透过率计算被测目标距离, 在精度要求范围内, 可以适当降低仪器分辨率, 从而极大地提高测量速度, 并达到测量实时性, 同时降低系统搭建的成本。该结论可为透过率测量的应用提供依据。

关键词 仪器分辨率; 氧气 A 带; 透过率; 被动测距; 曲线拟合

中图分类号: TP394.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)06-1974-05

引言

氧气 A 带动态范围大, 谱线分布规则, 受周围环境影响不大等特性受到大气科学工作者的关注^[1], 被广泛应用于平流层、中层大气风场星载探测^[2], 大气压强^[3]、地表温压廓线^[4]、气溶胶廓线^[5]等。该带应用于被动测距技术, 具有隐蔽性好, 设备简单等突出优点, 在监测、防御等领域中有广泛的应用前景。无论哪方面应用, 透过率的计算至关重要, 而透过率的计算根据开发者需求的不同, 使用的光谱仪器也千差万别, 根据工程需求, 研发者有必要知晓仪器分辨率对透过率的影响情况, 以便采用适当的仪器做分析和测试。目前, 被测目标的光谱中, 低分辨率光谱仪实际反映的是光谱的包络线, 可大幅度降低仪器对测量光谱的影响^[6], 而高分辨率光谱仪测量谱线会产生线型畸变, 可用光谱仪的仪器谱

线函数(instrumental line shape, ILS)表示。本文便是根据工程需求, 探讨仪器分辨率对被动测量透过率的影响, 建立了透过率的计算模型, 为不同领域研发者提供理论依据。

1 被动测距理论基础

根据比尔-朗伯定律, 要建立透过率与被测目标距离的关系, 前提条件是单色传输, 到目前为止, 实验室测量的结果都不是单色的, 而是某光谱区间的平均值, 且受周围环境参数影响。要建立高速、实时的被动测距数学模型, 必须寻求一种低分辨率下快速准确的计算透过率的方法, 本文采用 Malkmus 带模型^[7]计算被测目标距离。

依据氧分子的结构特征^[8]和 HITRAN2016 数据库^[9]可知, 氧分子内部的谱线强度和谱线间隔分布不均匀, 且大小不一, 其光谱位置和强度并非均匀的, 满足随机带模式的两

收稿日期: 2021-05-07, 修订日期: 2021-09-11

基金项目: 山西省面上自然基金项目(201901D111145)资助

作者简介: 李晋华, 女, 1977 年生, 中北大学前沿交叉科学研究院讲师 e-mail: ljh4961@163.com

* 通讯作者

个设定：在一条吸收带中，各条吸收谱线位置随机；各条谱线的强度按 Malkmus 规律分布，考虑氧分子吸收带的总体吸收特征，无需知道氧分子吸收带内谱线的具体参数，计算速度快，可兼顾远程和近程高速测距。

通常大气的衰减也可用吸收率来表达，与透过率的关系为 $A(\omega, l) = 1 - T(\omega, l)$ ，本文提到的随机 Malkmus 带模型就是依据带平均吸收与谱线等效带宽之间的关系建立的。

1.1 目标光谱的带平均透过率计算模型

氧分子光谱区间 $\Delta\omega$ 间隔内的带平均透过率 \bar{T}_ω 定义为

$$\bar{T}_\omega = \frac{I_m(\omega)}{I_0(\omega)} = \frac{1}{\Delta\omega} \int T(\omega) d\omega = \frac{1}{\Delta\omega} \int_{\omega_i}^{\omega_f} \exp(-\tau(\omega)) d\omega \quad (1)$$

式(1)中， $I_m(\omega)$ 是经衰减后测得的光谱强度， $I_0(\omega)$ 为光源辐射强度， $T(\omega)$ 为单谱线透过率， $\Delta\omega$ 是谱带宽度， $\tau(\omega)$ 为光学厚度。

通常，测试大气的传输衰减不仅包含分子吸收，还有气溶胶散射；同时受到测量系统本身限制，因此实测目标辐射光谱应写为

$$I_m(\omega) = I_b(\omega) \bar{T}_{\text{scat}}(\omega) \bar{T}_\omega(\omega) \bar{R}(\omega) \quad (2)$$

式(2)中， $\bar{T}_{\text{scat}}(\omega)$ 是与气溶胶散射有关的平均透过率， $\bar{T}_\omega(\omega)$ 是氧分子吸收的平均透过率， $\bar{R}(\omega)$ 是与仪器函数有关的综合函数。经基线拟合^[10]， $\bar{T}_\omega(\omega)$ 容易获得，同时可消除 $\bar{T}_{\text{scat}}(\omega)$ 和 $\bar{R}(\omega)$ 的影响。

将没有氧分子吸收的信号定义为基线 $I_b(\omega)$ ，以消除 $\bar{T}_{\text{scat}}(\omega)$ 和 $\bar{R}(\omega)$ 带来的影响。结合氧气吸收带之外的光谱数据，可拟合基线 $I_b(\omega)$

$$I_m(\omega) = \bar{T}_\omega(\omega) I_b(\omega) \quad (3)$$

综上所述，带平均透过率的基本思想是，可通过探测器得到目标辐射光谱 $I_m(\omega)$ ，利用带外的光谱数据，结合基线拟合方法，拟合测量基线 $I_b(\omega)$ ，即可得到被测目标光谱的透过率。

$$\bar{T}_\omega = \frac{I_m(\omega)}{I_b(\omega)} \quad (4)$$

根据式(4)，目标光谱可通过光谱仪测得，关键在于基线的拟合方法，基线拟合的好坏严重影响到测距的精度。而测量光谱的带外数据的质量会给基线拟合带来较大影响。所以首先要对带外数据进行筛选，以达到最佳拟合。

1.2 被测目标测距模型

利用 Malkmus 带模型建立不同环境下的透过率模型，与实测光谱信号反演的透过率进行拟合，反演被测目标距离，建立的测距数据库如表 1 所示。其中， θ_i 为天顶角， z_f 是海拔高度， \bar{T}_i 为理论计算的带平均透过率， R_i 为被测目标距离。

表 1 测距数据库

Table 1 The ranging database

z_f	R_1	R_2	R_3	...
θ_1	\bar{T}_{11}	\bar{T}_{12}	\bar{T}_{13}	...
θ_2	\bar{T}_{21}	\bar{T}_{22}	\bar{T}_{23}	...
θ_3	\bar{T}_{31}	\bar{T}_{32}	\bar{T}_{33}	...
...

1.3 仪器函数与分辨率的关系

因傅里叶变换光谱仪具有高通量、高光谱分辨率等优点，采用傅里叶变换光谱仪，基本原理如图 1 所示。其中 L 为动静移动的最大距离即最大光程差。根据仪器函数与分辨率的数值计算方法^[11-12]可知，当采用切址函数为矩形函数时，光谱仪的仪器函数为

$$f(\nu) = 2L \text{sinc}(2\pi\nu L) \quad (5)$$

式(5)中， ν 为光谱波数。根据瑞利判据，仪器的分辨率^[13]为

$$R_{II} = \frac{\nu}{\delta\nu} = 2L\nu \quad (6)$$

根据光谱仪设定的分辨率求解光程差，可求得仪器函数。考虑仪器函数对透过率的影响，降低仪器测量带来的误差。

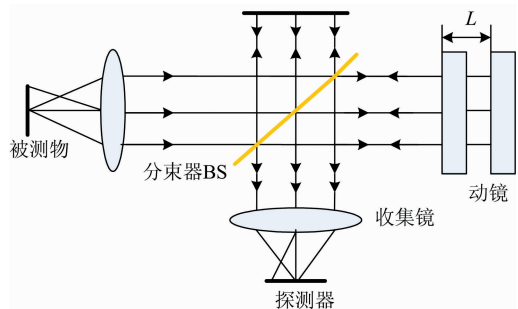


图 1 傅里叶变换干涉仪原理图

Fig. 1 The principle diagram of Fourier transform interferometer

2 仪器分辨率对测距的影响分析

2.1 相同距离下不同分辨率影响

为了检验光谱分辨率对测距的影响，将 300 W 卤素灯光源固定于 46.4 m 处，光谱仪分别采用 1, 2, 4, 8, 16 和 32 cm^{-1} 的分辨率，测得不同分辨率下的原始光谱如图 2 所示，当距离更近时光谱分辨率越低，测得光谱吸收越不明显，32 cm^{-1} 时氧分子吸收的双峰结构不突出；分辨率为 1 cm^{-1} 时双

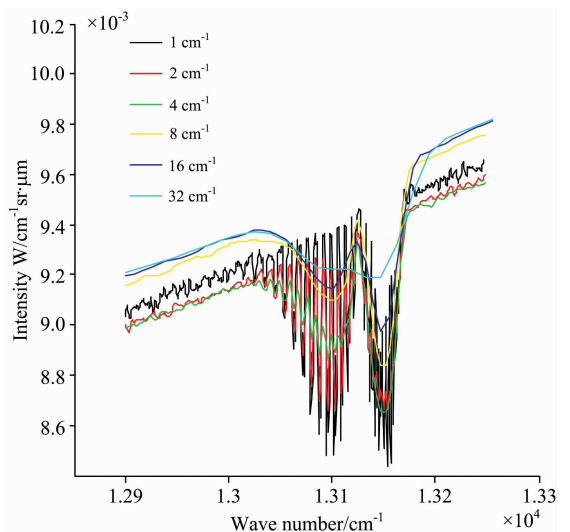


图 2 不同分辨率下的原始光谱

Fig. 2 Original spectrum with different resolution

峰结构非常清晰。用不同分辨率下的透过率来表达,如图 3 所示,分辨率越高,则氧气 A 带透过率越小,氧分子吸收越明显。但并不是说分辨率越高,吸收越多,而是光谱仪处理方法不同,效果有所差别,分辨率较低时,氧气 A 带内的所有频率成分取平均效果;分辨率越高,则越能反映光谱吸收的细节。

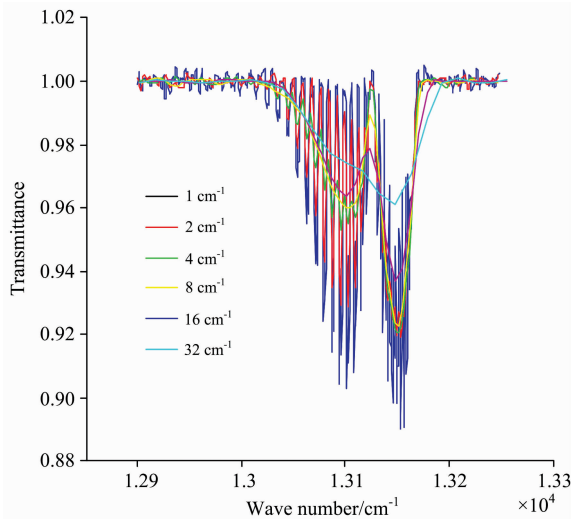


图 3 不同分辨率下的透过率

Fig. 3 The transmittance with different resolution

2.2 不同距离处分辨率对单谱线测量的影响

分别在 10~130 m 内 9 个测量点处获得光谱信息,在单个频率成分 13 105 cm^{-1} 处,获得各点透过率,如图 4 所示,不同分辨率下获得的距离与透过率的关系曲线。相同距离下透过率受分辨率的影响情况如表 2 所示,当分辨率为 1, 2, 4 和 8 cm^{-1} 时,实测值与预测值的相关系数分别为 0.994 1, 0.993 5, 0.984 8 和 0.812 7。

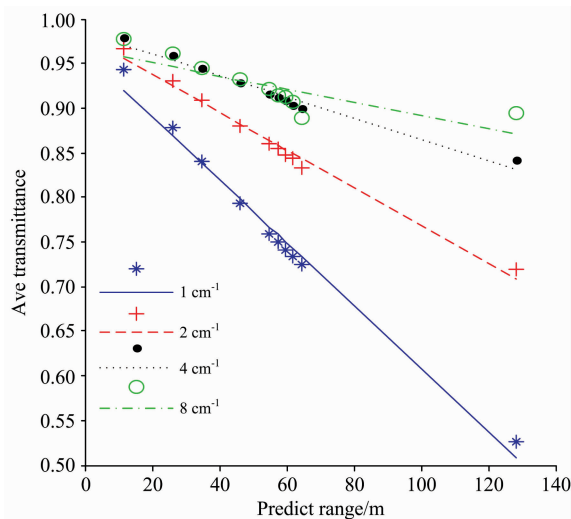


图 4 不同分辨率下透过率与距离变化关系

Fig. 4 The transmittance and range with different resolution

可见,对单谱线测量,分辨率越低,预测值与实测值的相关程度越低,即测量误差越大;相反,高分辨率的测量值与预测值相关系数越大,且高分辨率测量,可产生高透过率。但并非分辨率越高越好,因为分辨率越高,积分时间越长,一次测量所消耗的时间越长,如分辨率为 0.16 cm^{-1} 时,光谱测量时间约 40 s,且数据量大,测距模型执行一次所需时间为 4.4 s,不能做到实时测量。所以,在满足实时、快速测量的误差范围内适当选择光谱分辨率来满足实际需求。

表 2 相同距离下透过率受分辨率影响情况表

Table 2 Influence of resolution on transmittance at the same distance

分辨率/ cm^{-1}	相关系数
1	0.994 1
2	0.993 5
4	0.984 8
8	0.812 7

2.3 分辨率对带模型测距的影响

实验表明,建立测距数据库后,不同分辨率下,被测目标距离精度最终受带平均分辨率的拟合精度影响,因此,随机带模型预测各距离点处的带平均吸收率,如图 5 所示。近距离下,吸收率与分辨率的依赖关系较小,但随着距离的逐步增大,带平均吸收误差逐渐增大。而测距模型的计算主要依赖于谱线参数,谱线参数受周围环境影响较大,且氧分子浓度随海拔高度的增加变化明显。单谱线受分辨率的影响大,通过基线拟合计算带平均透过率,分辨率越高,则越能反映单条光谱的细节,极大地摒除了谱线之间的无吸收成分的干扰,获得更准确的带平均透过率,降低预测模型的测距误差。当然,对于精度要求不高,只需目标出现在预警范围内即可报警的场合,则优先选择低分辨率的测量,可实现快速报警的目的。

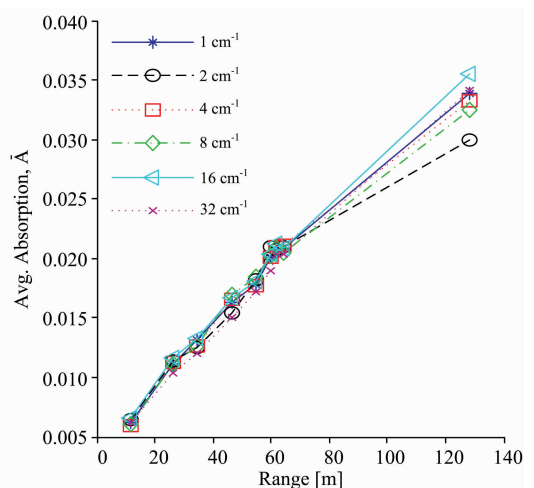


图 5 不同分辨率下带平均吸收与距离关系

Fig. 5 Band avg. absorption and range profile with different resolution

3 结 论

根据 HITRAN2016 数据库, 结合透过率计算方法, 分析了相同距离下不同分辨率对透过率的影响, 得知, 分辨率越高, 则更能够反应光谱吸收的细节, 适用于不考虑运行时间, 重视光谱细节的应用, 但如果要实现被测目标的实时高速测量, 则需要考虑采用分辨率较低的测量方法。文中还分析了不同距离下分辨率对单谱线的影响, 根据吸收系数计算方法, 对单谱线测量, 分辨率越低, 预测值与实测值的相关

程度越低, 即测量误差越大; 反之, 高分辨率的测量值与预测值相关系数越大, 且高分辨率测量, 可产生高透过率; 但分辨率越高, 积分时间越长, 一次测量所消耗的时间相对长, 不能做到实时测量。依据随机带模型, 分析了分辨率对带模型测距方法的影响, 结合实验测得光谱数据给出被测距离与相应带平均透过率之间的关系曲线, 验证了分辨率对透过率的影响较大, 分辨率越高, 则测距越准确, 但同时消耗的时间越长。该结论为利用氧气 A 带进行目标预警和细节分析提供了仪器选择的依据。

References

- [1] Richardson M, Stephens G L. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11(3): 1515.
- [2] FENG Yu-tao, WU Kui-jun, FU Di(冯玉涛, 武魁军, 傅 頔). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2019, 48(2): 0201001.
- [3] WANG Yue, LÜ Da-ren, HUO Juan(王 越, 吕达仁, 霍 娟). Progress in Natural Science(自然科学进展), 2006, 16(7): 850.
- [4] Rosas J, Houborg R, McCabe M. Remote Sensing, 2017, 9(10): 988.
- [5] Davis A B, Kalashnikova O V. Radiative Transfer and Light Scattering, 2019.
- [6] LI Jin-hua, WANG Zhao-ba, WANG Zhi-bin(李晋华, 王召巴, 王志斌). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2014, 34(9): 2582.
- [7] LI Jin-hua, WANG Zhao-ba, WANG Zhi-bin(李晋华, 王召巴, 王志斌). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2017, 25(1): 28.
- [8] Moy M L, Harrington K F, et al. Respiratory Medicine, 2019, 149: 52.
- [9] Gordon I E, Rothman L S, Hill C, et al. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2017, 203: 3.
- [10] LI Jin-hua, ZHANG Min-juan, ZHANG De-long(李晋华, 张敏娟, 张德龙). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2017, (8): 0811001.
- [11] Popovic Maja, Potocnik Jelena, Bundaleski, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2017, 398: 48.
- [12] Liu X, Guo J, Hu J, et al. Remote Sensing, 2019, 11(3): 355.
- [13] WANG Jun-feng, YE Han-han, YI Wei-ning, et al(汪俊锋, 叶函函, 易维宁, 等). J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报), 2018, 37(5): 613.

The Effect of Instrument Resolution on Passive Ranging of Oxygen A Band

LI Jin-hua^{1,2}, ZHANG Min-juan^{1,2}, WANG Zhi-bin^{1,2}, LI Shi-zhong^{1,2*}

1. Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China

2. North University of China, Taiyuan 030051, China

Abstract The calculation of transmittance is the core of infrared target passive ranging technology, the accuracy of the measured distance is directly affected by accuracy, while the instrument's resolution directly affects the precision of the spectral signal. In order to study the influence of spectral resolution for transmittance, the calculation method of transmittance and the influence factors of the instrument function in the passive ranging system are analyzed. The experimental system is set up to verify the influence of instrument resolution on passive ranging. Firstly, the calculation method of oxygen A band transmittance is introduced, and the theoretical value is calculated. With a halogen lamp as the light source, the spectral curve under different resolutions was measured by the spectrometer at a certain distance, and the measured atmospheric transmittance was calculated. Then, based on the analysis and comparison of the transmittance model and measured transmittance spectrum, the calculation model was fitted and corrected. For a single spectral line, the measured spectral lines with a different resolution of the instrument differ greatly, while for the spectral line with an average point, the spectral signal with the same wave point is

averaged to obtain the average effect so that the measured spectral line almost does not change. Specific resolution model selection should be based on different applications, different precision requirements to choose the appropriate resolution. The experimental results show that resolution greatly influences on the transmittance of a single spectral line. With the decrease of resolution, the less the value of captured spectral information points is, the smaller the correlation coefficient of measured target distance will be. The resolution has little effect on the calculation of the average band transmittance, and the measured target distances under different resolutions almost coincide. The higher the instrument's resolution is, the longer the measurement time will be. When the average transmittance is used to calculate the distance of the measured target, the instrument resolution can be appropriately reduced within the accuracy requirements to greatly improve the measurement speed, achieve real-time measurement, and reduce the cost of system construction. The conclusion can provide a basis for the engineering application of transmittance measurement.

Keywords Instrument resolution; Oxygen A band; Transmittance; Passive ranging; Curve fitting

(Received May 7, 2021; accepted Sep. 11, 2021)

* Corresponding author