

氧气 A 带目标红外距离反演算法仿真及 实验研究

王志斌^{1,2} 宗鹏飞^{1,2} 李 晓^{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 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要 目标红外测距的实现同气体及其波段的选取密切相关。氧气 A 吸收带具有独特的谱线结构, 对于火箭羽流或者高温辐射体的距离探测, 氧气 A 吸收带是最佳的距离反演通道。通过深入研究逐线积分算法, 设计了氧气 A 带标准光谱计算软件; 利用吸收带带外数据, 采用基线拟合的方法反演不同距离的带平均透射率, 进而得到相应的距离。将 ABB 灯作为被测光源, 在不同的距离下采集相应的光谱, 并进行拟合计算, 将实测数据的拟合计算结果同理论计算结果进行对比验证, 其误差低于 0.5%, 在允许范围内。

关键词 光谱学; 逐线积分; 红外测距; 氧气 A 吸收带

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0815002

Oxygen 'A' Absorption Band Simulation of Infrared Distance Inversion Algorithm and Experimental Research

Wang Zhibin^{1,2} Zong Pengfei^{1,2} Li Xiao^{1,2}

(¹ Shanxi Provincial Research Center for Opto-Electronic Information and Instrument Engineering Technology,
North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China
² Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract Realization of passive ranging based on infrared radiation and atmospheric attenuation characteristics is closely related to gas band selection. Oxygen A absorption band has a unique spectral structure. For rocket plume and high temperature radiation, the band is the best inversion channel of distance. Through the in-depth research of line-by-line radiative transfer model (LBLTRM), Oxygen A band standard spectrum calculation software is designed. Making use of the out-of-band data, band average transmittance in different distances is obtained by polynomial fitting, and then the corresponding distance is received. Putting the ABB lamp as the light source, collecting the corresponding spectrum in different distances and making the fitting calculation, through the comparison of fitting results of the measured datas and theoretical calculation results, the error is within 0.5% and is in the permissible range.

Key words spectroscopy; line-by-line radiative transfer model; infrared ranging; oxygen A band

OCIS codes 300.6320; 300.6390; 300.6380; 280.4991; 260.3090

1 引 言

基于目标红外测距技术受到越来越多的关注, 相比激光测距, 目标红外测距具有隐蔽性强和设备体积小等特点, 其核心是对大气衰减特性的研究。

本文深入研究了逐线积分算法以及氧气 A 吸收带的谱线特点, 精确计算了氧气 A 吸收带平均透射率; 利用吸收光谱的带外数据, 采用多项式拟合方法, 进行基线拟合, 进而计算带平均透射率。通过比

收稿日期: 2013-01-14; 收到修改稿日期: 2013-04-15

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项基金(61127015)、国际科技合作项目(2013DFR10150, 2012DFA10680)

作者简介: 王志斌(1966—), 男, 教授, 主要从事信号与信息处理、光电信息技术和光电检测等方面的研究。

E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

较二者结果,基线拟合结果比较理想。

2 目标红外光谱测距原理

目标红外光谱测距技术^[1-2]是一种基于目标的红外辐射光谱特性和大气中气体分子吸收光谱以及

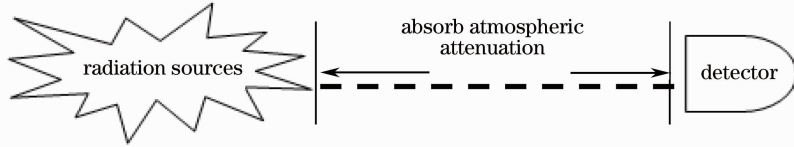


图 1 基于氧气衰减吸收的被动测距示意图

Fig. 1 Passive ranging based on oxygen absorption and attenuation

探测器得到的红外光谱 $I_t(\omega)$ 与目标真实光谱基线 $I_0(\omega)$ 之间的比值为

$$T_\omega = \frac{I_t(\omega)}{I_0(\omega)}, \quad (1)$$

式中 T_ω 为透射率,根据 Lambert-Beer 定律,大气透射率与距离关系可表示为

$$T_\omega = \exp[-\sigma(\nu) \cdot N \cdot L], \quad (2)$$

式中 σ 是吸收截面, N 是气体浓度, L 是目标到探测器的距离。利用氧气 A 吸收带带外的数据拟合出 A 吸收带内的光谱基线 $I_0(\omega)$, 进而得到透射率与距离 L 的关系。

3 氧气 A 吸收带的逐线积分模式

在红光和近红外之间存在 3 个由氧气分子吸收形成的吸收带,依据中心波长从小到大的顺序,它们依次被命名为氧气 γ 带(14750~15900 cm^{-1})、B 带(14300~14600 cm^{-1})和 A 带(12850~13250 cm^{-1})。在 A 吸收带^[3],氧气是唯一的吸收气体,其谱线为分布规则的双峰结构,由氧气分子磁偶极矩转动跃迁而形成,目前已经证明氧气通道基本不受水汽吸收的影响,是非常好的反演通道。

逐线积分^[4]是逐条计入大气气体吸收谱线贡献的一种精确的计算透射率的方法。单一气体的吸收带由几千几万条吸收谱线组成。在吸收带内,吸收系数的变化非常大。在吸收线中心附近,波数改变 0.01 cm^{-1} ,吸收系数就会有几个数量级的变化,而在吸收区的翼区,吸收系数的变化相对缓慢。对于给定的气体成分,某一确定波数上的透射率就是邻近所有 n 条谱线的吸收效应叠加的结果。因此,为了精确计算该波段范围内经过光程 L 后的气体平均透射率 τ ,可用数值积分的方法进行逐线积分。

单条谱线的平均透射率为

比尔吸收定律的空中红外目标测距技术与方法。目标红外测距示意图如图 1 所示,目标辐射源辐射的红外光经过大气传输衰减之后,被探测器接收到,并最终得到其光谱。

$$\tau(\nu) = \frac{1}{\Delta\nu} \int \left\{ \exp \left[- \int_0^L \sigma(x, \nu) N(l) dl \right] \right\} d\nu, \quad (3)$$

式中 $\sigma(x, \nu)$ 是该条谱线在波数 ν 处的吸收系数, $N(l)$ 是 l 处的吸收分子浓度。在分子的单线吸收处理中,假定在 $\Delta\nu$ 内只有一条光谱线。

若光谱间隔 $\Delta\nu$ 包含有 n 条谱线,则平均透射率为

$$\tau(\nu) = \frac{1}{\Delta\nu} \int \left\{ \exp \left[- \sum_{i=1}^n \int_0^L \sigma_i(x, \nu) \times N(l) dl \right] \right\} d\nu, \quad (4)$$

式中 σ_i 是第 i 条谱线在波数 ν 处的分子吸收系数。

分子吸收系数是积分线强 S 与谱线线型 $f(\nu)$ 的卷积:

$$\sigma(x, \nu) = S \otimes f(\nu), \quad (5)$$

式中线强 S 从 HITRAN 数据库^[5]获得。HITRAN 数据表中列出了吸收线参数,包括谱线位置(以 cm^{-1} 为单位)、谱线强度(以 296 K 时的 $\text{cm}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ 为单位)、空气半展宽(以 296 K 时的 $\text{cm}^{-1} \text{atm}^{-1}$ 为单位, 1 atm = 1×10^5 Pa)以及低能态能量(以 cm^{-1} 为单位)等。由于参数都是在 296 K 标准温度下给出的,线强参数的温度修正可表示为

$$S = S_0 \left(\frac{T_0}{T} \right)^\beta \exp \left(\frac{E''}{k_B T_0} - \frac{E''}{k_B T} \right), \quad (6)$$

式中 S_0 是参考温度为 T_0 时的线强, E'' 为低能态跃迁能量, k_B 为玻耳兹曼常数,指数 β 可因分子不同而异,一般来说,对线形分子,可取 1,对非线性分子,可取 1.5,对臭氧可取 2.5。

由于实际光谱测量设备都不会处于理想状态,测量时会给光谱中引入各种误差因素,导致光谱分辨率^[6]下降。通常用仪器线型(IILS, X_{IILS})函数来衡量光谱仪对分辨率的影响,数学上可以由理论光谱和 IILS(X_{IILS})的卷积来描述:

$$L_{\text{measure}} = L_{\text{theory}} \otimes X_{\text{ILS}}, \quad (7)$$

式中 L_{measure} 指实际探测到的光谱值, L_{theory} 指理想状态下的测量光谱值。

通过以上对逐线积分理论的深入研究, 本文将逐线积分在 Matlab 中程序实现, 并且设计了光谱计算软件, 如图 2 所示。图中第三幅图就是在光谱仪分辨率为 32 个波数的条件下计算得到的光谱图。

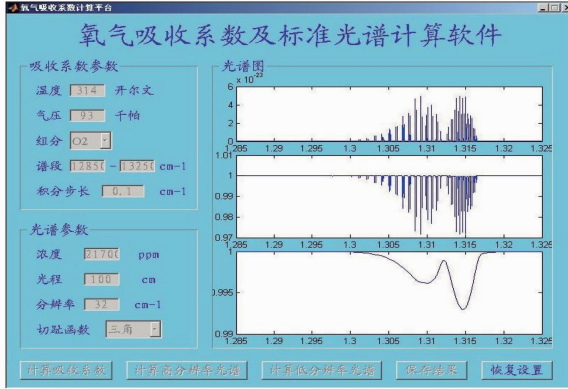


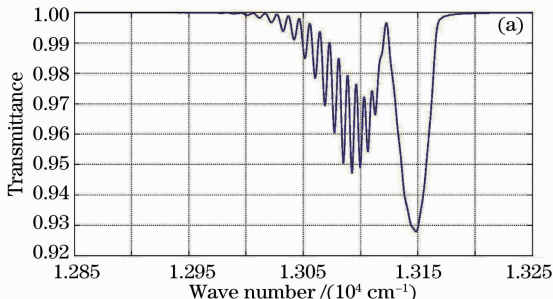
图 2 氧气吸收系数及标准光谱
计算软件界面

Fig. 2 Software interface of oxygen absorption coefficient and standard spectrum calculation

4 带平均吸收与基线拟合

4.1 基线拟合原理

基线拟合^[7-8]就是利用得到的吸收光谱拟合出吸收前的光谱。在目标红外光谱被动测距中, 目标的红外辐射穿过大气层到达探测装置时, 会由于被气体吸收和散射等因素衰减后到达探测器, 最终可以得到吸收谱图。以氧气 A 带为例, 首先计算氧气 A 带的吸收光谱, 其主要吸收波段范围为 $13000 \sim 13170 \text{ cm}^{-1}$, 由于氧气 A 吸收带两边的吸收为零, 因此, 利用吸收带两边的数据, 采用多项式拟合的方法, 即可以拟合出基线, 进而, 可以在未知被测物的情况下, 计算其带平均透射率。



4.2 带平均吸收

最早的单目被动测距是假定一种最简单的情況, 由比尔吸收定律:

$$dI = -k(u)Idl, \quad (8)$$

式中 k 为吸收系数并且是时间频率 u 的函数, I 为沿着路径 dl 辐射的源强度。而比尔吸收定律只适用于单频光。真实的探测器并不能测量到单频光, 而是一定频率范围内探测到的强度的平均值。因此, 采用带宽平均吸收方法^[7], 该方法利用拟合的基线(表示吸收之前, 目标的辐射强度)计算带平均透射率^[9]:

$$\bar{T}(\nu) = \frac{\bar{I}(L)}{I_0} = \frac{1}{\Delta\nu} \int T(\nu) d\nu = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\nu_i}^{\nu_f} \exp(-\tau_\nu) d\nu, \quad (9)$$

式中 T 是单频光的透射率, τ 是单频光的光学深度, ν_i 和 ν_f 代表频带边界值。在整个辐射衰减的过程中, 假定散射、反射等因素是可以忽略的, 则带平均吸收 \bar{A} 可以表示为

$$\bar{A} = 1 - \frac{\sum_{\nu_i}^{\nu_f} I(\nu)}{\sum_{\nu_i}^{\nu_f} I_b(\nu)} \approx 1 - \frac{\sum_{\nu_i}^{\nu_f} T(\nu)}{\sum_{\nu_i}^{\nu_f} T_b(\nu)}, \quad (10)$$

式中下标 b 代表基线的值。

5 带平均透射率的计算及实验结果

5.1 氧气 A 带的逐线积分计算结果

通过以上算法的详细阐述, 该部分进行详细的仿真, 分别在距离为 60 m 和 100 m 对氧气 A 带进行逐线积分^[9]进行计算, 计算结果如图 3 所示。

图 3(a) 是氧气 A 带在距离 $L=60 \text{ m}$ 处的透射率谱线, 图 3(b) 是氧气 A 带^[10] 在距离 $L=100 \text{ m}$ 处的透射率谱线, 其吸收波段主要集中在 $13000 \sim 13170 \text{ cm}^{-1}$, 即 $760 \sim 770 \text{ nm}$ 波段, 因此, 在 60、100、12 m 处该波段的带平均透射率分别为 0.9764、

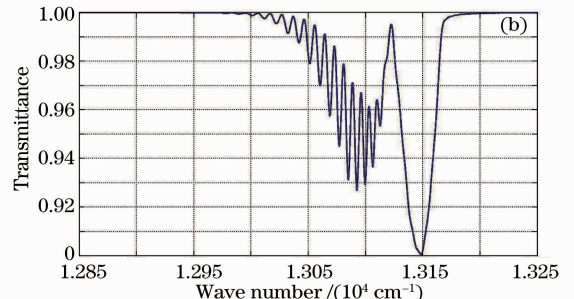


图 3 不同距离的氧气 A 带的透射率。(a) 60 m; (b) 100 m

Fig. 3 Oxygen A transmittance in different distances. (a) 60 m; (b) 100 m

5.2 实验结果

通过逐线积分精确的计算,为实验提供了理论基础。为了验证该算法的可行性,设计了如下实验,其装置如图4所示。图4(a)中左边是ABB光源,旁边是瞄准镜和望远镜,通过蓝色光纤与Ocean光

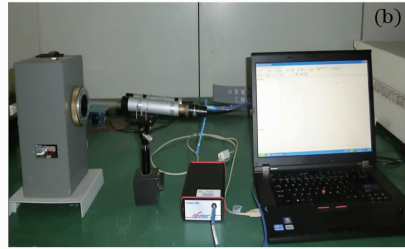
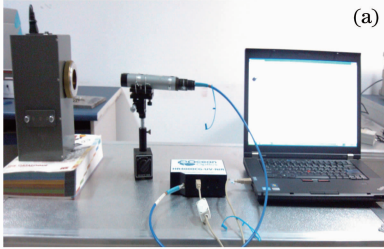


图4 实验装置实物图。(a) Ocean; (b) Arantes

Fig. 4 Pictures of experimental device. (a) Ocean; (b) Arantes

两种光谱仪参数如下:

Ocean 光纤光谱仪参数——型号:HR4000;狭缝宽度 $10\ \mu\text{m}$;波长范围:200~1050 nm;光学分辨率:0.75 nm;信噪比:300:1全光谱。

Avantes 光纤光谱仪参数——型号:AvaSpec-3648;狭缝宽度 $10\ \mu\text{m}$;75 mm 焦距;波长范围:

200~1100 nm;光学分辨率:0.5 nm;信噪比:350:1。

5.2.1 Ocean 光谱仪

将 ABB 光源放置在空旷的广场,移动光谱仪的位置,分别在 60 m 和 100 m 的位置进行光谱采集,结果如图 5 所示。

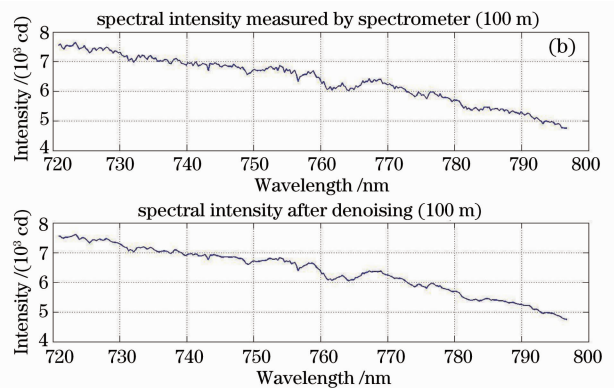
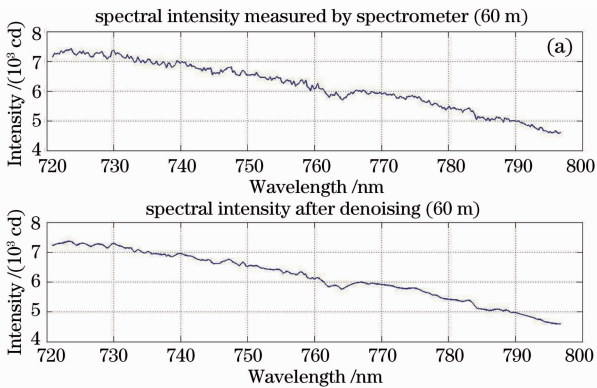


图5 不同距离的被测光谱和去噪后光谱(Ocean)

Fig. 5 Measured spectra and spectra after denoising in different distances (Ocean)

图5为光谱仪采集到的光谱,采用小波去噪^[11-12]进行噪声处理,得到平滑的谱线。利用吸收带两边的数据,采用多项式插值拟合进行基线拟合,拟合结果如图6所示。

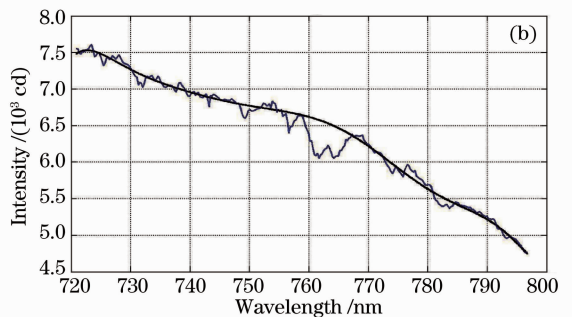
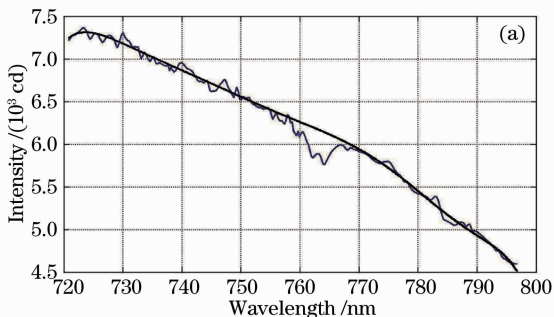


图6 基线拟合结果(Ocean)。(a) 60 m; (b) 100 m

Fig. 6 Baseline fitting results (Ocean). (a) 60 m; (b) 100 m

因此,将被测光谱谱线与基线相比,就可以得到透射率谱线如图 7 所示。

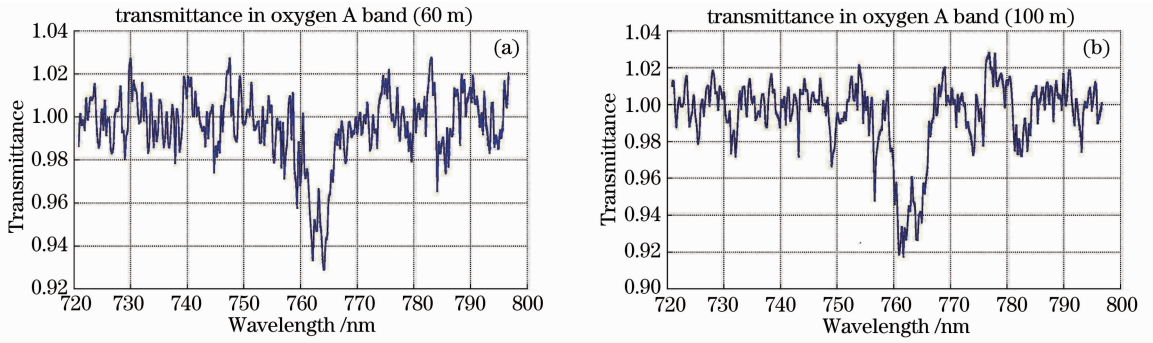


图 7 不同距离的氧气 A 带的实测透射率(Ocean)。(a) 60 m; (b) 100 m

Fig. 7 Oxygen A transmittance in different distances (Ocean). (a) 60 m; (b) 100 m

5.2.2 Avantes 光谱仪

同样的装置使用 Avantes 光谱仪,在 60 m 和 120 m 的位置进行光谱采集,结果如图 8 所示。

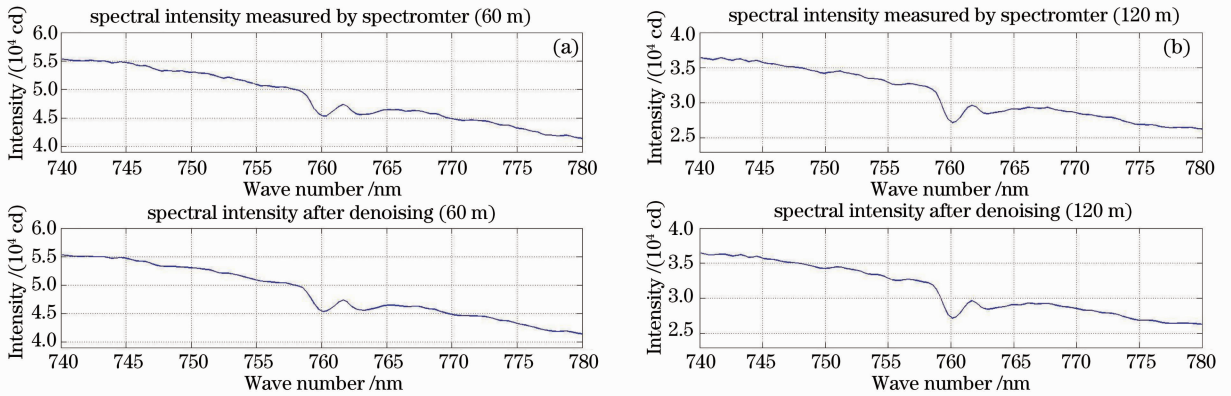


图 8 不同距离的被测光谱和去噪后光谱(Avantes)。(a) 60 m; (b) 120 m

Fig. 8 Measured spectra and spectra after denoising in different distances (Avantes). (a) 60 m; (b) 120 m

图 8 为光谱仪采集到的光谱,采用小波去噪进行噪声处理,得到平滑的谱线。利用吸收带两边的数据,采用多项式拟合的方法进行基线拟合,拟合结果如图 9 所示。

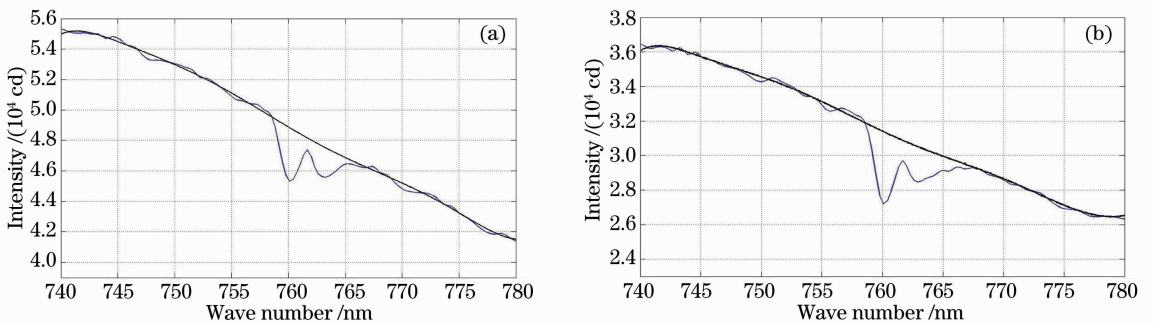


图 9 基线拟合结果(Avantes)。(a) 60 m; (b) 120 m

Fig. 9 Baseline fitting results (Avantes). (a) 60 m; (b) 120 m

将图 9 中拟合的基线与被测光谱谱线相比,就可以得到透射率谱线如图 10 所示。

以上就是本实验采集数据并进行数据拟合分析的全过程,5.2.1 节和 5.2.2 节这两部分是数据实

验结果的显示,本文经过多次实验数据的采集,对其误差进行了详细的计算,计算结果如表 1 和表 2 所示。

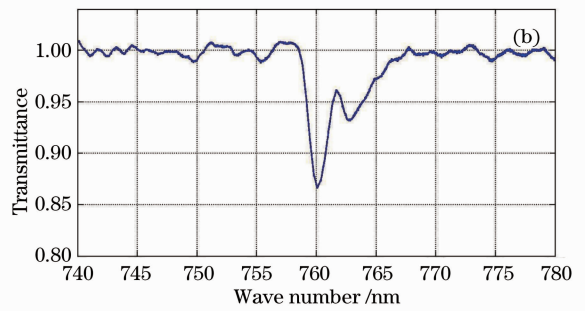
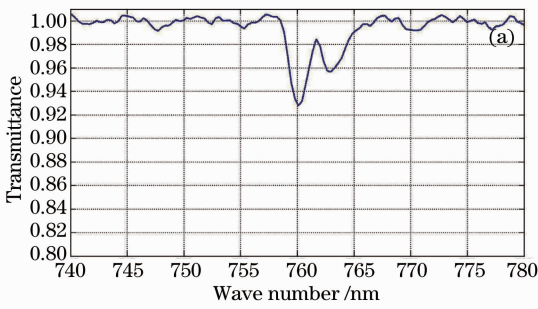


图 10 不同距离的氧气 A 带的实测透射率(Avantes)。(a) 60 m; (b) 120 m

Fig. 10 Oxygen A transmittance in different distances (Avantes). (a) 60 m; (b) 120 m

表 1 Ocean 光谱仪的数据采集结果和误差

Table 1 Data acquisition results and error in

Ocean spectrometer				
	60 m	error	100 m	error
1	0.9706	0.60%	0.9481	0.95%
2	0.9683	0.83%	0.9528	0.46%
3	0.9735	0.30%	0.9522	0.52%
4	0.9822	0.60%	0.9630	0.61%
Theoretical value	0.9764	0	0.9572	0

表 2 Avantes 光谱仪的数据采集结果和误差

Table 2 Data acquisition results and error in

Avantes spectrometer				
	60 m	error	120 m	error
1	0.9738	0.27%	0.9481	0.20%
2	0.9703	0.62%	0.9454	0.08%
3	0.9792	0.29%	0.9396	0.68%
4	0.9726	0.39%	0.9408	0.20%
Theoretical value	0.9764	0	0.9462	0

从表中可以清晰地看到, Ocean 光谱仪的误差小于 1%, 而 Avantes 光谱仪的误差基本上小于 0.5%, 比较而言, 后者的精度更高。从采集到的光谱可以看到, Ocean 光谱仪本身的噪声比较大, 因此造成最后透射率谱的误差也较大。但是 Avantes 的采集光谱比较平滑, 得到的透射率谱图也比较理想, 误差在允许范围内。总之, 两个实验都验证了该方法的可行性, 为测距提供了一种新的思路, 也为氧气 A 吸收带开辟了新的应用途径。

6 结 论

通过深入研究逐线积分和氧气 A 带, 详细阐述了氧气 A 的目标红外测距方法, 并实现了理论仿真和实验验证, 实验结果与理论仿真结果误差非常小, 进而证明了该方法的可行性, 为目标红外测距提出了新的方法和思路。为今后透射率数据库的建立以及实时测距提供了一定的理论基础和实践基础。但是, 在环境恶劣的情况下, 就需要考虑更多问题,

也为下一步研究工作提供了新的思路。

参 考 文 献

- 1 Michael R Hawks. Passive Ranging Using Atmospheric Oxygen Absorption Spectra [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2006.
- 2 Michael R Hawks. Passive ranging of dynamic rocket plumes using infrared and visible oxygen attenuation [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2011.
- 3 D Q Wark, D M Mercer. Absorption in the atmosphere by the oxygen 'A' band[J]. Appl Opt, 1965, 4(7): 839-845.
- 4 Zhang Hua, Shi Guangyu. A fast and efficient line-by-line calculation method for atmospheric absorption [J]. Chinese J Atmospheric Sciences, 2000, 24(1): 112-122.
- 5 L S Rothman, D Jacquemart, A Barbe, et al.. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database [J]. J Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2005, 96: 139-204.
- 6 Long Jingming, Zhou Weidong, Wu Zhiwei. A high sensitive spectral detection system of gaseous measurement based on labVIEW[J]. Chinses J Lasers, 2013, 40(1): 246-249. 龙精明, 周卫东, 吴志伟. 基于 Labview 的气体高分辨率光谱探测系统[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 246-249.
- 7 Guo Aiyan, Bai Tingzhu, Hu Haihe, et al.. Analysis of ultraviolet radiation characteristics of solid propellant rocket motor exhaust plume [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1016002. 国爱燕, 白延柱, 胡海鹤, 等. 固体火箭发动机羽烟紫外辐射特性分析[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1016002.
- 8 R Vincent. Passive ranging of dynamic rocket plumes using infrared and visible oxygen attenuation [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2011: 3-25.
- 9 Fang Jing, Liu Wenqing, Zhang Shu. A line-by-line trace gas absorption model and its application in FTIR gas detection [J]. Infrared, 2007, 28(8): 27-32. 方 静, 刘文清, 张 舒. 逐线积分气体吸收模型及其在 FTIR 气体检测中的应用[J]. 红外, 2007, 28(8): 27-32.
- 10 Michael R Hawks. Passive Ranging of Emissive Targets Using Atmospheric Oxygen Absorption Lines [C]. SPIE, 2005, 5811: 112-122.
- 11 Li Jianxin, Cui Yanjun, Zhu Rihong, et al.. Micro-displacement variation measurement by using laser interference based on wavelet transform [J]. Chinses J Lasers, 2012, 39(8): 0808002. 李建欣, 崔艳军, 朱日宏, 等. 基于小波变换的激光干涉微位移变化量测量方法[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0808002.
- 12 Li Shuo, Wang Shanqin, Zhang Meiqin. Comparison among principal component regression, partial least squares regression and back propagation neural network for prediction of soil nitrogen with visible-near infrared spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0831001. 李 硕, 汪善勤, 张美琴. 基于可见近红外光谱比较主成分回归、偏最小二乘回归和反向传播神经网络对土壤氮的预测研究. [J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0831001.

栏目编辑: 李文洁