

氧气 A 吸收带平均透过率的多光谱非成像测量

余 皓¹, 刘秉琦¹, 张 瑜², 闫宗群³, 华文深¹, 胡文刚¹

¹军械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

²北京系统工程研究所, 北京 100101; ³装甲兵工程学院控制工程系, 北京 100072

摘要 为了解决氧气 A 吸收带被动测距中使用高光谱成像系统存在测量实时性差的问题, 提出了一种氧气 A 吸收带平均透过率的多光谱非成像测量方法。该方法利用 3 个窄带滤光片分别采集目标位于氧气 A 吸收带及其左右带肩的辐射强度信息。选择光电倍增管作为光电转换器件, 在外场条件下开展氧气 A 吸收带平均透过率测量实验。建立了氧气 A 吸收带透过率的逐线积分模型, 通过对比实验测量值与模型理论值验证了该方法的可行性。对比结果表明, 在测量距离为 100~400 m 范围内, 氧气 A 吸收带平均透过率的测量误差在 0.146%~1.576% 之间, 证明了该方法的可行性。

关键词 大气光学; 平均透过率; 多光谱非成像; 氧气 A 吸收带; 逐线积分

中图分类号 TN976; TN219 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0401003

Multi-Spectral Non-Imaging Measurement for Average Transmission of Oxygen A Absorption Band

Yu Hao¹, Liu Bingqi¹, Zhang Yu², Yan Zongqun³, Hua Wenshen¹, Hu Wengang¹

¹Department of Electronics and Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

²Beijing Institute of System Engineering, Beijing 100101, China;

³Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China

Abstract In order to solve the problem of the poor real-time measurement caused by a hyperspectral imaging system in passive ranging based on oxygen A absorption band, a method of multi-spectral non-imaging measurement for the average transmission of oxygen A absorption band is proposed. In this method, the radiation intensity information of targets located in oxygen A absorption band and its left and right band shoulders is collected by three narrow band filters. Experiments are carried out to measure the average transmission of oxygen A absorption band in the external field, and a photomultiplier tube is used as the photoelectric converter. A line-by-line integral model for oxygen A absorption band transmission is built, and the feasibility of the proposed method is verified when we compare the experimental results with the theoretical results. The contrast results show that the measurement error of oxygen A absorption band average transmission is from 0.146% to 1.576% within the range of 100-400 m, which proves the feasibility of the proposed method.

Key words atmospheric optics; average transmission; multi-spectral non-imaging; oxygen A absorption band; line-by-line integral

OCIS codes 010.1290; 010.1030; 010.1320; 300.1030

1 引 言

基于氧气 A 吸收带的被动测距技术自 2006 年被 Hawks 等^[1]提出以来, 凭借其隐身无源、作用距离远等优势, 受到研究人员越来越多的关注。基于氧气 A 吸收带的被动测距技术利用大气中氧气 A 吸收带对目标近红外辐射的吸收来被动获取目标距离信息。Anderson 等^[2-3]对 F-16 战机和猎鹰 9 运载火箭开展了地

收稿日期: 2016-12-02; 收到修改稿日期: 2017-01-03

基金项目: 河北省自然科学基金(F2016506014)

作者简介: 余 皓(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: csujianyuoptic@163.com

导师简介: 刘秉琦(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电对抗和光电检测方面的研究。E-mail: whelmmail@sina.com

面和飞行测试,验证了该技术的可行性。国内研究人员对该技术进行了初步的理论和近程实验研究^[4-6],建立了 762 nm 氧气分子吸收带大气透过率的温压多项式^[7];王志斌等^[8]提出了利用多项式插值拟合算法对氧气分子吸收带进行基线拟合的方法;闫宗群等^[9]利用相关 K 分布法建立了非均匀路径的氧气吸收率与距离的关系模型;此外,研究人员还研究了背景辐射^[10]、气象条件^[11-12]以及测量设备光谱分辨率^[13-14]等因素对测距精度及最大测量距离的影响。

氧气 A 吸收带平均透过率的计算是基于氧气 A 吸收带被动测距技术的核心。目前的研究大多利用高光谱成像系统预先获取目标精密光谱信息来计算辐射传输路径上的氧气 A 吸收带平均透过率^[15-17]。利用高光谱成像系统虽然能够获取较高的光谱信息冗余,但在实际应用中高光谱成像系统的光谱扫描过程耗时较长,极大地降低了系统的测量实时性;此外,在测量动态目标时,目标光谱的提取容易受到成像质量的影响,导致测距误差较大,限制了氧气 A 吸收带被动测距技术的工程应用。

为了克服使用高光谱成像系统存在测量实时性差的问题,提出一种氧气 A 吸收带平均透过率的多光谱非成像测量方法,并通过实验验证了该方法的可行性。

2 测量原理

当红外军事目标(喷气式战机或导弹等)飞行时,其发动机尾焰可近似看作黑体。文献[6-10]详细介绍了氧气 A 吸收带被动测距的基本原理,由此可知,若能实时获取目标位于氧气 A 吸收带及其左右带肩 3 个波段内的光谱信息,便可利用基线拟合算法计算出氧气 A 吸收带的平均透过率:

$$\tau_{O_2} = I_2 / \left[I_{b1} + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_1} (I_{b3} - I_{b1}) \right], \quad (1)$$

式中 τ_{O_2} 为氧气 A 吸收带的平均透过率, I_{b1} 和 I_{b3} 分别为两侧带肩的基线强度, I_2 为氧气 A 吸收带内目标辐射到达接收系统前的辐射强度, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为 3 个波段所对应的中心波长。

基于上述基本原理,提出一种氧气 A 吸收带平均透过率的多光谱非成像测量方法,利用透过波段分别位于氧气 A 吸收带及其左右带肩波段内的窄带滤光片,分别获取目标相应波段的辐射强度值,并以光电倍增管作为系统的光电转换器件,避免了高光谱系统的光谱扫描过程,同时通过利用响应速率更快的点探测元件消除了成像质量对目标光谱提取的影响。

3 多光谱非成像实验系统设计

根据测量原理,结合氧气 A 吸收带及其左右带肩的波长位置,系统选用窄带滤光片的中心波长分别为 752, 765, 780 nm, 其透过率曲线如图 1 所示。在光学镜头前设置滤光片卡槽,测量过程中通过切换滤光片来实现不同波段目标辐射的采集。

光电倍增管(PMT)具有探测灵敏度高和线性度好等特点,选择 PMT 作为系统探测器,不仅能增大系统的最远探测距离,而且相比于高光谱系统具有成本低、体积小等优势。系统选用的 PMT(H10722-01 型,滨松中国)的光谱响应度曲线如图 2 所示。同时,为了能够观察和瞄准目标,在测量光路旁平行设置一个瞄准望远镜,多光谱非成像测距系统的结构示意图如图 3 所示。

在氧气 A 吸收带及其左右带肩的波数范围内,目标辐射光谱可近似为一条平滑曲线或直线。文献[18]中已经证明,采用直线拟合法可以达到较高的拟合精度且计算速度快,因此在氧气 A 吸收带及其左右带肩的波数范围内,可将基线强度值 $I_{b,v}$ 与波数 ν 的关系近似表示为

$$I_{b,v} = a\nu + k, \quad (2)$$

式中 a 和 k 为拟合系数。对于中心波长为 752 nm 和 780 nm 的滤光片而言,有

$$\begin{cases} I'_1 = \int_{\Delta\nu_1} I_{b_1,v} \times R_v \times \tau_v d\nu \\ I'_3 = \int_{\Delta\nu_3} I_{b_3,v} \times R_v \times \tau_v d\nu \end{cases}, \quad (3)$$

式中 I'_1 、 I'_3 为探测器在两带肩的输出值, $I_{b_1,v}$ 、 $I_{b_3,v}$ 为分别为两带肩处的基线强度值, R_v 为探测器的光谱响应

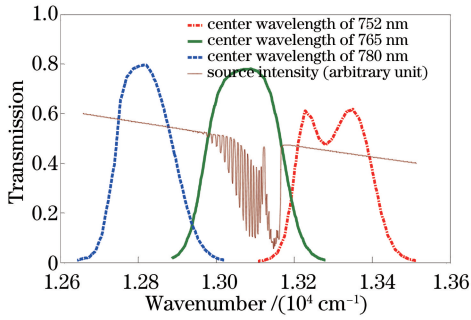


图 1 3 种窄带滤光片的透过率曲线
Fig. 1 Transmission curves of three narrow band filters

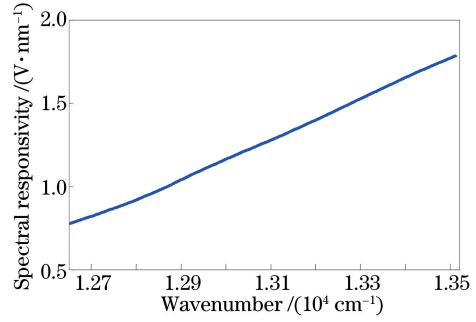


图 2 PMT 光谱响应度曲线
Fig. 2 Spectral responsivity curve of PMT

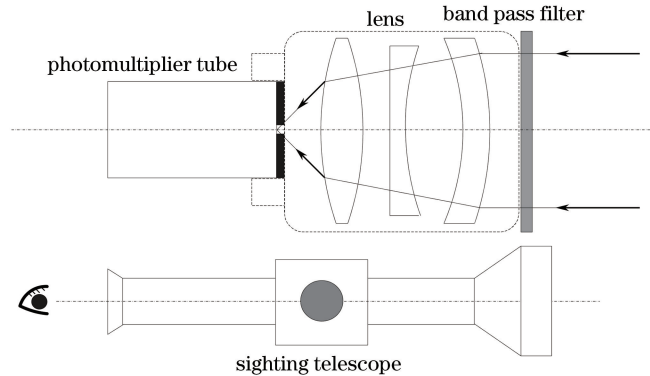


图 3 多光谱非成像测距系统的结构示意图
Fig. 3 Structural schematic of multi-spectral non-imaging ranging system

度, τ_v 为窄带滤光片的透过率。结合(2)、(3)式, 计算得到基线强度值 $I_{b,v}$ 。

对于中心波长为 765 nm 的滤光片, 由于其截止透过波段(即透过率大于 0 的范围)大于氧气 A 吸收带范围, 因此利用基线值对透过波段两端超出氧气 A 吸收带的部分进行剔除, 得到修正后的吸收带内目标辐射的测量值 I_2'' 为

$$I_2'' = I_2' - \int_{\Delta v_{A,out}} I_{b_2,v} \times R_v \times \tau_v dv, \quad (4)$$

式中 I_2' 为使用 765 nm 滤光片时探测器的输出值, $\Delta v_{A,out}$ 为 765 nm 滤光片透过率超出氧气 A 吸收带的波数部分。将(4)式代入(1)式, 得到氧气 A 吸收带的平均透过率为

$$\tau_{O_2} = \frac{I_2''}{\int_{\Delta \lambda_A} I_{b_2,v} \times R_v \times \tau_v dv}, \quad (5)$$

式中 $\Delta \lambda_A$ 为氧气 A 吸收带的波数范围(12948~13180 cm^{-1}), $I_{b_2,v}$ 为氧气 A 吸收带内的基线强度。

4 氧气 A 吸收带透过率的逐线积分模型

逐线积分法是一种逐条计入大气气体吸收谱线贡献的精确计算透过率的方法。单一气体的吸收带是由成千上万根吸收谱线组成的。对于给定的气体成分, 某一确定波数上的透过率就是临近所有 N 条谱线吸收效应的叠加, 因此在经过光程 L 后的 Δv 范围内, 透过率可表示为

$$\tau(v) = \frac{1}{\Delta v} \int_{\Delta v} \left\{ \exp \left[- \sum_{i=1}^N \int_0^L k_{v,i} \times N(l) dl \right] \right\} dv, \quad (6)$$

式中 $N(l)$ 为 l 处吸收气体的浓度; $k_{v,i}$ 为第 i 条谱线在波数 v 处的分子吸收系数, 可表示为积分谱线强度 S 与谱线线型函数 $f(v-v_0)$ 的卷积, 即

$$k_{v,i} = S \otimes f(v-v_0), \quad (7)$$

式中 S 可由 HITRAN^[19] 数据库获得, 并可根据实际大气温度、压强进行修正^[20-21]。谱线线型函数选择

Voigt 线型函数, 并采用文献[22]中的直和表达式计算 Voigt 线型。

为了缩短逐线积分的计算时间, 采用等间隔波数采样的方式选择吸收系数的采样点, 并在谱线中心左右 5 cm^{-1} 处进行线翼贡献截断。在 $P=1021.5 \text{ hPa}$ 、 $T=275.5 \text{ K}$ 的条件下, 利用逐线积分计算得到的氧气 A 吸收带的吸收系数如图 4 所示。将计算得到的吸收系数代入(6)式, 即可得到氧气 A 吸收带的平均透过率。

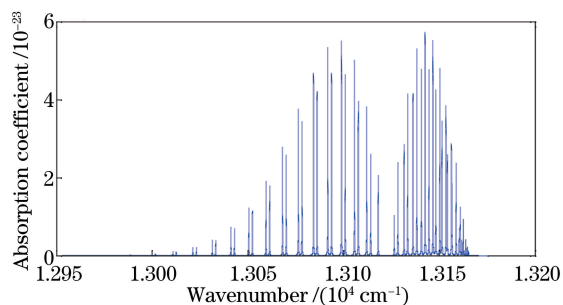


图 4 氧气 A 吸收带的吸收系数

Fig. 4 Absorption coefficient of oxygen A absorption band

5 实验及计算结果分析

实验选取一个功率为 1000 W 的卤钨灯作为目标, 其辐射光谱类似于色温为 3600 K 左右的黑体辐射, 卤钨灯的光谱范围和光谱辐射强度均满足实验需求。为了降低其他杂散光的干扰, 实验选择在中纬度冬季晴朗夜晚进行, 实验场地为一条笔直无人的马路。实验由近到远分别设置了 4 个目标点, 它们与测量起点的距离分别为 $100, 200, 300, 400 \text{ m}$, 测量得到各目标位置点的温度和压强如表 1 所示。利用实验系统采集目标在各波段的辐射强度, 并计算氧气 A 吸收带的平均透过率。采集过程中, 对每块滤光片的探测器输出电压值连续采集 3 min 并取均值, 对 4 个目标点循环采集 8 组数据, 分别计算各组测量值的氧气 A 吸收带平均透过率。同时, 利用逐线积分模型仿真计算出对应路径长度的氧气 A 吸收带透过率谱线图, 计算结果如图 5 所示。记录多光谱非成像系统在不同测量距离的氧气 A 吸收带平均透过率的测量结果, 表 2 中将中心波长为 $752, 765, 780 \text{ nm}$ 对应的 PMT 输出电压输分别标记为 A、B、C。图 6 中的透过率-距离曲线是通过将 4 个目标位置点的温度、压强平均值代入逐线积分模型计算得到的。

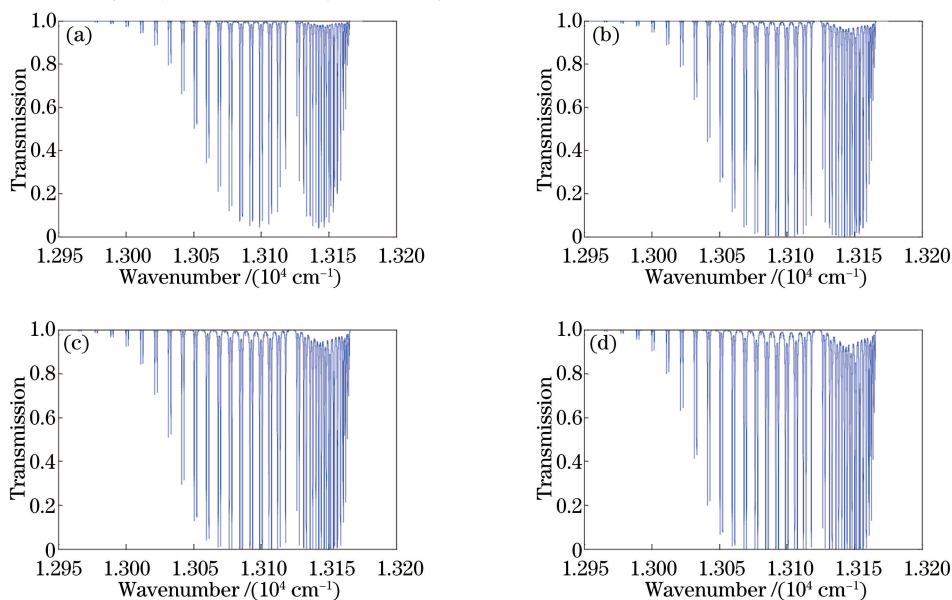


图 5 利用逐线积分模型计算得到的不同测量距离的氧气 A 吸收带透过率。(a) 100 m ; (b) 200 m ; (c) 300 m ; (d) 400 m
Fig. 5 Transmission of oxygen A absorption band at different measurement ranges calculated by line-by-line integral model.

(a) 100 m ; (b) 200 m ; (c) 300 m ; (d) 400 m

表 1 各实验点的温度和压强
Table 1 Temperature and pressure of experiment points

Parameter	Measurement distance /m			
	100	200	300	400
Temperature /K	275.5	275.5	274.1	272.6
Pressure /hPa	1021.5	1021.5	1021.1	1021.0

表 2 多光谱非成像系统的测量结果
Table 2 Measurement results of multi-spectral non-imaging system

Measurement distance /m	PMT gain	PMT output voltage /V			Transmission	Average transmission	Model theoretical value	Relative error /%
		A	B	C				
100	9×10^4	3.035	3.605	3.09	0.9687	0.9609	0.9623	0.146
		3.050	3.580	3.100	0.9567			
		3.050	3.580	3.080	0.9606			
		3.060	3.600	3.075	0.9660			
		3.080	3.620	3.110	0.9621			
		3.090	3.640	3.135	0.9617			
		3.065	3.645	3.160	0.9625			
		3.085	3.625	3.185	0.9486			
200	5×10^5	3.055	3.54	3.185	0.9280	0.9349	0.9411	0.659
		3.065	3.535	3.175	0.9268			
		3.060	3.575	3.150	0.9442			
		3.075	3.545	3.175	0.9282			
		3.035	3.570	3.150	0.9466			
		3.030	3.530	3.150	0.9354			
		3.065	3.570	3.205	0.9317			
		3.045	3.575	3.195	0.9382			
300	1.1×10^6	2.310	2.600	2.350	0.9116	0.9158	0.9251	1.006
		2.305	2.595	2.360	0.9082			
		2.280	2.610	2.370	0.9169			
		2.315	2.620	2.355	0.9174			
		2.250	2.550	2.275	0.9223			
		2.285	2.610	2.360	0.9184			
		2.250	2.565	2.325	0.9160			
		2.320	2.620	2.360	0.9152			
400	1.2×10^6	1.045	1.170	1.075	0.8999	0.8975	0.9119	1.576
		1.095	1.240	1.145	0.9023			
		1.085	1.240	1.150	0.9041			
		1.045	1.165	1.070	0.8981			
		1.065	1.180	1.095	0.8895			
		1.070	1.230	1.160	0.8971			
		1.085	1.225	1.160	0.8867			
		1.030	1.165	1.075	0.9022			

对比表 2 和图 6,可以看出:

1) 在距离为 100~400 m 之间,氧气 A 吸收带平均透过率的测量值随距离的增大而减小,且与理论值的误差在 0.146%~1.576%之间,说明采用该方法能够有效测量路径上的氧气 A 吸收带平均透过率。

2) 氧气 A 吸收带平均透过率的测量均值与模型理论值的相对误差随距离的增大而增大,这是由于透过率理论值随距离的增大而减小。同时,随着距离的增大,目标辐射经大气传输的衰减增强,导致测量系统的接收信噪比降低,系统噪声所占比重增加,从而使得测量结果误差增大。通过增大 PMT 的倍增系数,在一

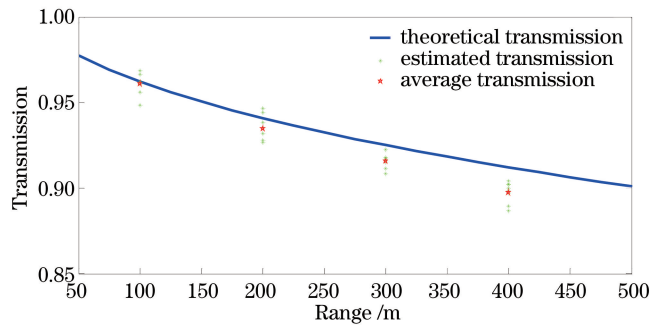


图 6 理论计算得到的不同测量距离的氧气 A 吸收带平均透过率分布

Fig. 6 Distribution of average transmission of oxygen A absorption band at different measurement ranges by theoretical calculation

定程度上能够改善信噪比降低所带来的影响。此外,由于真实大气时刻发生变化,增大测量距离会进一步增大系统测量结果的不确定度,从而增大测量误差。

3) 氧气 A 吸收带平均透过率的测量值均小于模型理论值,这是因为利用逐线积分模型计算得到的是氧气 A 吸收带范围内的各吸收谱线透过率的平均值,而实验测量结果则是氧气 A 吸收带的平均透过率。当波数采样间隔 $\Delta\nu$ 趋近无穷小时,平均透过率与透过率平均值相等。实际计算中,实验系统的波数采样间隔 $\Delta\nu = 1 \text{ cm}^{-1}$,而逐线积分模型的波数采样间隔则远小于 1 cm^{-1} ($\Delta\nu \approx 0.007 \text{ cm}^{-1}$),导致实验系统的测量值相比模型理论值偏低。通过减小实验系统的波数采样间隔,能够尽可能减小这种负偏差。

4) 受实验所用窄带滤光片截止带宽略超出氧气 A 吸收带及其左右带肩波长范围、系统接收信噪比偏低等因素的影响,目前实验系统的透过率测量误差为 $0.146\% \sim 1.576\%$,略高于高光谱成像系统。在下一步研究中,将采用三通道并行测量的方式对实验系统进行改进,并选用更窄的滤光片和大口径光学镜头来提高聚光能力,进而提高系统接收的信噪比。

6 结 论

针对在氧气 A 吸收带被动测距中使用高光谱成像系统存在测量实时性差、测距精度易受成像质量影响等问题,提出了一种多光谱非成像氧气 A 吸收带平均透过率的测量方法。设计了实验系统,并在外场条件下开展了氧气 A 吸收带平均透过率的测量实验。由实验测量结果与理论计算结果可知,在测量距离为 $100 \sim 400 \text{ m}$ 范围内,测量值相对于理论值的误差在 $0.146\% \sim 1.576\%$ 之间,证明了该方法的可行性,并为氧气 A 吸收带被动测距技术提供了新思路。在后续研究中,应进一步分析该方法的误差来源并予以消除抑制,同时对现有实验系统进行升级改进,以提高该方法的测量精度和增强其测距实用性。

参 考 文 献

- [1] Hawks M R. Passive ranging using atmospheric oxygen absorption spectra[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2006.
- [2] Anderson J R. Monocular passive ranging by an optical system with band pass filtering[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2010.
- [3] Vincent R A, Hawks M R. Passive ranging of dynamic rocket plumes using infrared and visible oxygen attenuation[C]. SPIE, 2011, 8052: 80520D.
- [4] Fu Xiaoning, Shan Lanxin, Wang Rui. A new ranging formula for oxygen absorption based passive ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1201001.
付小宁, 单兰鑫, 王蕊. 一个新的氧气吸收法被动测距公式[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1201001.
- [5] Wang Rui. Monocular single-band passive ranging based on spectrum absorption characteristics of oxygen[D]. Xi'an: Xidian University, 2015.
王蕊. 基于氧光谱吸收特性的单目单波段被动测距[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [6] Yan Zongqun, Liu Bingqi, Hua Wenshen, *et al.* Short-range experiment of passive ranging by oxygen absorption[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2744-2750.

- 闫宗群, 刘秉琦, 华文深, 等. 利用氧气吸收被动测距的近程实验[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(11): 2744-2750.
- [7] Li Jinhua, Wang Zhaoba, Wang Zhibin, *et al.* Study on the temperature dependence of oxygen A-band absorption coefficient[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(21): 214209.
李晋华, 王召巴, 王志斌, 等. 氧气 A 带吸收系数的温度依赖关系研究[J]. 物理学报, 2014, 63(21): 214209.
- [8] Wang Zhibin, Zong Pengfei, Li Xiao. Oxygen 'A' absorption band simulation of infrared distance inversion algorithm and experimental research[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0815002.
王志斌, 宗鹏飞, 李 晓. 氧气 A 带目标红外距离反演算法仿真及实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0815002.
- [9] Yan Zongqun, Liu Bingqi, Hua Wenshen, *et al.* Application of CKD method to passive ranging technology by oxygen absorption[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 667-677.
闫宗群, 刘秉琦, 华文深, 等. 相关 K 分布法在氧气吸收被动测距技术中的应用[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(3): 667-677.
- [10] Zhang Yu, Liu Bingqi, Yan Zongqun, *et al.* Influence of background radiation on the precision of passive ranging[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(3): 034216.
张 瑜, 刘秉琦, 闫宗群, 等. 背景辐射对被动测距精度影响分析及实验研究[J]. 物理学报, 2015, 64(3): 034216.
- [11] Zhang Yu, Liu Bingqi, Hua Wenshen, *et al.* Experimental research of passive ranging in extreme winter weather[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0613002.
张 瑜, 刘秉琦, 华文深, 等. 冬季极端天气条件下被动测距实验[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0613002.
- [12] Yan Z, Liu B, Hua W, *et al.* Theoretical analysis of the effect of meteorologic factors on passive ranging technology based on oxygen absorption spectrum[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(23): 6450-6455.
- [13] Wei Heli, Dai Congming, Wu Pengfei, *et al.* The calculation of the atmospheric absorption of oxygen A band for passive ranging[J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 2015, 38(5): 409-413.
魏合理, 戴聪明, 武鹏飞, 等. 用于被动测距的氧气 A 带大气吸收仿真计算[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2015, 38(5): 409-413.
- [14] Xue Qingsheng. Optical design of space-based wide field-of-view differential optical absorption imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122002.
薛庆生. 星载宽视场差分吸收成像光谱仪光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122002.
- [15] Li Jinhua, Wang Zhaoba, Wang Zhibin. Passive ranging of infrared target using oxygen A-band and Elsasser model[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(9): 2582-2586.
李晋华, 王召巴, 王志斌. 基于 Elsasser 模型的氧气 A 带红外目标被动测距[J]. 光谱与光谱学分析, 2014, 34(9): 2582-2586.
- [16] Zhang Yu, Liu Bingqi, Yan Zongqun, *et al.* Oxygen absorption factors of target radiation and interference targets reflection spectra[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(8): 081003.
张 瑜, 刘秉琦, 闫宗群, 等. 目标自辐射与干扰目标反射光谱的氧气吸收特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(8): 081003.
- [17] Yan Zongqun, Liu Bingqi, Hua Wenshen, *et al.* The refraction absorption error of passive ranging technology by oxygen absorption[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0901002.
闫宗群, 刘秉琦, 华文深, 等. 氧气吸收被动测距技术中的折射吸收误差[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0901002.
- [18] Yan Zongqun. Research on technology of passive ranging based on oxygen absorption[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2004.
闫宗群. 基于氧气吸收的被动测距技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2014.
- [19] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, *et al.* The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110(9): 533-572.
- [20] Song Wenbao, Jin Yangming, Zhao Zhicheng, *et al.* Analysis and optical design of very high spectral resolution imaging spectrometer of the atmospheric CO₂[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0722001.
宋文宝, 靳阳明, 赵知诚, 等. 大气 CO₂ 甚高光谱分辨率成像光谱仪分析与光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0722001.
- [21] Mei Fei, Jiang Yong, Chen Shiguo, *et al.* Experimental verification for line by line prediction model of gas absorption [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0330002.
梅 飞, 江 勇, 陈世国, 等. 一种气体吸收的逐线计算模型及其实验验证[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0330002.
- [22] Lin Jieli. Research on spectral line profile and line width of high-resolution (saturation) molecular spectra and its application[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, 2000.
林洁丽. 高分辨率(饱和)分子光谱谱线线型、线宽及其应用的研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所, 2000.