

文章编号 1004-924X(2017)01-0028-06

## 氧分子 A 吸收带的随机 Malkmus 被动测距

李晋华<sup>1\*</sup>, 王召巴<sup>1,2</sup>, 王志斌<sup>1,2</sup>

- (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 电子测试技术国家级重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:**针对比尔-朗伯定律单色传输和其他透过率模型计算速度慢的问题,为了实现红外目标的高速被动测距,研究了被动测距系统中氧分子 A 带吸收特征及大气中氧分子吸收率的计算方法。分析了大气中氧分子 A 带的吸收光谱及分布特性,以当前大气参数和测量环境为基础,结合 HITRAN 数据库,将随机 Malkmus 带模式引入到氧分子带平均吸收率计算中,建立了基于随机 Malkmus 带模式的被动测距数学模型。搭建了测距实验平台,在 12~128 m 内对 7 个不同点进行了距离测量。实验结果表明,在实际大气条件下,利用该被动测距模型测得被测目标距离与实际距离的平均误差达到 1.8%。该模型正确、可行,满足红外目标被动测距的高速在线测试及隐蔽性、高精度、抗干扰能力强等要求。

**关键词:**红外目标;透过率计算;氧分子 A 带;随机 Malkmus 模型;被动测距;带平均吸收率

**中图分类号:** TN215; TN976 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0028

## Passive ranging using oxygen A-band and random Malkmus model

LI Jin-hua<sup>1\*</sup>, WANG Zhao-ba<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-bin<sup>1,2</sup>

- (1. Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China;
  2. National Key Laboratory for Electronic Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)
- \* Corresponding author, E-mail: ljh4961@163.com

**Abstract:** Aiming at the slow calculation speed both of monochrome transmission based on Beer-Lambert Law and other transmittance models, the absorption features of oxygen A band was analyzed and algorithms of oxygen absorptivity in atmosphere was investigated in order to realize real-time and high-efficient passive ranging of infrared targets. The absorption spectrum and distribution characters for oxygen A band were analyzed. The passive ranging model based on random Malkmus mode was built by introducing the random Malkmus mode to the calculation of the band average absorptivity of oxygen molecules with the current atmospheric parameters, testing environment and HITRAN database. Then the passive ranging test platform was established for measuring seven different points ranging from 12 to 128 m. Experimental results show that the model is accuracy and the average error of oxygen A band between measured and calculated distances is 1.8% in current atmosphere. The

收稿日期: 2016-08-17; 修订日期: 2016-09-14.

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项基金资助项目(No. 61127015); 国际科技合作项目(No. 2013DFR10150); 中北大学科研创新团队支持计划资助课题

proposed passive ranging algorithms is feasible and can satisfy the system requirements of rapid speed, online, concealing, higher precision, as well as strong anti-jamming.

**Key words:** infrared target; transmittance measurement; molecular oxygen A-band; random Malkmus band model; passive ranging; band average absorption

## 1 引 言

红外目标被动测距因具有隐蔽性好、适应性强等特点,在军事侦察、机器视觉、卫星跟踪、导弹火控、自动飞行器着陆及导航等领域均有广泛的应用<sup>[1]</sup>。高速、实时被动测距数学模型建立的核心在于吸收率的计算,而目标光谱的测量又受到光谱仪分辨率的限制,分辨率越高,耗时越长。因此迫切需要一种低分辨率下快速准确的透过率计算方法。

常用的透过率计算方法有以下 3 种:逐线积分法(LBLRTM)<sup>[2]</sup>,该方法必须知道计算域内每条谱线的参数,并严格按波数积分,计算速度慢,难以满足实时测量的需求;K 分布模式<sup>[3]</sup>,其计算量比逐线积分法小但计算过程复杂,也不适于实时测量;带模型<sup>[4]</sup>法,其基本思想是在低分辨率光谱实验结果的基础上,选择气体波数范围内的谱线线型函数,建立谱线辐射强度与谱线参数的关系,得出谱线在此波数范围内的分布规律,从而推出气体在此波数范围内的总辐射强度与谱线参数的关联式<sup>[5]</sup>。常用的带模型方法有 Elsasser 带模型<sup>[6]</sup>和统计谱带模型<sup>[7]</sup>。其中,Elsasser 带模型的假设前提是等谱线强度、等谱线半宽和等谱线间隔。但多数介质(以氧分子为例)的吸收带无法满足该假设前提,氧分子的结构特点决定了其光谱位置和强度的不均匀<sup>[8]</sup>,因此,有必要对现有技术进行改进。本文利用统计带模型来计算带平均透过率,建立了实时、高效的被动测距模型。该模型能够实现红外目标的高速在线测距。

## 2 基本理论

### 2.1 氧分子 A 吸收带特性

氧分子 A 带位于可见光到近红外波段,是以 762 nm 为中心的谱带内所有单一谱线的强度和,其波段为 12 900~13 200  $\text{cm}^{-1}$ ,氧吸收谱的线强分布如图 1 所示(来自 HITRAN2012 数据

库<sup>[9]</sup>)。氧分子三重态的结构特征决定了其不同吸收带的光谱特性,其中由 $^1\Sigma_g^+(0,0)$ 带氧气吸收光谱与波长有强函数关系,且氧气的转动分布受温度的影响,因而谱线线型也会随着被测路径上的大气条件而变化。

选择氧分子作为被动测距的吸收介质,因为氧分子是大气中浓度分布均匀且相对稳定的成分,其吸收谱带内没有叠加其它大气组分的吸收谱,并且吸光度随着被测距离的增加而增大。

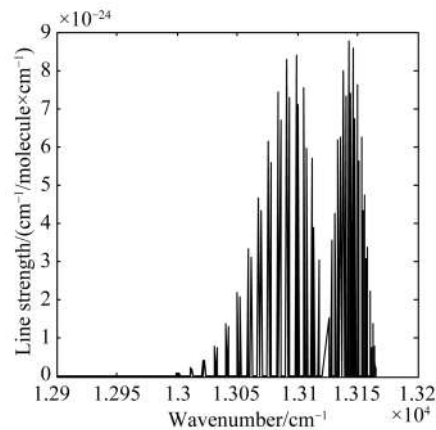


图 1 氧分子吸收谱的线强分布

Fig. 1 Line intensity distribution of oxygen absorption spectrum

### 2.2 随机 Malkmus 模型的建立

针对现有红外目标透过率计算技术存在的计算数据量大、计算速度慢等问题,考虑氧分子的结构特点,这里提出了一种基于随机 Malkmus 带模式<sup>[10]</sup>的带平均透过率计算方法。该方法根据 HITRAN 数据库,以当前的大气条件为基础,无需依赖被测目标的先验知识,即可通过该理论模型高速实时获得被测目标的透过率。

氧气 A 吸收带位于 12 900~13 200  $\text{cm}^{-1}$ 。若想测得每条谱线的强度,光谱仪分辨率应小于氧分子吸收谱线的半宽度,而分辨率越高,完成一次测量所需的时间越长。为了减少测量时间,这里研究了基于 Lorentzian 线型的 Malkmus 带模式带平均吸收率的理论计算模型。主要思想是以

标况下 HITRAN 数据库中氧分子谱线参数为基础,计算任意环境下氧分子的谱线强度,得出氧分子 A 吸收带内的平均吸收系数,即可得到带平均吸收率的计算模型。

### 2.2.1 独立线强平均吸收率的计算

考虑到谱线重叠问题,假设  $N$  条谱线强度相等,平均间隔为  $\delta$ ,在波数空间  $\nu$  的  $-N\delta/2 \sim N\delta/2$  区间内随机排列,区间内中心波数  $\nu=0$ ,则在  $\nu=\nu_n$  处的吸收系数为  $k_{\nu_n}$ ,所有谱线在  $\nu=0$  处的吸收系数为  $\sum_{i=1}^N k_{\nu_n}$ ,因此透过率为:

$$T(u) = \exp\left(-u \sum_{i=1}^N k_{\nu_n}\right) = \prod_{i=1}^N \exp(-uk_{\nu_n}), \quad (1)$$

其中  $u$  为氧分子质量。

当谱线为 Lorentzian 线型时,指数积分可积。若第  $n$  条谱线的等效宽度为  $W_1$ ,则全部谱线的总吸收为  $\sum_n W_k$ ,谱线区间内的平均吸收为:

$$\bar{A} = \frac{1}{M\delta} \sum_n W_k = \frac{1}{\delta} \left[ \frac{1}{M} \sum_n W_1 \right] = \frac{W_1}{\delta}. \quad (2)$$

式(2)是由独立线强推出吸收带内的平均吸收。谱带内的带平均吸收实际是某条谱线的等效带宽与平均间隔之比。

### 2.2.2 线强分布函数模型的建立

由于氧分子谱线强度的分布规律满足 Malkmus 分布模式,这里假定谱线位置按等几率分布,谱线强度按指数规律分布。

设谱线在线强  $S \sim S+dS$  区间的概率分布为  $P(S)dS$ ,且  $P(S)$  服从指数分布,实际测得的光谱带为窄带光谱,截取 762 nm 附近 12 900 ~ 13 200  $\text{cm}^{-1}$  作为测量带宽,则光谱范围内有效光谱的光强分布满足 Malkmus<sup>[11]</sup> 分布,即有:

$$P_0(S) = \begin{cases} (1/\ln R) S^{-1}, & \left\{ \frac{S_M}{R} \leq S \leq S_M \right\} \\ 0, & \left\{ S < \frac{S_M}{R}, S > S_M \right\} \end{cases}, \quad (3)$$

其中:  $S_M$  为有效光谱范围内的最大光强;  $R = \frac{S_{\max}}{S_{\min}}$ , 为有效光谱带范围内最大光强与最小光强之比;  $P_0(S)$  是归一化因子,即:

$$\int_0^{\infty} P_0(S) dS = 1. \quad (4)$$

氧分子光谱的光强如式(3)所示,光强与能级

跃迁的能量指数呈正比关系,且相应方程无唯一解,平均值呈 Malkmus 分布,因此光强分布为:

$$P(S) = \int_{S_M/R}^{S_M} \frac{1}{\ln R} \frac{1}{(S')^2} \exp(-S/S') dS' = \frac{1}{\ln R} S^{-1} [\exp(-S/S_M) - \exp(-RS/S_M)]. \quad (5)$$

氧分子光谱的平均谱线强度为:

$$\bar{S} = \int_0^{\infty} SP(S) dS. \quad (6)$$

将式(5)带入式(6)得平均光强为:

$$\bar{S} = \frac{R-1}{R \ln R} S_M. \quad (7)$$

将式(7)带入式(5)得到平均光强的分布函数为:

$$P(S) = \frac{1}{\ln R} S^{-1} \left[ \exp\left\{-\frac{R-1}{R \ln R} \frac{S}{\bar{S}}\right\} - \exp\left\{-\frac{R-1}{\ln R} \frac{S}{\bar{S}}\right\} \right]. \quad (8)$$

式(8)为吸收带内平均光强的分布函数,服从 Malkmus 统计模型。

### 2.2.3 带平均吸收率计算模型的建立

氧分子吸收带内独立谱线的平均吸收率与独立谱线的等效带宽存在一定的关系,且吸收带内谱线的平均强度服从 Malkmus 统计模型,于是建立了带平均吸收率与谱线等效宽度的关系,可进一步推算带平均吸收率的计算模型。

独立谱线的等效宽度定义为:

$$W(S, u) = \int \{1 - \exp[-f(\nu)m]\} d\nu, \quad (9)$$

其中:  $m$  是光学厚度<sup>[12]</sup>,在光谱带内谱线间隔随机,则平均吸收率为:

$$\bar{A} = 1 - \exp(-\bar{W}/d), \quad (10)$$

式中:  $d$  为平均谱线间隔,  $\bar{W}$  是独立谱线等效宽度  $W(S, u)$  的平均值。当谱线强度符合某种分布时,  $\bar{W}$  定义为:

$$\bar{W} = \int W(S, u) P(S) dS. \quad (11)$$

谱线采用 Lorentzian 线型,谱线的等效宽度为:

$$W(S, m) = S m \exp\left[-\frac{Sm}{2\pi\alpha_l}\right] \left[ I_0\left[\frac{Sm}{2\pi\alpha_l}\right] + I_1\left[\frac{Sm}{2\pi\alpha_l}\right] \right]. \quad (12)$$

联合式(8)和式(12)带入式(11)可得平均谱线宽度为:

$$\bar{W} = \int_{S=0}^{\infty} S u \exp\left[-\frac{Sm}{2\pi\alpha_L}\right] \left[ I_0\left(\frac{Sm}{2\pi\alpha_L}\right) + I_1\left(\frac{Sm}{2\pi\alpha_L}\right) \right] \times \frac{1}{\ln R} \int_{s'=\frac{S_M}{R}}^{S_M} (S')^{-2} \exp(-S/S') dS' dS. \quad (13)$$

对式(13)交换积分顺序,且内部指数函数积分可得平均等效带宽为:

$$\bar{W} = \frac{1}{\ln R} \int_{s'=\frac{S_M}{R}}^{S_M} u \left[ 1 + \frac{S'm}{\pi\alpha_L} \right]^{-\frac{1}{2}} dS' = \frac{2\pi\alpha_L}{\ln R} \left[ \left( 1 + \frac{S_M m}{\pi\alpha_L} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( 1 + \frac{S_M m}{R\pi\alpha_L} \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (14)$$

式(14)中对  $u$  取极限,令:

$$C = \bar{S}(\ln R/\pi)(R^{\frac{1}{2}}+1)/(R^{\frac{1}{2}}-1), \quad (15)$$

$$D = d(\ln R/\pi)(R^{\frac{1}{2}}+1)/(R^{\frac{1}{2}}-1). \quad (16)$$

由式(14)、式(15)和式(16)可得:

其中:

$$\bar{S} = \frac{1}{\Delta\nu} \sum_{k=1}^K S_k(T) = \frac{1}{\Delta\nu} \sum_{k=1}^K \left[ S_k(T_0) \frac{T}{T_0} \exp\left\{-c2E_k'' \frac{T_0-T}{TT_0}\right\} \left[ \frac{1-\exp(-c2\nu/T)}{1-\exp(-c2\nu/T_0)} \right] \right], \quad (19)$$

$$\alpha_{L,k} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^K \alpha_{L,k} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^K \left[ \gamma_{air,k} \frac{P}{P_0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-n_k} \right], \quad (20)$$

$$m = N_0 e^{-z_b/H} \left[ \frac{1 - e^{-L \cos \theta / \alpha_0 [t_b + (z - z_b) \alpha]}}{\cos \theta / \alpha_0 [t_b + (z - z_b) \alpha]} \right], \quad (21)$$

式中:  $R = \frac{S_{\max}}{S_{\min}}$ ,  $S_{\max}$  为谱线强度的最大值,  $S_{\min}$  是谱线强度的最小值;  $d$  为平均谱线间距;  $S_k$  为第  $k$  条谱线强度;  $\alpha_{L,k}$  第  $k$  条谱线的半宽;  $M$  为吸收带内的谱线总数;  $\Delta\nu$  是吸收带内的波数区间。

与现有技术相比,本文以 HITRAN 数据库为依据,只需获取测量点当前的温度、压强、湿度、海拔高度和测量天顶角,无需逐条计算氧分子的谱线,即可快速准确计算当前条件下氧分子带的平均吸收率。这种方法计算方便,只需测得当前的大气条件以及测量条件,结合 HITRAN 数据库,无需依赖被测目标的先验知识,即可通过该理论模型高速实时准确地获得被测目标的吸收率。

### 3 实验结果及分析

为了测试随机 Malkmus 带模式数学模型的正确性和准确度,利用氧气 A 带,以卤素灯为光源进行实验,得出了水平方向的测距精度。

被动测距系统的光谱仪分辨率设为  $8 \text{ cm}^{-1}$ , 以 300 W 卤素灯为光源,分别在 12,26,35,46,55,64 和 128 m 的距离进行测量,每个距离点均采用 16 次扫描取平均的方法,以降低环境影响。环境参数如下:俯仰角为  $89^\circ$ ,环境温度为  $19.2^\circ \text{C}$ ,相对湿度为  $17.8\%$ 。首先利用基线拟合方法计算相应距离下的透过率<sup>[13]</sup>。然后在相同条件下,用氧气 A 吸收带的随机 Malkmus 带模型计算  $0 \sim 128 \text{ m}$

将式(17)代入式(10)得带平均吸收率为:

$$\bar{A} = 1 - \exp\left\{-\left(2\alpha_L/D\right)\left[\left(1+Cm/\alpha_L\right)^{\frac{1}{2}}-1\right]\right\}, \quad (18)$$

的带平均透过率,步长约为 10 cm,建立透过率与距离的测距数据库。将测量透过率与测距数据库中透过率的数值解进行对比,二者最接近的值所对应的距离即为预测距离。

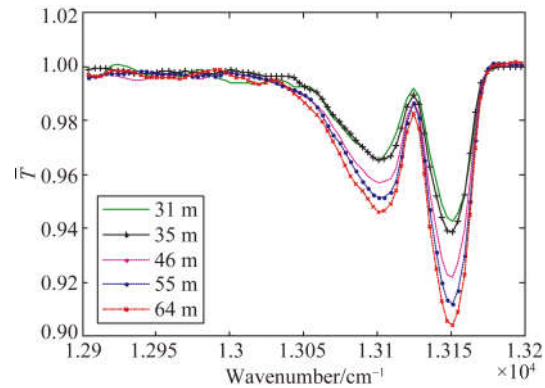


图 2 不同距离处的透过率曲线

Fig. 2 Transmittance curves at different distances

图 2 为上述条件下不同距离处实测目标光谱的透过率。由图可见,随着距离的增加,目标辐射衰减增大,说明传输路径上,路径越长,被氧分子吸收的越多,透过率减小。为了验证 Malkmus 带模型计算透过率的正确性,利用该模型计算得到 64 m 处的透过率,并与实测透过率进行对比,结果如图 3 所示。其中虚线是该距离处实测数据计算得出的透过率,实线为根据测距模型算出该距离下的透过率,二者轮廓相似,且峰值最低点接近,相关系数为 0.99。

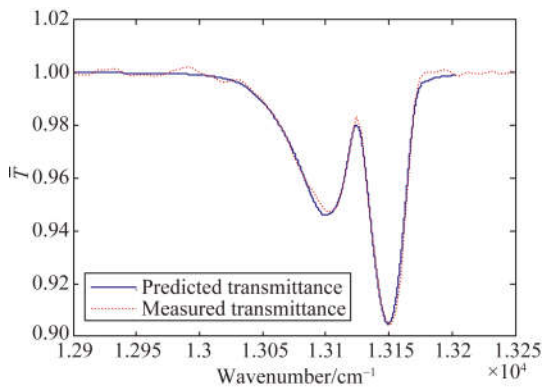


图 3 64 m 处测得的透过率与理论计算透过率曲线

Fig. 3 Theoretical and measured transmittance curves at 64 m

光源与光谱仪的实际距离为  $d_0$ , 测距数据库预测距离为  $d$ , 实验结果如图 4 所示。横坐标表示被测目标距离, 纵坐标为带平均吸收率, 可见实测数据分布于预测值的两侧, 模型预测效果见表 1。

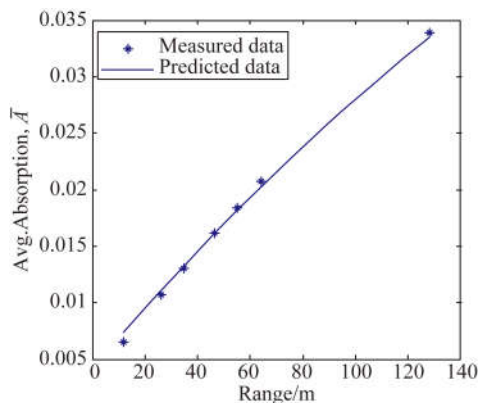


图 4 实测距离与预测距离的关系曲线

Fig. 4 Relation between measured and predicted ranges

由表 1 可知, 用随机 Malkmus 带模式计算带平均透过率, 平均误差为 1.8%。距离越近, 氧分子吸收越少, 光源本身的稳定性对测量影响增大, 导致误差较大。随着距离的增大, 氧分子吸收越强, 分子吸收光谱越明显, 受光源影响较小, 误差减小。标准偏差是由基线拟合和透过率数值解带

来的偏差, 其中基线拟合带来的偏差可通过改进拟合方法来减小, 而带平均透过率的 Romberg 数值解偏差则可以通过二分后的误差进行补偿。此外, 在实际测试过程中, 光源的稳定性、探测器的灵敏度、湿度等对距离测算的精度均存在一定的影响。特别地, 实际中即使是水平距离上大气分布也不完全均匀。被测红外目标处于高速运动中, 如果不能做到实时预警, 则被动测距便失去了意义, 所以一般选用带模式来建立大气传输模型。另外, 测距系统的硅光电探测器的等效噪声功率以及使用点光源作为被测目标, 也会对望远系统的收光效率产生较大的影响, 从而导致测量误差增大。

表 1 近红外波段氧气 A 带测距结果

Tab. 1 Measured and predicted ranges in near infrared oxygen A-band

$d_0/m$	12	26	35	46	55	64	128
$d/m$	11.7	25.5	34.6	46.6	56	65	129
标准偏差/%	0.19	0.17	0.14	0.23	0.18	0.16	0.32
相对误差/%	2.5	1.9	1.1	1.3	1.8	1.6	2.3

## 4 结 论

本文针对比尔-朗伯定律单色传输和其他透过率计算模型计算速度慢的问题, 为满足高速被动测距的要求, 考虑氧分吸收带内的总体吸收特征, 结合氧分子平均谱线强度的 Malkmus 统计分布规律和谱线等效带宽与带平均吸收率的关系, 提出了基于随机 Malkmus 带模型的氧分子带平均吸收率的计算模型。经实验验证, 利用该模型可实现高速、稳定的红外目标被动测距, 被测目标的理论计算距离与实际距离的平均误差可达到 1.8%, 无需考虑吸收带内谱线参数的具体信息, 实现了低分辨率下目标距离的高速预算。

## 参考文献:

- [1] 王力民, 张蕊, 林一楠, 等. 红外探测技术在军事上的应用[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 570-574.  
WANG L M, ZHANG R, LIN Y N, et al.. Application in the military of the IR detection technology

[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 570-574. (in Chinese)

- [2] CLOUGH S A, IACONO M J, MONCET J L. Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates-application to water-vapor [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992,

- 97(D14): 15761-15785.
- [3] 石广玉. 大气辐射计算的吸收系数分布模式[J]. 大气科学, 1998(4): 659-676.
- SHI G Y. On the  $k$ -distribution and correlated  $k$ -distribution models in the atmospheric radiation calculations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1998(4): 659-676. (in Chinese)
- [4] MALKMUS W. Random Lorentz band model with exponential-tailed  $S^{-1}$  line-intensity distribution function [J]. *JOSA*, 1967, 57(3): 323-329.
- [5] IRWIN P G J, SROMOVSKY L A, STRONG E K, *et al.*. Improved near-infrared methane band models and  $k$ -distribution parameters from 2 000 to 9 500  $\text{cm}^{-1}$  and implications for interpretation of outer planet spectra [J]. *Icarus*, 2006, 181(1): 309-319.
- [6] GOLDEN S A. The Doppler analog of the Elsasser band model [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1967, 7(3): 483-494.
- [7] BANDALOS D L, FINNEY S J, GESKE J A. A model of statistics performance based on achievement goal theory [J]. *Journal of Educational Psychology*, 2003, 95(95): 604-616.
- [8] 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]. 光谱学与光谱分析, 2014(9): 2582-2586.
- LI J H, WANG ZH B, WANG ZH B. Passive ranging of infrared target using oxygen A-band and Elsasser model [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014(9): 2582-2586. (in Chinese)
- [9] ROTHMAN L S, GORDON I E, BABIKOV Y, *et al.*. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2013, 130: 4-50.
- [10] MALKMUS W. Random Lorentz band model with exponential-tailed  $S^{-1}$  line intensity distribution function [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, 57(3): 323-329.
- [11] LADENBURG R, REICHE F. Über selektive Absorption [J]. *Annalen der Physik*. 1913, 347(11): 181-209.
- [12] LIOU K N. *An Introduction to Atmospheric Radiation Second Edition* [M]. 2nd ed.. San Diego: Academic Press, 2002: 27-29.
- [13] 李晋华, 王志斌, 陈媛媛, 等. 近红外氧气 A 带大气透过率的计算[J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1142-1145.
- LI J H, WANG ZH B, CHEN Y Y, *et al.*. Calculation of near infrared oxygen A-band atmospheric transmittance [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1142-1145. (in Chinese)

## 作者简介:



李晋华(1977—),女,山西昔阳人,博士,讲师,2004年于吉林大学获得硕士学位,2015年于中北大学获得博士学位,主要从事信息获取和处理等方面的研究。E-mail: ljh4961@163.com