

# 冬季极端天气条件下被动测距实验

张 瑜<sup>1</sup> 刘秉琦<sup>1</sup> 华文深<sup>1</sup> 闫宗群<sup>2</sup> 李晓明<sup>1</sup> 刘 远<sup>3</sup>

<sup>1</sup>军械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003

<sup>2</sup>装甲兵工程学院, 北京 100072

<sup>3</sup>65379部队, 黑龙江 牡丹江 157000

**摘要** 氧气吸收率是利用氧气A吸收带进行被动测距技术计算的核心,为研究冬季极端天气条件对目标氧气吸收率计算及测距精度的影响,在降雪和雾霾天气条件下进行了被动测距实验。采用1000 W卤钨灯作为目标光源,分辨率为1 nm的高光谱成像仪作为测量设备,对水平方向距离550 m处的卤钨灯进行了测距实验。利用相关K分布法建立的氧气吸收率与路径的关系模型及实验测得的目标氧气吸收率,解算了目标距离。结果表明:冬季极端天气影响目标氧气吸收率的测量精度,导致利用所建模型解算的距离与真实距离误差大;通过背景消除后,测距误差变小,雾霾天气测距误差为8.36%,降雪天气测距误差为5.45%。背景消除可以提高目标氧气吸收率的测量精度,进而提高冬季极端天气条件下的测距精度。

**关键词** 大气光学; 被动测距; 氧气吸收率; 相关K分布; 极端天气

中图分类号 TN976 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0613002

## Experimental Research of Passive Ranging in Extreme Winter Weather

Zhang Yu<sup>1</sup> Liu Bingqi<sup>1</sup> Hua Wenshen<sup>1</sup> Yan Zongqun<sup>2</sup> Li Xiaoming<sup>1</sup> Liu Yuan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics and Optics Engineering, Ordnance Engineering College,  
Shijiazhuang, Hebei 050003, China

<sup>2</sup>Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China

<sup>3</sup>Army 65379, Mudanjiang, Heilongjiang 157000, China

**Abstract** Oxygen absorption rate is the core of passive ranging technology calculation using oxygen A band. In order to ascertain the influence of extreme winter weather on the calculation of oxygen spectral absorption and the accuracy of passive ranging, the passive ranging technology is investigated under the conditions of snowing weather and fog and haze weather. The source is a 1000 W tungsten halogen lamp, and the measuring device is a grating spectrometer with 1 nm resolution. The test data are processed at the range of 550 m. According to the mathematic model of oxygen absorption rate and path length using the correlated-K distribution, the distance is solved by the oxygen absorption rate of tungsten halogen lamp in extreme winter weather. The results indicate that the measurement accuracy of oxygen spectral absorption is affected by extreme winter weather, so the ranging error is great in extreme winter weather; but after removing background, the ranging error is reduced to 8.36% in fog and haze weather and 5.45% in snowing weather. By using background elimination method, the measurement accuracy of oxygen spectral absorption and the ranging precision can be increased in extreme winter weather.

**Key words** atmospheric optics; passive ranging; oxygen absorption; correlated-K distribution; extreme weather

**OCIS codes** 010.1030; 010.1290; 010.1320; 300.1030

## 1 引 言

自2006年Michael等<sup>[1]</sup>在解决战区弹道导弹预警问题时提出利用氧气吸收光谱进行被动测距以后,其优

收稿日期: 2015-02-06; 收到修改稿日期: 2015-02-11

作者简介: 张 瑜(1987—),男,博士研究生,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: zhangyuoc@163.com

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

越的隐身性能成为国内外研究的热点,后续科研工作者对该测距技术的理论基础和可行性进行了进一步的推导和实验分析<sup>[2-7]</sup>;利用多项式拟合不同距离点上的氧气吸收率值,建立了近程氧气吸收率与距离的关系模型<sup>[8]</sup>;采用洛伦兹线型的 Elsasser 模型<sup>[9]</sup>、相关 K 分布法<sup>[10]</sup>建立了氧气平均吸收率与路径长度的理论模型,并进行了近程的实验验证;理论分析并仿真了不同气象条件下被动测距技术的测距能力<sup>[11]</sup>,实验分析了晴天无云背景辐射对测距精度的影响<sup>[12]</sup>。对于极端天气下的被动测距能力研究较少。

在实际的应用中,无论是主动测距技术还是被动测距技术都容易受到雨、雪、雾、霾等极端天气的影响。在冬季降雪、雾霾等极端天气条件下,大气中的雪粒子、水汽及霾粒子等对光线形成严重的吸收、散射和反射作用,造成大气能见度降低,使处于可见光和近红外波段的氧气 A 吸收带变得“不可见”,严重影响被动测距的测程和精度。相关 K 分布法合理假设了不同温度和压强下重排后吸收系数概率密度分布的相关性,进而成为了目前解决非均匀大气平均吸收率的重要方法<sup>[10]</sup>。本文利用相关 K 分布法建立了氧气平均吸收率与路径长度的数学模型,在冬季降雪和雾霾天气条件下对一定距离下的卤钨灯目标进行了测距实验。

## 2 基于氧气 A 带吸收的被动测距技术测距模型的建立

将非均匀路径上任意一点的海拔高度  $h_{(l)}$  可以表示为起点海拔  $h_0$ 、路径天顶角  $\theta_0$ 、路径长度  $L$  和地球半径  $R_e$  的关系,如下式所示:

$$h_{(l)} = h_0 + L \cos \theta_0 + \frac{(L \sin \theta_0)^2}{2R_e}. \quad (1)$$

实际非均匀倾斜路径  $L$  按照路径长度变化可以分为若干个等长的子路径,如图 1 所示,可以将非均匀的倾斜路径转化为若干个均匀路径进行处理。

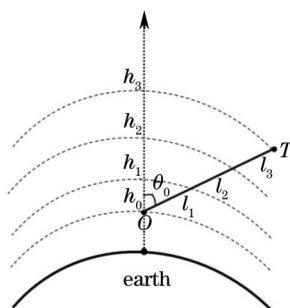


图 1 实际非均匀倾斜路径的分段示意图

Fig.1 Sublevel schematic plan of the nonhomogeneous slant path

设实际大气中的一条倾斜路径  $OT$ , 已知其起始位置  $O$  处的信息  $(h_0, \theta_0; T_0, P_0)$ ,  $T_0, P_0$  为起始点的温度和压强信息, 整个路径  $OT$  的长度可以表示为  $M$  个子路径的和,  $L = l_1 + l_2 + \dots + l_n = M\Delta l$ , 每个子路径  $\Gamma_i$  可以用这段子路径两端的海拔信息和长度信息进行表示, 即  $\Gamma_i = \Gamma(h_{i-1}, h_i, l_i)$ , 则倾斜路径  $OT$  在波数  $\nu$  上的光谱透射率为

$$T(L, \nu) = \exp[-\tau(L, \nu)], \quad (2)$$

式中  $\tau(L, \nu)$  为倾斜路径在波数  $\nu$  上的光学厚度。整个倾斜路径上的光学厚度可表示为

$$\tau(L, \nu) = \int_L k(l, \nu) N(l) dl, \quad (3)$$

式中  $l$  为路径上的任意一点,  $k(l, \nu)$  为点  $l$  上波数  $\nu$  处的吸收系数,  $N(l)$  为点  $l$  处的吸收气体的浓度,  $dl$  为点  $l$  处的一个有限元。分别用各段分路径中间点处的吸收系数和气体浓度作为该段子路径的平均吸收系数和吸收气体的平均浓度, 则整个倾斜路径上的总光学厚度可用所有子路径光学厚度的累加表示为

$$\tau(L, \nu) = \sum_{i=0}^M k(i, \nu) N_i \Delta l, \quad (4)$$

式中  $k(i, \nu)$  为第  $i$  段子路径波数  $\nu$  处的吸收系数,  $N_i$  为第  $i$  段子路径上吸收气体的平均浓度,  $\Delta l$  为子路径的间隔长度。已知起始点  $O$  处的海拔和路径天顶角信息, 则可以利用(1)式求出第  $i$  段子路径两端的海拔高度信息为

$$\begin{aligned} h_{i-1} &= h_0 + (i-1)\Delta l \cos \theta_0 + \frac{[(i-1)\Delta l \sin \theta_0]^2}{2R_c}, \\ h_i &= h_0 + i\Delta l \cos \theta_0 + \frac{(i\Delta l \sin \theta_0)^2}{2R_c}, \end{aligned} \quad (5)$$

则该段子路径的平均海拔为

$$\bar{h}_i = (h_{i-1} + h_i)/2. \quad (6)$$

再利用倾斜路径起点上的气象信息,根据大气中温度与压强随海拔高度的变化规律<sup>[13]</sup>,求出平均海拔位置处的温度和压强,并将其作为该段子路径的平均温度  $\bar{T}_i$  和平均压强  $\bar{P}_i$ 。

$$\begin{aligned} \bar{T}_i &= T_{j,b} + (\bar{h}_i - h_{j,b})\delta_j, \\ \frac{\bar{P}_i}{P_{j,b}} &= \begin{cases} \exp[-a_0(\bar{h}_i - h_{j,b})/\bar{T}_i], & \delta_j = 0, \\ (T_{j,b}/\bar{T}_i)^{(a_0/\delta_j)}, & \text{otherwise,} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $T_{j,b}$ 、 $P_{j,b}$  和  $h_{j,b}$  为第  $j$  层大气最底端的温度、压强和海拔,  $\delta_j$  为第  $j$  层的温度变化率,  $a_0 = gM_{\text{air}}/R$ ,  $g$  为重力加速度,  $M_{\text{air}}$  为空气或其组分的平均分子量,  $R$  为理想气体常数。各层底端的温度和压强可以根据  $O$  点实际测量的气象信息  $(T_0, P_0)$  进行预先解算,在获取该段子路径的平均温度和平均压强后,便可以根据理想气体方程和吸收系数的温压关系求解出该子路径的平均吸收系数和平均吸收气体浓度:

$$\bar{N}_i = 0.2095 \frac{\bar{P}_i}{R\bar{T}_i} N_A, \quad (8)$$

式中  $N_A$  为阿伏伽德罗常数,可以分别求出各段子路径上的平均海拔  $\bar{h}_i$ 、平均温度  $\bar{T}_i$ 、平均压强  $\bar{P}_i$  以及吸收气体的平均浓度  $\bar{N}_i$ 。此时,倾斜路径上的总光学厚度为

$$\tau(L, \nu) = \sum_{i=0}^M k_i(\bar{T}_i, \bar{P}_i) \bar{N}_i \Delta l, \quad (9)$$

则倾斜路径  $OT$  上的光谱透射率为

$$T(L, \nu) = \exp[-\tau(L, \nu)] = \exp\left[-\sum_{i=0}^M k_i(\bar{T}_i, \bar{P}_i) \bar{N}_i \Delta l\right]. \quad (10)$$

如果需要求解的是吸收带内某一波数空间的平均透射率,则利用CKD法可得平均透射率为

$$\bar{A}^{\text{ck}} = 1 - \sum_{g=1}^G a_g \exp\left[-\sum_{i=0}^M k_g(\bar{T}_i, \bar{P}_i) \bar{N}_i \Delta l\right], \quad (11)$$

式中  $G$  为高斯积分点的个数,  $k_g$  为第  $g$  个高斯积分点处的吸收系数值,  $a_g$  为第  $g$  个吸收系数所对应的概率。在已知倾斜路径总长度的前提下,通过直接累加  $M$  个子路径解算出倾斜路径上的平均吸收率,就可以绘制出该路径方向上氧气平均吸收率与路径长度的关系曲线。在实际应用中,利用测得目标相对探测系统的路径天顶角和探测器系统本身的海拔、温度、压强信息快速给出目标路径上平均吸收率与路径长度的关系模型,然后可以在测得某一路径上待测距目标的氧气吸收率后,插值解算出目标的距离。

### 3 测距实验

#### 3.1 测距原理

为了测量目标在辐射路径上的氧气吸收率,需要测量氧气吸收带及其左右两侧无气体吸收带肩的光谱信息;然后利用带肩光谱信息拟合得到吸收带内非吸收基线,并与吸收带内的测量光谱信息进行对比计算,从而计算出氧气吸收率,最后根据吸收率与距离的关系模型对未知距离上的目标进行测距<sup>[8,12]</sup>。

目标在辐射路径上的氧气吸收率可以通过下述方法获得,如下式所示:

$$P_b = P_{b1} + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_1} (P_{b3} - P_{b1}), \quad (12)$$

式中  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  分别为氧气吸收带及其左右两侧无气体吸收带肩所对应的中心波长,  $P_{b1}$  和  $P_{b3}$  分别为实验测得的氧气吸收带左右两侧带肩的平均光谱强度,  $P_b$  为通过  $P_{b1}$  和  $P_{b3}$  插值得到的氧气吸收带内非吸收基线辐射强度。路径上的氧气平均吸收率可以表示为

$$A = 1 - P_{b2}/P_b, \quad (13)$$

式中  $P_{b2}$  为光谱仪测得的氧气吸收带内平均光谱辐射强度。通过该方法可以计算出路径上的氧气吸收率,进而根据第2节所建立的模型获得目标距离。

### 3.2 实验设备

光谱测量设备采用某型高光谱成像仪,该光谱仪的光谱范围为 450~800 nm,光谱分辨率为 1 nm,实验所采用的目标光源为 1000 W 卤钨灯,其发射光谱为 350~2500 nm 的连续光谱,光谱仪与卤钨灯目标的距离由某型激光测距机测量,大气温度和压强通过 BY-2003P 型数字大气压力表测量。

### 3.3 实验条件

分别在冬季降雪和雾霾天气时进行测距实验,雾霾天气实验当天为重度霾,降雪天气实验当天降雪强度为大雪,两次实验中大气温度为 3 ℃~5 ℃,大气压强为 1018 hPa,大气能见度均小于 600 m。卤钨灯和光谱仪分别架设于两栋楼的窗口处,目标与光谱仪距离通过激光测距机测量为 550 m,光谱仪所处位置海拔约为 80 m,卤钨灯目标和光谱仪所处海拔均差约为 6 m,距离 550 m 远时观测天顶角近似为 90°。

### 3.4 测距实验

设置光谱仪采集波段为 740~790 nm,步长为 1 nm,带宽为 3.6 nm,积分时间为 0.5 s,采集到雾霾天气条件下 750,762,780 nm 波段的场景图像和归一化光谱分布如图 2 所示,降雪天气条件下 750,762,780 nm 波段的场景图像和归一化光谱分布如图 3 所示,其中楼层窗口红色圆圈内的亮斑为所架设的卤钨灯。从光谱分布图可以看出,卤钨灯目标的光谱强度从短波向长波逐渐增强,且变化趋势比较平缓,基本呈线性,在 762 nm 附近有明显的吸收峰。



图2 雾霾天气。(a) 750 nm 波段场景图; (b) 762 nm 波段场景图; (c) 780 nm 波段场景图; (d) 目标归一化光谱分布图

Fig.2 Fog and haze weather. (a) Raw image on 750 nm; (b) raw image on 762 nm; (c) raw image on 780 nm; (d) normalized spectrum of the target

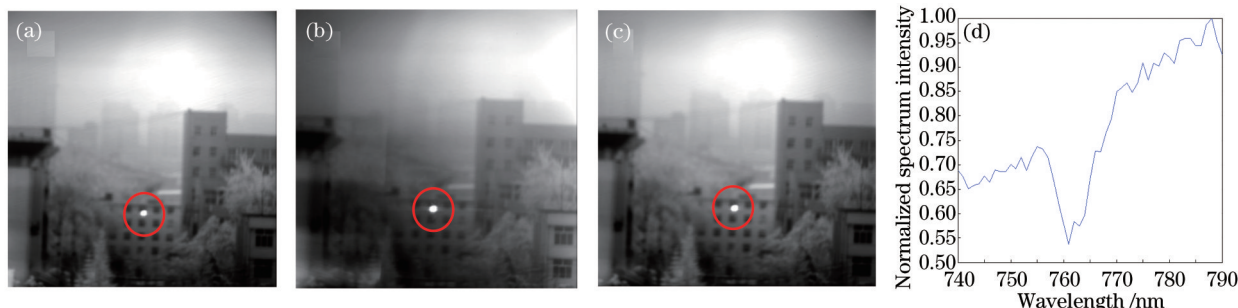


图3 降雪天气。(a) 750 nm 波段场景图; (b) 762 nm 波段场景图; (c) 780 nm 波段场景图; (d) 目标归一化光谱分布图

Fig.3 Snowing weather. (a) Raw image on 750 nm; (b) raw image on 762 nm; (c) raw image on 780 nm; (d) normalized spectrum of the target

下面利用第2节相关K分布算法,根据具体实验中探测器所处的信息,设置目标相对探测系统的天顶角和探测器系统本身的海拔、温度、压强信息,建立氧气平均吸收率与路径长度的关系模型,结果如图4所示。

选择吸收带两带肩的光谱范围为 748~757 nm 和 779~783 nm,吸收带内通道的光谱范围为 761~763 nm,根据(12)式和(13)式计算得到雾霾天气和降雪天气下卤钨灯辐射经传输 550 m 后氧气吸收率分别为 0.277976 和



0.291378。

根据图4所示模型,解算的距离分别为1073 m和1184 m,真实距离与测得距离误差极大。这是由于受天气条件的影响,目标辐射光束传输路径的光学厚度增大,光谱仪采集到的光谱主要包括3个来源:目标在路径上的直射光谱、目标经气溶胶粒子多次散射后的光谱和路径上经大气吸收散射后的太阳光谱。所以实际测得的氧气吸收率并非只是卤钨灯光谱在路径上的氧气吸收,还包括氧气对背景光谱的吸收。

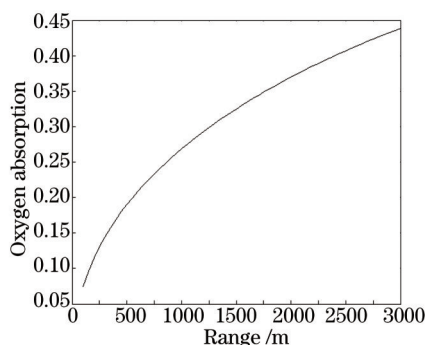


图4 氧气吸收率与路径的关系模型

Fig.4 Mathematic model about path length and oxygen absorption

为了消除天气条件对实测氧气吸收率的影响,采用背景消除法扣除背景的影响。由于光谱仪采集的不同波长下灰度图的空间分辨率为1002 pixel×1002 pixel,所以背景消除主要通过以下方法实现:利用各个波长下采集到的卤钨灯目标像素的灰度均值减去对应波长下目标四周紧邻区域内(15 pixel×15 pixel)背景像素灰度均值。背景消除后的目标光谱如图5所示,采用相同的算法计算得到冬季极端天气条件下背景消除前后卤钨灯辐射传输550 m后氧气吸收率及解算距离结果和误差如表1所示。

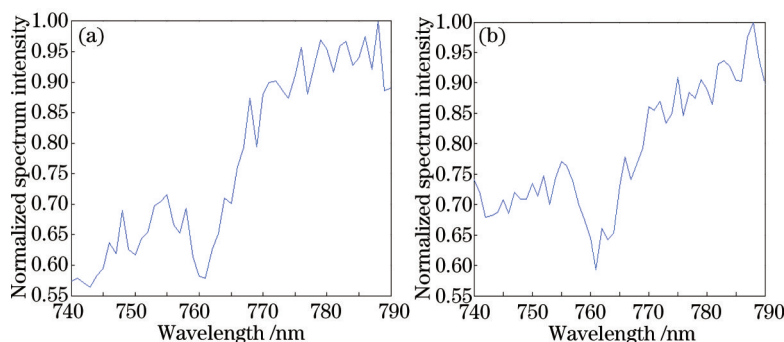


图5 背景消除后的目标光谱分布图。(a) 雾霾天气;(b) 降雪天气

Fig.5 Normalized spectrum of the target after removing background. (a) Fog and haze weather; (b) snowing weather

表1 冬季极端天气条件下背景消除前后目标距离解算及误差

Table 1 Resolving ranges and relative errors before and after removing background in extreme winter weather

	Before removing background		After removing background	
	Fog and haze	Snowing	Fog and haze	Snowing
Weather condition	Fog and haze	Snowing	Fog and haze	Snowing
Oxygen absorption	0.277976	0.291378	0.198432	0.195696
Resolving range /m	1073	1184	504	520
Error /m	523	634	-46	-30
Relative error	95.09%	115.27%	8.36%	5.45%

通过上述计算可以看出,背景消除前的氧气吸收率大于背景消除后的氧气吸收率,这是因为背景光谱来自于目标所处背景中不同物体对太阳光谱的反射或散射,而太阳光谱中的氧气吸收带谱线由于经过了整个大气层的衰减早已变得很深,当其掺杂在提取的目标光谱中时会对真实的目标光谱起到一定的拉深影响,从而导致计算的氧气吸收率变大。背景消除法通过将目标周围紧邻区域内的背景光等效为目标位置上的散射背景光进行背景扣除,能够较好地去除提取目标光谱信息中混合的背景光谱,提高目标光谱的准确

性和目标光谱氧气吸收率计算的准确度。从表中的数据可以看出,雾霾天气条件下背景消除前后测距误差从 95.09%降为 8.36%,降雪天气条件下背景消除前后测距误差从 115.27%降为 5.45%,大大提高了测距精度。

## 4 结 论

对冬季极端天气条件下的固定点目标进行了测距实验,利用相关 K 分布建立的氧气平均吸收率与路径长度的关系模型解算了背景消除前后的目标距离,发现背景消除可有效提高氧气吸收率的测量精度和测距精度,其中,雾霾天气和降雪天气的距离解算误差分别为 8.36%和 5.45%。因此,背景消除对于目标光谱提取及氧气吸收率计算是非常必要的。通过背景消除可以减少光谱仪所提取光谱中的背景光谱,从而提高目标光谱提取的准确性,增加氧气吸收率计算的精度和测距精度,这为基于氧气吸收被动测距技术的进一步应用提供了一定的支撑。

## 参 考 文 献

- 1 Michael R H, Glen P P. Passive Ranging Using Atmospheric Oxygen Absorption Spectra[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2006.
- 2 Joel R, Louis M, Brandon R, *et al.* Monocular Passive Ranging[R]. Air Force Flight Test Center (AU): USAF Test Pilot School, 2009.
- 3 Joel R Anderson. Monocular Passive Ranging by an Optical System with Band Pass Filtering[D]. Air Force Institute of Technology (AU), 2010.
- 4 R Anthony Vincent, Michael R Howks. Passive ranging of dynamic rocket plumes using infrared and visible oxygen attenuation[C]. SPIE, 2011, 8052: 80520D.
- 5 An Yongquan, Li Jinhua, Wang Zhibin, *et al.* Mono-station and single-band passive ranging based on oxygen spectrum[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 144210.  
安永泉,李晋华,王志斌,等.基于大气氧光谱吸收特性的单目单波段被动测距[J].物理学报,2013,62(14):144210.
- 6 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.
- 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): 214204.  
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):214204.
- 8 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.
- 9 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].光谱学与光谱分析,2014,34(9):2582-2586.
- 10 Yan Zongqun, Liu Bingqi, Hua Wenshen, *et al.* The application of the CKD method in the 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.
- 11 Yan Zongqun, Liu Bingqi, Hua Wenshen, *et al.* Theoretical analysis of the effect of meteorologic factors on passive ranging technology based on oxygen absorption spectrum[J]. Optik, 2013, 124(23): 6450-6455.
- 12 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.
- 13 Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming, *et al.* Profile and character of atmospheric temperature[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 592-596.  
孙 刚,翁宁泉,肖黎明,等.大气温度分布特性及对折射率结构常数的影响[J].光学学报,2004,24(5):592-596.

栏目编辑:史 敏