

# 一个新的氧吸收法被动测距公式

付小宁 单兰鑫 王蕊

西安电子科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710071

**摘要** 基于氧气 A 吸收带的被动测距技术已成为单站被动测距领域最具活力的研究课题之一,但是由于氧气吸收饱和区的存在,限制了被动测距的最大可达范围。采用具有  $1\text{ cm}^{-1}$  分辨率的 Modtran 软件进行了分光谱透射率计算,通过数据建模获得了基于目标天顶角和平均氧气吸收率的被动测距公式。该公式避免了氧气吸收率曲线的饱和区,使得氧吸收法的有效距离估计范围可延伸到 50 km。此外,该公式还有对吸收率测量误差不敏感的特性,例如,在零海拔处传感器最小可检测的吸收率  $\bar{A} = 10^{-2}$  的偏差,所能产生的距离偏差不超过 50 m。该结论有望突破绝大多数氧吸收法被动测距实验局限于较近距离的现状,促进其实际应用。

**关键词** 大气光学; 被动测距; 氧气吸收; 吸收率饱和; 建模

**中图分类号** TN976; TN219 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.1201001

## A New Ranging Formula for Oxygen Absorption Based Passive Ranging

Fu Xiaoning Shan Lanxin Wang Rui

*School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China*

**Abstract** The oxygen A-band passive ranging has become one of the most active research topics in the area of mono-station passive distance estimation. However, the maximum estimating distance with acceptable errors is limited by the saturated zone in oxygen absorption curve. Calculation of the spectral transmittance with Modtran at  $1\text{ cm}^{-1}$  resolution is performed, and through data modeling, a passive ranging formula of zenith angle and average absorption is obtained. This formula avoids saturated zone in the oxygen absorption curve, it makes the effective distance estimation range up to 50 km. In addition, the formula is not sensitive to absorption measurement error. For example, a zero-altitude sensor with a minimum detectable absorbance of  $\bar{A} = 10^{-2}$  yields an approximate range error of not exceeding 50 m. The conclusion is expected to break through current situation of passive ranging based on oxygen absorption at short-range, and promote its practical application.

**Key words** atmospheric optics; passive ranging; oxygen absorption; absorbance of saturated; modelling

**OCIS codes** 010.1030; 010.1285; 050.1940; 050.1970

## 1 引言

2006年,美国空军技术研究院首先提出基于氧气 A 吸收带( $12820\sim 13245\text{ cm}^{-1}/755\sim 780\text{ nm}$ )的被动测距技术<sup>[1]</sup>,其原理是在飞机、火箭发动机中的化学反应为富氧燃烧过程,尾焰经过大气吸收会形成氧的吸收光谱。由于 762 nm 附近波段只有  $\text{O}_2$  吸收,不受其他气体成分干扰、不受天气影响,故这一测量的可靠性高。文献[1]的测距范围只有 2.8 km,后来 Anderson<sup>[2]</sup>将其延伸到 11 km。在有关研究应用中,人们一方面希望测距精度越高越好,另外一方面则希望有效测距范围越大越好。Macdonald<sup>[3]</sup>在类似的研究中建议用高信噪比处理增益的傅里叶变换红外光谱计(FTIR)代替带通滤波,可以使距离估计范围得到改善。2013年,Hawks等<sup>[4]</sup>在 3 km 范围内(对应氧线性吸收区)取得了优于 0.5%的测距误差,他们因 FTIR 方案不适用于可展开系统而弃用之,通过在  $3.5^\circ\sim 8.8^\circ$  光学视场中引入了增强型 CCD 和可变带通液晶显示器,开发出便携式系统,并预言高海拔传感器可能将小误差距离估计范围延伸到 50 km。

收稿日期: 2015-05-13; 收到修改稿日期: 2015-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(60872136)

作者简介: 付小宁(1964—),男,博士,副教授,主要从事光电对抗和光电测量方面的研究。E-mail: xning\_fu@163.com

近几年来,国内对该被动测距技术进行了初步的理论和近程实验研究<sup>[5-8]</sup>,其中影响最大的有中北大学、军械工程学院等单位。Yan等<sup>[9]</sup>将雨、雪、雾等气象因素对测距的影响进行了理论仿真分析,发现氧气吸收特性随气象条件变化很小,证实了基于氧气吸收的稳定性。其他工作如背景辐射对被动测距精度影响分析<sup>[10]</sup>、基于Elsasser传输模型的距离估计<sup>[11]</sup>、分析吸收系数受环境变化的影响<sup>[12]</sup>等。本文分析了距离相关吸收光谱响应曲线,通过数据建模获得了基于目标天顶角和氧气吸收率的被动测距公式。

## 2 吸收率与距离的关系

吸收率的定义为吸收峰与基线的比值。在A吸收带及其附近的光谱范围内,氧气的吸收几乎不受其他吸收气体(如水蒸气、二氧化碳等)的干扰和影响,为吸收率计算提供了方便。本文在A吸收带两侧各取一个窄带实施基线估计,窄带范围为12800~12900 cm<sup>-1</sup>和13200~13300 cm<sup>-1</sup>,通过对窄带内的透射率的拟合得到基线数据。

本文采用了具有1 cm<sup>-1</sup>的光谱精度的Modtran软件进行分光谱的透射率计算。在给定辐射传输路径长度值之下,如6 km,设置Modtran中有关参数与吸收峰计算参数一致,即可获得基线数据。具体为在12800~12900 cm<sup>-1</sup>窄带和13200~13300 cm<sup>-1</sup>窄带中,各提取11个点,对应的波数为12800、12810、12820、…、12900 cm<sup>-1</sup>和13200、13210、13220、…、13300 cm<sup>-1</sup>,这22个采样点处的透射率值如图1所示。

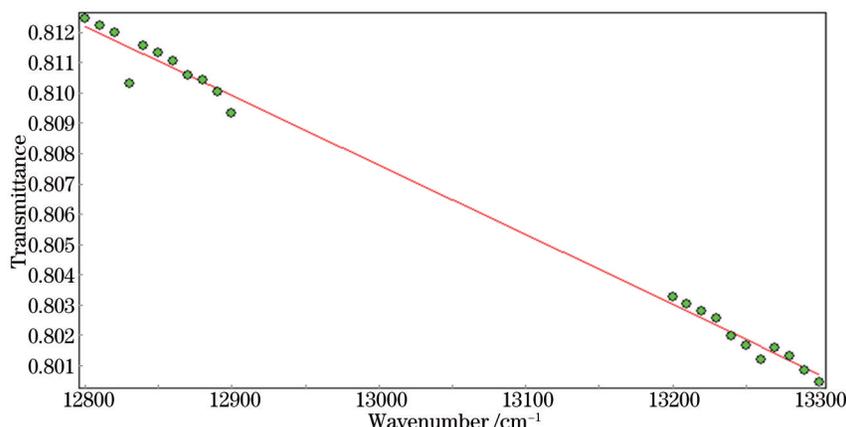


图1 辐射传输路径为6 km的基线数据

Fig.1 Baseline data at path-length of 6 km

图1中,红色曲线即为传输基线,为透射率数值  $T$  经过函数下式拟合得到:

$$T = k_1 \cdot n^2 + k_2 \cdot n + k_3, \quad (1)$$

式中  $n$  为波数,  $k_1 \sim k_3$  为待定系数。

对图1中的传输基线,各待定系数的值为  $k_1 = -7.731729 \times 10^{-10}$ ,  $k_2 = -2.777671 \times 10^{-6}$ ,  $k_3 = 0.974403$ , 方程相关系数为  $r = 0.99709248$ 。

通过类似的操作,可得到其他辐射传输路径下的基线值。

在图2所示的氧气A吸收带透射率曲线中,整个A带所占波数为12900~13170 cm<sup>-1</sup>,其吸收带明显分为2

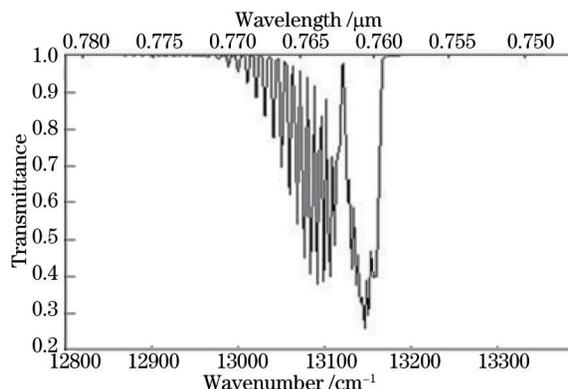


图2 氧气A吸收带透射率

Fig.2 Transmittance of oxygen at A-band

个分支:吸收凹点 13120 cm<sup>-1</sup>左侧的分支所占波段较长,吸收峰有高有低,变化剧烈,所以也更容易受噪声的影响;而右吸收分支平均吸收率较高,且轮廓光滑,受噪声影响较小,意味着在该分支中可获得较高的计算精度。因此,在波数为 13120~13170 cm<sup>-1</sup>的右吸收分支统计吸收率,可以体现 A 吸收带的主要优势和特点;并且,该吸收率曲线饱和前数值范围大于整个 A 带吸收率曲线饱和前的范围<sup>[13]</sup>。

在后续的研究中,设定 13120~13170 cm<sup>-1</sup>波段为吸收带研究对象,定义带内平均吸收率  $\bar{A}$  为

$$\bar{A} = 1 - \bar{T} = 1 - \frac{\sum_{\Delta\omega} I_m(\omega)/I_0(\omega)}{\sum_{\Delta\omega} I_b(\omega)/I_0(\omega)} = 1 - \frac{\sum_{\Delta\omega} T_m(\omega)}{\sum_{\Delta\omega} T_b(\omega)}, \quad (2)$$

式中  $\bar{T}$  代表该带内平均透射率,  $\Delta\omega$  代表波段 13120~13170 cm<sup>-1</sup>,  $I_m(\omega)$  代表该波数点处的辐射强度值,  $I_b(\omega)$  代表该波数点对应基线值,  $I_0(\omega)$  代表该波数对应目标辐射源的辐射强度。

吸收峰计算采用 Mid-Latitude Summer(45°N latitude, July)模式,设定参数为观测天顶角为 60°,观测点海拔高度为 0,大气模型为中纬度夏天,天气为晴朗、无雨无云,大气路径类型为倾斜路径,气溶胶模型为乡村气溶胶模式,能见度  $V_{is} = 23$  km。变化参数为辐射传输路径长度。

在设定条件下,13120~13170 cm<sup>-1</sup>波段上平均氧气吸收率可通过(2)式计算出来。以此类推,辐射传输路径长度变化时,所得平均氧气吸收率如表 1 所示。

表 1 各辐射传输长度下的平均氧气吸收率

Table 1 Average oxygen absorbance at different propagation paths

Path-length /km	Average absorbance	Path-length /km	Average absorbance	Path-length /km	Average absorbance
3	0.475750211	10	0.606378006	25	0.629535195
4	0.515368872	12	0.615967983	30	0.62988942
5	0.543320832	14	0.621841749	35	0.630013363
6	0.563740511	16	0.625274394	40	0.630065329
7	0.578987624	18	0.627219068	45	0.630091201
8	0.590552992	20	0.628346194	50	0.630105606

对表 1 应用 Logistic 函数进行数值拟合,可以得到平均氧气吸收率随辐射传输长度变化的经验公式如下:

$$\bar{A} = m_1 / [1 + m_2 \exp(-m_3 \cdot L)], \quad (3)$$

式中  $m_1 = 0.6290609$ ,  $m_2 = 0.818765$ ,  $m_3 = 0.321348$ , 拟合相关系数  $r = 0.99925386$ , 拟合效果如图 3 所示。

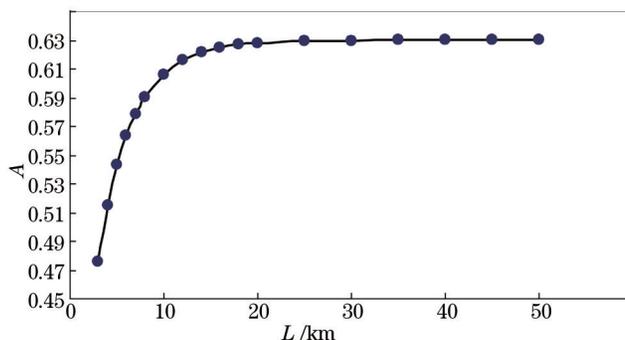


图 3 平均氧气吸收率随距离变化

Fig.3 Working curve of average absorbance versus distance

根据图 3,在到达能见度 23 km 之前,吸收率曲线已经进入饱和区。当能见度设定为其他数值时,也有类似图 3 形状的曲线;即便在不同大气模式下,也有类似的现象<sup>[14]</sup>。

这一现象预示着在实际测量中,当距离接近能见度时,由于曲线开始进入饱和区,产生饱和效应——平均氧气吸收率的测量误差会引起距离误差的剧增。例如,当  $\partial A/\partial R$  下降至  $10^{-4}$  时,最小可检测的吸收率  $\bar{A} = 10^{-2}$  的偏差,将产生大约 100 km 的距离误差<sup>[4]</sup>,这个原因也是当前绝大多数实验限于近距离的主要原因。一般来说,降低吸收率的误差可通过抑制光谱仪谱线的漂移<sup>[15]</sup>、甚至优化光学系统的设计<sup>[16]</sup>来实现。但是,阻滞或回避吸收率曲线的饱和效应则需要另辟蹊径。

### 3 新测距公式的建立

图3所述的平均氧气吸收率随距离变化曲线,存在较大的饱和区,这使得基于(3)式的测距的实际使用受到了限制。另外,基于(3)式的目标距离估计对天顶角不变的设定也不符合目标跟踪的实际情况。因此,有必要纳入其他因素如天顶角,探讨新的目标距离估计公式。

在中纬度夏天,天气晴朗、无雨无云,大气路径类型为倾斜路径,乡村气溶胶模式,能见度  $V_{is} = 23$  km的条件下,结合不同辐射传输距离,通过改变天顶角度和观测点海拔高度,作者建立了该2项条件与平均氧气吸收率的三维模型,如图4所示。

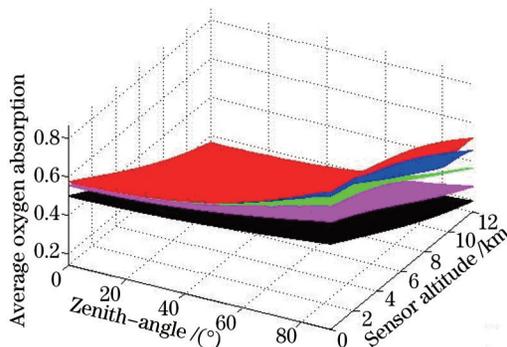


图4 平均氧气吸收率与天顶角、传感器海拔的关系

Fig.4 Average oxygen absorbance versus sensor altitude and zenith-angle

图4中,黑色、粉色、绿色、蓝色、红色曲面分别是辐射传输距离为5、10、20、35、50 km时的平均氧气吸收率曲面。

考虑到观察过程中传感器的海拔可以是固定的,故可以建立特定海拔观测平台的目标距离估计公式。

记天顶角为  $z$ , 单位为 $^\circ$ , 平均氧气吸收率为  $A$ , 无单位标量, 目标距离为  $L$ , 单位为 km。依据图4的数据进行建模, 可得被动测距公式为

$$L = p_1 + p_2 z + p_3 \frac{A}{\sqrt{L}} + p_4 z^2 + p_5 \frac{zA}{\sqrt{L}} + p_6 \frac{A^2}{L} + p_7 \sqrt{L} + p_8 L^{2/3} + p_9 A. \quad (4)$$

对前文中所述气象条件, 当传感器位于0海拔高度时, (4)式中的参数分别为  $p_1 = 8.6105314960252$ ,  $p_2 = -0.0175828417611989$ ,  $p_3 = 145.512387550475$ ,  $p_4 = 0.000417949365349066$ ,  $p_5 = 0.0981269013824215$ ,  $p_6 = -436.340048166205$ ,  $p_7 = -20.2823493357068$ ,  $p_8 = 13.7580569336407$ ,  $p_9 = -18.8483190411291$ 。对不同的地理条件、气象条件,  $p_1 \sim p_9$  会有差别。

尽管(4)式是一个隐函数表达式, 但不妨碍对目标距离的计算。

下面讨论(4)式的测量误差。显然, 距离误差取决于天顶角测量误差和平均吸收率误差, 即

$$\sigma L = \frac{\partial L}{\partial z} \sigma z + \frac{\partial L}{\partial A} \sigma A, \quad (5)$$

式中

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial z} &= \frac{p_2 + 2p_4 z + \frac{p_5 A}{\sqrt{L}}}{1 + \frac{p_3}{2} \frac{A}{L^{3/2}} + \frac{p_5}{2} \frac{zA}{L^{3/2}} + \frac{p_6 A^2}{L^2} + \frac{p_7}{2L^{1/2}} - \frac{2}{3} \frac{p_8}{L^{1/3}}}, \\ \frac{\partial L}{\partial A} &= \frac{p_9 + \frac{p_3}{\sqrt{L}} + \frac{p_5 z}{\sqrt{L}} + \frac{2p_6 A}{L}}{1 + \frac{p_3}{2} \frac{A}{L^{3/2}} + \frac{p_5}{2} \frac{zA}{L^{3/2}} + \frac{p_6 A^2}{L^2} + \frac{p_7}{2L^{1/2}} - \frac{2}{3} \frac{p_8}{L^{1/3}}}. \end{aligned} \quad (6)$$

当传感器为0海拔高度时, 在3~50 km范围内, 最大敏感系数  $\left| \frac{\partial L}{\partial z} \right|_{\max} = 0.02425$ ,  $\left| \frac{\partial L}{\partial A} \right|_{\max} = 4.740758$ 。足见, 文献[4]取  $\sigma L \approx \frac{\partial L}{\partial A} \sigma A$  是有道理的。此时, 最小可检测的吸收率  $\bar{A} = 10^{-2}$  的偏差, 所能产生的距离偏差不

超过 50 m。不同观测海拔  $A_T$  下的距离估计方程系数见表 2。

表 2 不同观测海拔下的距离估计方程的系数

Table 2 Factors for ranging formula at different true altitudes

Factor	$A_T=0$ km	$A_T=4$ km	$A_T=8$ km	$A_T=12$ km
$p_1$	8.6105314960252	0.874663042905413	4.69534806302062	7.32612817109006
$p_2$	-0.0175828417611989	-0.0256959695432152	-0.0149083497825517	-0.0100411683588585
$p_3$	145.512387550475	132.561173640474	80.8479502317214	57.5967831680441
$p_4$	0.000417949365349066	9.68148934004531E-5	-2.54347870676275E-5	-3.71713916372874E-5
$p_5$	0.0981269013824215	0.199052609035635	0.196507719002565	0.24555973062301
$p_6$	-436.340048166205	-461.709390325466	-406.997321429079	-542.424722466135
$p_7$	-20.2823493357068	-16.9823062965133	-17.053876620299	-17.5687545915624
$p_8$	13.7580569336407	12.3103626119915	12.1294937045112	12.2455505908784
$p_9$	-18.8483190411291	-9.47066467463588	-4.39575485369927	-2.13278073056197

对图 4 进行数据分析,得知当传感器海拔分别为 0、4、8、12 km 时,  $\left| \frac{\partial L}{\partial A} \right|_{\max}$  依次为 4.74076、2.75455、3.575455、5.932377。曲线拟合,有

$$\left| \frac{\partial L}{\partial A} \right|_{\max} = 4.6772 - 0.7044h + 0.0679h^2, \quad (7)$$

式中  $h$  为传感器海拔,单位为 km。

根据(7)式,传感器海拔为 4~6 km 时,吸收率测量误差对距离估计的影响较小,这一点与文献[4]可以相佐证。

## 4 结 论

针对以往基于氧气吸收测距系统法测距公式线性区较小的不足,通过增加天顶角参数,提出了一种新的测距公式。仿真计算显示该公式在 3~50 km 距离范围内避免了吸收率饱和区。灵敏度分析表明,该方法在 3~50 km 范围内对氧气平均吸收率的测量误差不敏感,可望将目标距离估计的有效范围推广到 50 km,突破了绝大多数氧吸收法被动测距实验局限于较近距离的现状。另外,仿真分析结果表明,在 4~6 km 海拔高度的传感器可以获得较好的测量效果。

## 参 考 文 献

- 1 Hawks M R. Passive Ranging Using Atmospheric Oxygen Absorption Spectra[D]. Dayton: Air Force Institute of Technology (AU), 2006.
- 2 Anderson J R. Monocular Passive Ranging By an Optical System with Band Pass Filtering[D]. Dayton: Air Force Institute of Technology (AU), 2010.
- 3 Macdonald D J. Passive Ranging Using Infra-Red Atmospheric Attenuation [D]. Dayton: Air Force Institute of Technology (AU), 2010.
- 4 Hawks M R, Vincent R A, Martin J, *et al.*. Short-range demonstrations of monocular passive ranging using  $O_2$  ( $X_3\Sigma_g^- \rightarrow b_1\Sigma_g^+$ ) absorption spectra[J]. Applied Spectroscopy, 2013, 67(5): 513-519.
- 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 Yan Zongqun, Liu Bingqi, Hua Wenshen, *et al.*. Short-range experiment of passive ranging by oxygen absorption[J]. Optics & 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 Wang Zhibing, 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.
- 8 Li Jinhua, Wang Zhibing, Chen Yuanyuan, *et al.*. Calculation of near infrared oxygen A-band atmospheric transmittance[J]. Laser & Infrared, 43(10): 1142-1145.  
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.

- 9 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.
- 10 Yan Zongqun, Liu Bingqi, Hua Wenshen, *et al.*. 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.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 Yan Zongqun, Liu Bingqi, Hua Wenshen, *et al.*. Application of CKD method to passive ranging 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中的应用[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 667-677.
- 15 Zhang Junqiang, Yan Changxiang, Lin Chao. Thermal effect on spectral-line shift of space-borne imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0528001.  
张军强, 颜昌翔, 蔺超. 温度对星载成像光谱仪谱线漂移的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0528001.
- 16 Xue Qingsheng. Optical design of space-based wide field-of-view differential optical absorption imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0122001.  
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.

栏目编辑: 史敏