

文章编号 1004-924X(2013)11-2744-07

利用氧气吸收被动测距的近程实验

闫宗群*, 刘秉琦, 华文深, 张 瑜

(军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要:利用高光谱成像光谱仪作为测量设备, 卤钨灯作为目标, 设计了近程实验方案以验证基于氧气吸收的被动测距技术。介绍了基于氧气吸收的被动测距技术的基本原理和实验方案; 根据测距原理和假设前提, 选择了实验设备和实验目标, 在外场近程条件下对该被动测距技术进行了测试验证。实验证明了该技术在目标辐射情况未知、大气状况未明情况下的测距能力, 显示了该测距技术的可行性和优越性。通过软件仿真曲线和模型拟合曲线对实验数据进行了解算, 得出实验条件下模型测距误差为 4.26%, 仿真测距误差为 6.23%。实验结果表明: 依托实验数据的模型拟合曲线不仅可以较高精度地反演目标距离, 而且可以通过曲线外推实现远程目标的距离解算。

关键词:被动测距; 氧气吸收; 高光谱成像光谱仪; 基线强度

中图分类号: TP73; TH761.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132111.2744

Short-range experiment of passive ranging by oxygen absorption

YAN Zong-qun*, LIU Bing-qi, HUA Wen-shen, ZHANG Yu

(Department of Electronics and Optics Engineering,
Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

* Corresponding author, E-mail: yanzongqun@163.com

Abstract: By using an acousto-optic tunable hyperspectral imaging spectrometer as measurement equipment and a halogen as the target, a short-range experimental program was designed to verify the passive ranging technology based on oxygen absorption. The basic principles and experimental program of the passive ranging technology based on oxygen absorption were introduced. Then, experimental equipment and a target were chosen based on ranging principles and assumptions, and the passive ranging technology was tested and verified under short-range conditions. Experimental results proof that this passive ranging technology also has the ranging capability when the target radiation and atmospheric conditions are unknown, which shows the feasibility and advantages of this ranging technology. The measuring range is solved by a software simulation curve and a model fitting curve, and the results give that the 4.26% ranging error comes from the model fitting curve and 6.23% ranging error from the software simulation curves. This result demonstrates that the model fitting curve based

收稿日期: 2013-05-08; 修订日期: 2013-06-08.

基金项目: 武器装备军内科研计划资助项目

on experimental data not only can invert the target range in higher accuracy, but also can solve the measuring range of a far-range target by the curve extrapolation.

Key words: passive ranging; oxygen absorption; hyper-spectral imager; baseline strength

1 引言

基于氧气吸收的被动测距是利用大气中氧气对目标辐射光谱的吸收来解算目标距离的测距技术。随着大气遥感技术的不断进步,氧气吸收光谱逐渐成为国内外研究的重点^[1-3]。氧气作为一种分布规律、比例恒定的重要大气成分,其吸收光谱较其它气体光谱更具优越性。首先,在其吸收光谱的个别吸收带附近不存在其它气体的干扰;其次,相比于 CO₂ 和水蒸气,氧气光谱吸收带是一个较弱的吸收带,因此对辐射强度一定的目标可以进行更远距离的探测告警;再次,由于燃料的燃烧,目标辐射体内部已无氧气分子存在,从而保证了探测器测得的目标透过率仅与路径上的氧气含量有关,而与自身的选择性吸收无关;最后,由于氧气的吸收带主要位于可见光和近红外波段,在硅探测器的探测范围内,利用非制冷探测器可以进行较高信噪比的目标探测,其结构简单,利于系统的工程化。

相比于其它气体成分的被动测距,利用氧气吸收的被动测距技术使用的光谱带宽仅有几个纳米,谱带模型能够更加准确地描述带宽内吸收率与距离的变化关系;同时,该测距技术通过多个窄带宽光谱测量和基线强度定义摆脱了常规被动测距技术^[4-8]对目标先验信息的依赖,可实现对未知辐射目标的被动测距。由于该测距技术利用的氧气随气象的变化很小甚至可以忽略,所以对于大气层范围内具有尾喷焰发动机的飞行器的距离探测,基于氧气吸收的被动测距技术较其它技术具有更好的稳定性。目前,基于氧气吸收的被动测距技术的研究主要集中在理论研究阶段,国外仅有美国进行了初步的实验验证^[9-12],而国内不管在理论还是在实验上都起步较晚,相关报道极少^[13]。本文从实验出发,一方面在理论研究基础上对该测距技术进行了验证,另一方面通过软件仿真、模型拟合等方法对实验结果进行了评估分析,从而为该技术的工程实践提供依据。

2 基本原理

氧气的吸收带主要有 γ 吸收带(629~679 nm)、B 吸收带(685~699 nm)和 A 吸收带(758~778 nm)。本文选择氧气 A 吸收带作为测距通道,这是因为其吸收强度较其它两个要强得多,在近程实验时氧气吸收率随距离的变化较为明显,利于实验测量和验证。

探测器接收到的辐射强度是目标辐射被大气吸收、散射和大气湍流等衰减后的辐射。由于在氧气 A 吸收带及其附近光谱范围内没有水蒸气、二氧化碳等其它吸收性气体的干扰,所以可以用氧气的吸收率来代替大气吸收,其表达式为:

$$I = I_0 \cdot \tau_{\text{Turb}} \cdot \tau_{\text{Scatt}} \cdot \tau_{\text{O}_2} \cdot \tau_{\text{Filter}} \cdot R_{\text{Cam}}, \quad (1)$$

式中: τ_{Turb} 为大气湍流的透过率; τ_{Scatt} 为大气散射的透过率; τ_{O_2} 为氧气吸收的透过率; τ_{Filter} 为光学滤波片的透过率; R_{Cam} 为相机的光谱响应度; I_0 为目标的辐射强度; I 为探测器接收到的辐射强度。

基于氧气吸收的被动测距技术基于以下两个假设:

(1)假设目标在氧气 A 吸收带附近几十个纳米带宽上的光谱辐射曲线可以近似为一条平滑的直线或者曲线;

(2)假设大气散射和大气湍流对这一窄波段的影响是一致的。

由于测量目标主要为飞机或者导弹尾喷焰,所以其辐射光谱为典型的选择性辐射谱;但是后者由于燃料的充分燃烧不存在氧气分子,即其辐射光谱中不存在氧气吸收谱的选择性吸收,因此在氧气吸收带及其附近较窄波长范围内,可以将尾喷焰的辐射光谱看作黑体辐射谱。在本技术所关心的光谱范围内定义基线强度等于未知的目标辐射强度、大气散射和大气湍流透过率的乘积,如式(2)所示:

$$I_b = I_0 \cdot \tau_{\text{Turb}} \cdot \tau_{\text{Scatt}} \cdot \quad (2)$$

对于吸收因素来说,基线强度可以看作是不存在大气散射和大气湍流等非吸收衰减下的目标等效辐射强度。同时,由于氧气吸收带左右两侧没有任何气体成分的吸收,这时测得左右两侧波带内的辐射强度分别为 I_1 和 I_3 。经过光学系统光谱曲线和探测器响应曲线修正后, I_1 和 I_3 就是在氧气透过率为 1 时的目标等效辐射强度 I_{b1} 和 I_{b3} 。然后,利用假设(1)便可以简单算出氧气吸收带内的目标等效辐射 I_{b2} ,如图 1 所示。测得吸收带内经氧气吸收衰减后的辐射强度 I_2 后,便可以根据吸收前后辐射强度之比计算出大气路径上氧气的吸收系数。

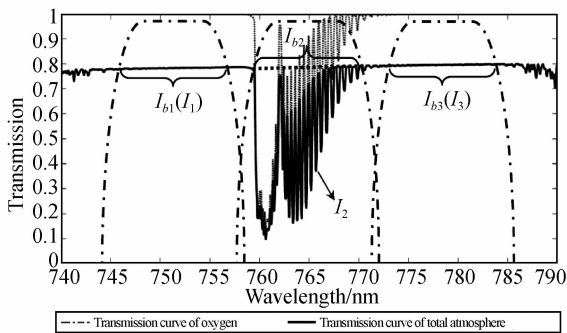


图 1 覆盖滤片片的氧气 A 吸收带附近的大气光谱曲线
Fig. 1 Atmospheric spectra around oxygen A-band overlaid with filters

图 1 为利用大气传输软件 MODTRAN 在中纬度冬季大气轮廓线下生成的大气透过率曲线。图中,实际测量值 I_1 , I_2 和 I_3 分别为相应滤波片带宽内的平均强度值。如果将这一窄波段内的辐射曲线假设为一平滑的直线,则氧气吸收带内的目标等效辐射强度 I_{b2} 便可通过式(3)直接插值得出:

$$I_{b2} = I_{b1} + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_1} (I_{b3} - I_{b1}), \quad (3)$$

式中: λ_1 , λ_2 和 λ_3 分别为 3 个滤波片的中心波长。则路径上的氧气平均吸收率为:

$$A = 1 - I_2 / I_{b2}. \quad (4)$$

通常情况下,根据气体吸收谱带模型来建立氧气吸收率与距离的函数关系模型,然后通过已知的氧气吸收率解算出目标距离值。本文采用文献[3]中建立的氧气吸收率与路径长度的关系模型对实验数据进行拟合,评估和分析实验的

准确性和误差因素。

3 实验装置及实验方案

根据该被动测距技术的基本原理可知,如要得出路径上的氧气平均吸收率,需准确测出 3 个窄光谱波段上的目标辐射强度。本实验的测量装置为一高光谱成像光谱仪。该成像仪主要由成像光学镜头组、可调谐滤波器、EMCCD 相机和相应的控制器及电源组成,其构成如图 2 所示。

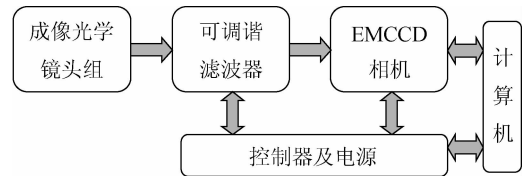


图 2 高光谱成像光谱仪结构框图

Fig. 2 Structure of some hyper-spectral imaging spectrometer

该成像光谱仪的部分性能指标如下:光谱为 450~800 nm;450 nm 波长处的最小光谱分辨率为 1.5 nm,800 nm 波长处的最小光谱分辨率为 3 nm;成像光学镜头为 60 mm 焦距的定焦镜头;探测器为制冷式硅 EMCCD,探测器最高空间分辨率为 1 002 pixel×1 002 pixel,并可通过像元合并方式进行调节,单像元尺寸为 8 μm×8 μm。

由于可调谐滤波器的波长调谐范围和硅探测器的光谱响应范围都包含了实验测量的所有波长,所以该系统能够实现实验波段的测量。但是由于所测波长位于可见光向近红外波段的过渡波段,硅探测器的响应效率较低,所以实验过程中需要采用亮度较高的卤钨灯作为目标源。

由于该被动测距技术是通过计算吸收带上吸收前后的目标辐射强度比来获取目标至探测器路径上的氧气吸收率的,所以该技术适用于任意包含氧气吸收带波段的连续光谱辐射源。本实验以一个功率为 200 W 的卤钨灯作为目标源,虽然它不能代表一种真实的黑体目标源;但是由于它的辐射光谱类似于色温 3 600 K 左右的黑体光谱,所以它对技术验证实验来说,不仅光谱范围、光谱辐射强度满足实验需要,而且有利于实验的快速、

重复测量。

本实验的主要目的方面在于通过实验对该被动测距技术进行验证,另一方面在于利用软件仿真和模型拟合的方法对实验误差进行评估,分析可能影响实验精度的因素。因此,实验需要测量同一路径多个距离点上的目标光谱,并在不同曝光时间下对每个测量点进行多次测量,以此分析曝光时间对光谱数据获取和氧气吸收率解算的影响。目标光谱图像数据是在放大倍率、波长范围和光谱分辨率一定,不同积分时间下获取的,实验场景如图 3 所示。

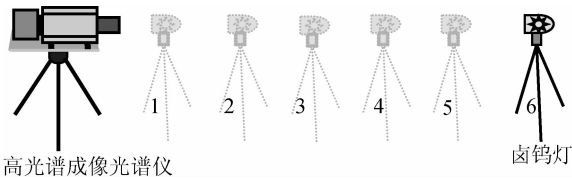


图 3 近程实验数据采集方案图

Fig. 3 Experiment of data acquisition in near field

图 3 给出了近程实验的数据采集方案。实验由近及远共设置了 6 个测量点,每个测量点的真实距离是利用一台激光测距机进行标定的,且每个测量点上分别设置 4 个不同的曝光时间。

4 实验结果

本文利用氧气的 A 吸收带进行近程被动测距的实验验证,设备的测量波长设为 740~790 nm,步长为 1 nm,固定带宽为 3.6 nm;为了尽可能多地收集目标辐射,缩短曝光时间,镜头光圈数选择最大 2.8。激光测距机标定的 6 个测量点的距离分别为 130,195,270,305,370 和 455 m。图 4 给出了距离为 130 m 测量点上曝光时间为 0.3 s 时,目标 740 nm 波长的原始图和三维图。从图中可以看出,目标在图像上的成像为一个面光源,且信号强度要远强于背景强度;同时由于是室外地面静态目标实验,所以静态目标的处理采用的方法是找到目标亮度最大值后,统计灰度值大于某阈值的所有像素点,并将其平均值作为目标在某波长上的光谱灰度值。

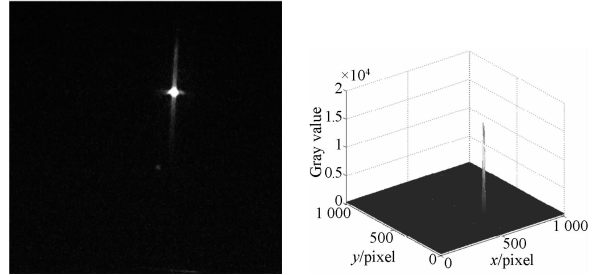


图 4 距离为 130 m 目标在 740 nm 波长处的原始图和三维图

Fig. 4 Raw and three-dimensional images of target at wavelength of 740 nm and range of 130 m

根据目标提取规则,对各个测量点上不同曝光时间下的图像数据分别进行处理,提取各自的光谱曲线。为了比较曝光时间对测量光谱的影响,这里分别将不同测量点各曝光时间的光谱曲线进行比较,如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,在带宽、光圈、距离一定的情况下,目标光谱辐射强度随曝光时间的增加而同比例增加;但当探测器接近饱和时,曝光时间的增加将不会带来光谱强度的正常增幅,反而会丢失光谱曲线的细节信息。曝光时间的上限是由探测器像元的势阱深度决定的。同时,随着曝光时间的增加,所采集的光谱曲线也越来越平滑。这是因为作为目标的卤钨灯,虽然其瞬时光谱强度是不断变化的,但是其平均光强是恒定的。曝光时间的增加对瞬时光强变化起到了平均抑制作用,降低了光谱曲线的噪声,提高了光谱曲线的信噪比,因此对于发射功率恒定的目标而言,适当地延长曝光时间可以提高测量光谱的稳定性,有利于提高计算精度。实验过程中,由于实验目标的辐射功率较小、气象能见度不高、带宽较窄,所以曝光时间会随着距离的增加而逐渐增大;但是在高气象能见度下随着目标功率的增加、带宽的增宽、波带数的减少,曝光时间会大大缩减。

为了更好地理解氧气吸收带吸收深度随目标距离的变化情况,本文将不同距离测量点上采集的光谱强度曲线绘制在同一幅图中,并对其均值进行归一化处理,结果如图 6 所示。

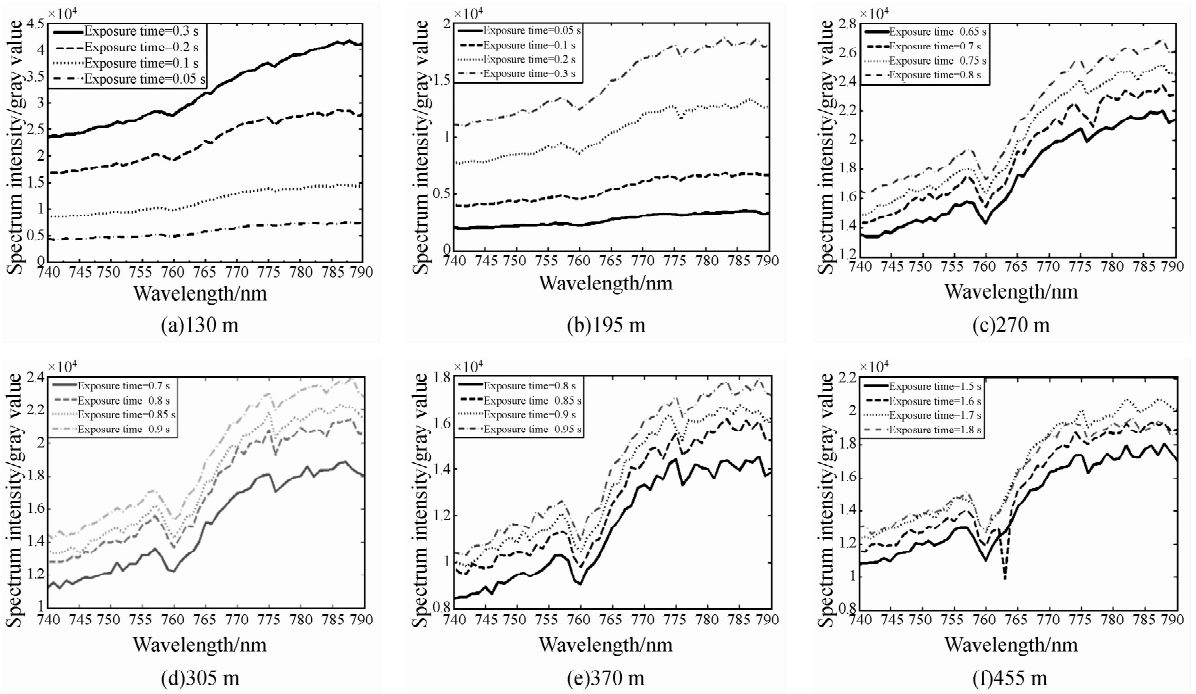


图 5 全部测量点在不同曝光时间下的光谱曲线图

Fig. 5 Spectra of measuring points under different exposure time

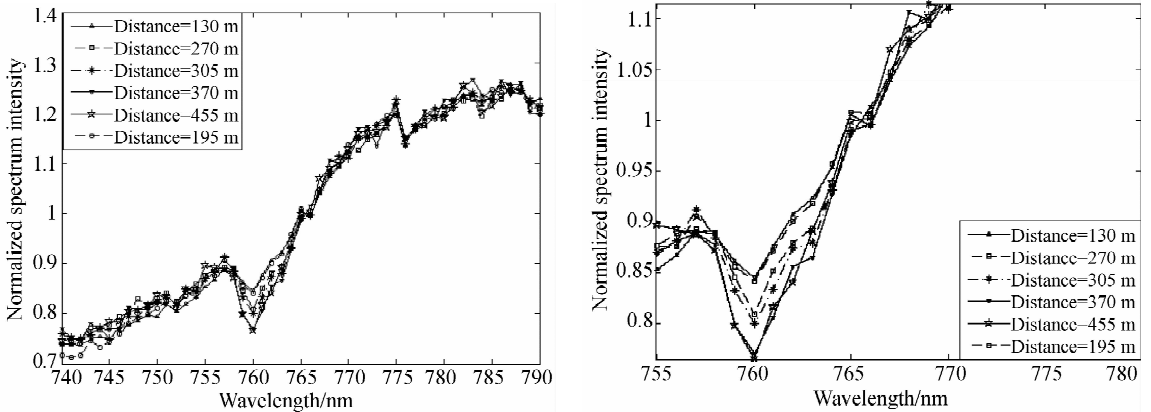


图 6 不同距离点的光谱曲线对比图(左)和吸收带局部放大图(右)

Fig. 6 Correlation images of spectra under different ranges (left) and enlarged view of local absorption band (right)

图 6 中氧气吸收带的吸收深度随距离的增加而加深,这一现象充分证明了利用氧气进行测距的可行性;吸收带加深的程度不仅与距离变化呈正比例关系,而且短距离的位置变化依然可以从吸收带上体现出来,这说明了只要准确测得路径上的氧气吸收率,该测距技术就可以达到很高的

测距精度。

根据该测距技术的基本原理,这里选定用于计算氧气吸收率的 3 个窄波段分别为: 748~758 nm、759~762 nm 和 773~783 nm。利用公式(3)和公式(4)计算所有测量点平均光谱曲线所对应的氧气吸收率,结果如表 1 所示。

表 1 所有测量点距离上的氧气吸收率

Tab. 1 Absorption ratios of oxygen on measuring points

距离值/m	130	195	270	305	370	455
氧气吸收率	0.067 643	0.082 991	0.090 122	0.102 628	0.114 846	0.122 568

为了评估本实验计算得到的氧气吸收率与目标距离的关系,本文一方面利用大气仿真软件 MODTRAN^[14-15] 仿真该距离段上氧气吸收率与路径长度的关系,并与实验所测进行比较;另一方面利用文献[3]中的氧气吸收率与路径关系模型对本实验所测关系进行拟合。同时为了评估测距误差,这里仅取 6 个测量点中的 1,2,3,5 和 6 用于模型拟合,4 点作为未知点,利用模型拟合曲线进行距离估算。

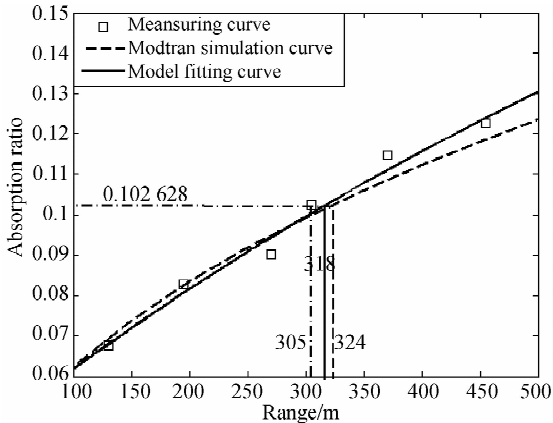


图 7 实际测量数据、软件仿真曲线和模型拟合曲线
Fig. 7 Curves of experiment data, software simulation and model fitting

MODTRAN 软件设定的气溶胶模型为中纬度冬季、地面大气能见度为 1 km;路径几何关系设置为水平路径、测量所在地海拔为 81 m;光谱为 740~790 nm、光谱间隔为 1 nm、各波长处中心带宽为 3.6 nm。由软件仿真和模型拟合所得的曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,软件仿真曲线与实测曲线的偏离误差较模型拟合曲线大,这是由于很难准确测得实

际大气状况和设备与目标的几何关系,软件设置与实际情况存在偏差所造成的;而模型拟合是立足实测数据,根据实际条件得到的某一特定海拔高度和特定天顶角方向上的氧气吸收率与路径长度的关系曲线,因此其测距误差为 4.26%,要小于软件仿真曲线的测距误差 6.23%。拟合得到的模型曲线可以用于解算较远距离处目标距离值。但是由于该谱带模型每次仅能针对某一组特定海拔高度和路径天顶角进行拟合,所以在实际应用中,每次测量都需要大量的前期工作以建立系统工作海拔条件下不同路径天顶角下的氧气吸收率与路径长度对应关系表,方可在获取目标路径吸收率的情况下求解目标距离,这会制约该方法的应用。

5 结 论

本文利用氧气吸收光谱中吸收较强的 A 吸收带进行了地面近程测距实验。实验证明了该被动测距技术在目标未知、大气状况未明的情况下依然可以对目标进行测距,摆脱了常规被动测距方法对目标强度和大气情况的依赖,显示了该被动测距技术的可行性和优越性。通过实测数据、仿真数据和拟合数据的对比可知,模型拟合方法的测距误差为 4.26%,而仿真曲线的测距误差却达 6.23%。显然模型拟合方法更加符合实际使用情况,反演目标距离的精度更高;但是其前期准备的测量工作量和计算量较大。因此下一步的工作不仅要在中远距离上对基于氧气吸收光谱的被动测距技术进行实验验证,还应当研究模型中各个参数随探测系统海拔和路径天顶角的变化规律,以减小该方法的准备时间,增强其布置的实用性。

参考文献:

- [1] 张岩,段民征,韩志刚,等. 氧气 A 吸收带大气遥感应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(2):288-295.
ZHANG Y, DUAN M ZH, HANG ZH G, et al., Review of oxygen a-band research [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(2):288-295. (in Chinese)
- [2] 张岩,吕达仁,段民征. 两种氧气 A 吸收带云顶高度反演算法的理论比较与实测结果验证[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(2):288-295.
ZHANG Y, LÜ D R, DUAN M ZH. Two kinds of cloud top height retrieval methods with oxygen a-

- band comparison by simulated data and verification with experimental results in China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(2):18-32. (in Chinese)
- [3] HAWKS M R. *Passive ranging using atmospheric oxygen absorption spectra* [D]. Air Force Institute of Technology (AU), 2005.
- [4] 冯国强,邹强,李伟仁. 单站双波段红外被动测距算法研究[J]. 红外技术, 2005, 27(4):295-298.
FENG G Q, ZOU Q, LI W R. Algorithm of passive ranging by single station [J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(4):295-298. (in Chinese)
- [5] 付小宁,牛建军,刘上乾. 红外双波段单站被动测距

- 算法研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(6): 648-651.
- FU X N, NIU J J, LIU SH Q. IR passive monostation ranging algorithm using dual-band radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6):648-651. (in Chinese)
- [6] 路远, 凌永顺, 时家明. 双波段红外成像系统对空中点目标测距的方法[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2):161-164.
- LU Y, LING Y SH, SHI J M. Measurement of aerial point target distance using dual-band infrared imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2):161-164. (in Chinese)
- [7] 王刚, 禹秉熙. 基于对比度的空中红外点目标探测距离估计方法[J]. 光学精密工程, 2002, 10(3): 276-280.
- WANG G, YU B X. Approach to estimate infrared point target detection range against sky background based on constrast [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3):276-280. (in Chinese)
- [8] 路远, 冯云松, 凌永顺, 等. 红外三色被动测距[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12):2680-2085.
- LU Y, FENG Y S, LING Y SH, *et al.*. Infrared three-color passive ranging by colorimetric method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2680-2085. (in Chinese)
- [9] JOEL R, LOUIS M, BRANDON R, *et al.*. *Monocular Passive Ranging*[D]. Air Force Flight Test Center (AU), 2009.
- [10] ANDERSON J R. *Monocular Passive Ranging by an Optical System with Band Pass Filtering*[D]. Air Force Institute of Technology (AU), 2010.
- [11] VINCENT R A. *Passive Ranging of Dynamic Rocket Plumes Using Infrared and Visible Oxygen Attenuation*[D]. Air Force Institute of Technology (AU), 2011.
- [12] HAWKS M R, VINCENT R A, MARTIN J, *et al.*. Short-range demonstrations of monocular passive ranging using $O_2(X3\Sigma g \rightarrow b1\Sigma g +)$ absorption spectra [J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(5): 513-519.
- [13] 宗鹏飞, 王志斌, 张记龙, 等. 基于红外被动测距的基线拟合算法研究[J]. 激光技术, 2013, 37(2): 174-177.
- ZONG P F, WANG ZH B, ZHANG J L, *et al.*. Study on baseline fitting method based on passive infrared range measurement[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 174-177. (in Chinese)
- [14] SPARKS L. Efficient line-by-line calculation of absorption coefficients to high numerical accuracy [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1997, 57: 631-650.
- [15] 张华, 石广玉. 一种快速高效的逐线积分大气吸收计算方法[J]. 大气科学, 2000, 24(1):111-121.
- ZHANG H, SHI G Y. A fast and efficient line-by-line calculation method for atmospheric absorption [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2000, 24(1):111-121. (in Chinese)

作者简介:



闫宗群(1986—),男,河南获嘉人,博士研究生,2008年,2010年于军械工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事光电对抗和多目标跟踪方面的研究。E-mail: yanzongqun@163.com



张瑜(1987—),男,河北石家庄人,博士研究生,2009年,2011年于军械工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事激光对抗方面的研究。E-mail: sjzzhangyu@yahoo.com

导师简介:



华文深(1967—),男,河北石家庄人,副教授,硕士生导师,1988年于河北师范大学获得学士学位,1995年于华南理工大学获得硕士学位,2003年于北京科技大学获得博士学位,2005年于军械工程学院博士后流动站出站,主要研究方向为光学测试、光学功能材料,光学信息处理等。E-mail: huawenshen@126.com



刘秉琦(1962—),男,河北衡水人,教授,博士生导师,1983年于天津大学获得学士学位,1990年于军械工程学院获得硕士学位,2005年于北京理工大学获得博士学位,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: whelmmail@sina.com