

背景辐射对被动测距精度影响分析及实验研究

张瑜 刘秉琦 闫宗群 华文深 李刚

Influence of background radiation on the precision of passive ranging

Zhang Yu Liu Bing-Qi Yan Zong-Qun Hua Wen-Shen Li Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034216 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034216

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034216>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大气环境下基于目标照明回光的视轴误差校正实验研究

Experimental research of boresight error correction using returning signals from the illuminated targets through atmosphere

物理学报.2015, 64(2): 024216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024216>

湍流介质折射率结构常数 C_n^2 对双半高斯空心光束传输特性影响的研究

Effects of turbulent medium refractive index structure constant C_n^2 on the propagation characteristics of double-half hollow Gaussian beams

物理学报.2014, 63(16): 164208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164208>

自加速类贝塞尔-厄米-高斯光束的理论和实验研究

Theoretical and experimental study on self-accelerating Bessel-like Hermite-Gaussian beams

物理学报.2014, 63(4): 044204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.044204>

基于大气氧光谱吸收特性的单目单波段被动测距

Mono-station and single-band passive ranging based on oxygen spectrum

物理学报.2013, 62(14): 144210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144210>

多轴差分吸收光谱技术测量近地面 NO_2 体积混合比浓度方法研究

Retrieval of surface NO_2 mixing ratio from multi-axis differential optical absorption spectroscopy

物理学报.2013, 62(4): 044216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.044216>

背景辐射对被动测距精度影响分析及实验研究

张瑜[†] 刘秉琦 闫宗群 华文深 李刚

(机械工程学院电子与光学工程系, 石家庄 050003)

(2014年7月10日收到; 2014年7月22日收到修改稿)

为了分析背景辐射对基于氧气吸收被动测距精度的影响, 利用高光谱成像光谱仪作为测量设备, 卤钨灯作为目标, 进行了实验研究. 首先, 介绍了基于氧气吸收被动测距技术的基本原理; 接着, 利用高光谱成像仪采集了夜间不同距离下的卤钨灯目标光谱分布, 根据氧气吸收被动测距原理, 计算了目标的氧气吸收率, 建立了氧气吸收率与路径关系的模型; 然后采集并计算了晴天 2360 m 处目标在不同时刻下的氧气吸收率分布, 根据所建模型, 利用白天测得的氧气吸收率数据解算距离并分析测距误差, 最终获得背景辐射对被动测距误差的影响. 结果表明: 依据所建立的模型, 白天测距误差最大 6.74%, 并且随着太阳高度角变小, 所处背景变暗, 误差逐渐变小, 到夜间时最小相对误差仅 1.10%, 可达到较高测距精度.

关键词: 氧气 A 吸收带, 被动测距, 氧气吸收率, 背景辐射**PACS:** 42.68.Ay, 92.60.Ta, 43.58.Kr**DOI:** 10.7498/aps.64.034216

1 引言

基于红外辐射传输特性的被动测距技术在国内外发展迅猛^[1-3]. 其主要是通过接收目标辐射的热能对其进行搜索与跟踪测距, 实时性强, 具有隐身特性. 基于氧气 A 吸收带 (12820—13245 cm^{-1} /755—780 nm) 的被动测距技术由美国空军技术研究院的 Michael R. Hawks 在 2006 年首先提出, 文献^[4-7]详细比较了 O_2 , CO_2 气体各个吸收波段的大气传输特性, 证明了 762 nm 附近波段只有氧气吸收, 不存在其他气体成分干扰; 同时对飞行中的 F-16 战斗机以及发射过程中的 Falcon 9 运载火箭进行了跟踪与测距, 在发射过程长达 90 s 的跟踪测量实验中, 最大探测距离约为 90 km, 最大测量误差 <5%, 平均测量误差 <3%. 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^[8-11], 建立了 762+nm 氧分子吸收带大气透过率的温压多项式^[12], 提出了利用多项式插值拟合算法对氧分子吸收带进行基线拟合^[13], 并将雨、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^[14], 但并未通过

实验分析研究背景辐射对被动测距精度的影响.

相比于其他波段的被动测距来说, 氧气吸收带吸收程度较弱, 对辐射强度一定的目标可以进行较远距离的测距. 但是, 在对飞行目标发动机尾焰进行距离探测时, 背景光散射构成了主要的背景噪声, 使得探测目标的距离信息受背景辐射影响. 因此, 分析背景辐射对被动测距精度的影响就显得非常重要.

本文在分析利用氧气吸收进行被动测距原理的基础上, 设计了实验方案, 利用高光谱成像仪采集目标辐射信息, 通过分析计算不同距离下目标光谱信息及氧气吸收率的变化, 建立了氧气吸收率与路径的关系模型, 并分析了基于该模型时背景辐射对距离解算精度的影响, 为后续被动测距背景抑制和测距精度的提高奠定基础.

2 光谱被动测距的基本原理

2.1 氧气 A 吸收带

氧气分子是大气中浓度相对稳定的成分, 位于红外和近红外之间 (12820—13245 cm^{-1} /755—780

[†] 通信作者. E-mail: zhangyuoc@163.com

nm) 的氧气 A 吸收带, 是由氧气分子磁偶极矩引起转动跃迁而形成的分子吸收带, 其他气体在此带内几乎没有吸收, 属于较为“纯净”的吸收带. 其谱线为分布规则的双峰结构, 由氧气分子磁偶极矩转动跃迁而形成的, 因此吸收强度大.

当红外军事目标(喷气式战斗机或导弹等)飞行时, 尾焰向外辐射电磁波, 经过传输 x 路程后, 探测器所接收到氧气 A 带的辐射强度表达式为^[9]

$$P(x) = P_0 \cdot \tau_{\text{Turb}} \cdot \tau_{\text{Scatt}} \cdot \tau_{\text{O}_2} \cdot R_{\text{Cam}}, \quad (1)$$

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; R_{Cam} 为相机的光谱响应度; P_0 为目标自身辐射强度; $P(x)$ 为探测器接收到的辐射强度.

此处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的乘积, 即

$$P_b = P_0 \cdot \tau_{\text{Turb}} \cdot \tau_{\text{Scatt}}. \quad (2)$$

对于氧气吸收带而言, 基线强度可以看作是仅存在大气散射和大气湍流等非氧气吸收衰减下的目标等效辐射强度. 所以(1)式可以表示为

$$P(x) = P_b \cdot \tau_{\text{O}_2} \cdot R_{\text{Cam}}. \quad (3)$$

由于氧气吸收带没有任何其他气体成分的吸收, 因此只要测得氧气吸收带的基线 P_b 的值就可以获得距离信息. 这里采用插值的方法, 首先获得氧气吸收带左右两侧的光谱强度 P_{b1} 和 P_{b3} , 这可以视为在氧气透过率为 1 时的目标等效辐射强度; 通过 P_{b1} 和 P_{b3} 插值得到的 P_b 即为氧气吸收带处的目标等效辐射,

$$P_b = P_{b1} + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_1} (P_{b3} - P_{b1}), \quad (4)$$

式中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为三个波段所对应的中心波长. 则路径上的氧气平均吸收率可以表示为

$$A = 1 - P(x)/P_b. \quad (5)$$

2.2 朗伯-比尔定律

目标尾焰辐射经过一定距离的传输到达光电传感器, 在传输的过程中会受到大气的吸收、散射、大气湍流等衰减过程, 只有一部分辐射功率能传输到传感器. 这个传输过程遵循总功率守恒定律和朗伯-比尔定律.

辐射在大气内传播时产生衰减的主要原因是介质对辐射的吸收和散射. 忽略散射作用, 一平行

辐射束在均匀的吸收介质内传播 dx 路程之后, 其辐射功率减少 dP . 被介质吸收掉的辐射功率的相对值 dP/P 与通过的路程 dx 成正比, 即

$$-\frac{dP}{P} = \alpha dx, \quad (6)$$

式中 α 为介质的吸收系数, 是波长的函数 $\alpha(\lambda)$, 负号表示 dP 是从 P 中减少的数量.

根据朗伯-比尔定律^[15,16], 目标辐射经过传输 x 距离后, 其辐射功率 $P(x)$ 表示为

$$P(x) = P(0) e^{-\alpha(\lambda)x}, \quad (7)$$

式中 $P(0)$ 是在 $x = 0$ 处即目标初始辐射功率.

根据比尔定律可知, 在吸收带中心波长处的氧气吸收率表示为

$$A = \frac{P(0) - P(x)}{P(0)} = 1 - \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x). \quad (8)$$

根据(5)式和(8)式便可以得出目标距离 x 的计算公式为

$$x = \frac{1}{\alpha(\lambda)} \ln \frac{P_b}{P(x)}. \quad (9)$$

由此可见, 只要实时测得三个谱段处的光强, 便可以根据(9)式计算出目标的距离. 公式中采用的是相对光强, 可以消除气溶胶散射、大气湍流等未知因素和各种气象变化对目标距离计算精度的影响.

3 实验装置和方案

根据前文所述的被动测距技术的基本原理可知, 要想得到传输路径上的氧气平均吸收率, 需准确测出氧气 A 吸收带及左右两侧三个窄光谱波段上的目标辐射强度, 然后建立氧气吸收率与距离的关系模型来解算目标距离.

实验采用某型号高光谱成像光谱仪作为数据采集设备. 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, 其部分性能指标如表 1 所示.

表 1 光谱仪性能参数

性能	参数
光谱范围/nm	450—800
探测器	EMCCD
单像元尺寸/ μm	8×8
最小光谱分辨率/nm	1

实验选取亮度 1 kW 卤钨灯作为目标, 它的辐射光谱类似于色温 3600 K 左右的黑体光谱, 其光谱范围和光谱辐射强度均满足实验需要, 目标的真实距离由某型激光测距机进行标定. 为去除背景辐射对测距精度的影响, 首先选择在中纬度晴朗夏夜, 利用光谱仪对不同距离下目标的光谱信息进行采集, 然后利用 (4) 式和 (5) 式计算不同距离下目标氧气吸收率, 建立该经纬度夏季氧气吸收率与距离的关系模型. 然后在晴朗白天将目标置于一固定位置, 利用激光测距机标定目标和光谱仪的实际距离, 每隔一小时采集一次目标光谱信息, 分析不同时刻背景辐射对氧气吸收率及距离解算精度的影响.

4 氧气吸收率与路径关系模型的建立

测量地点位于东经 114.51°, 北纬 38.04°, 5 月 21 日夜, 地面能见度 5 km, 城市气溶胶, 探测器置于教学楼楼顶, 海拔约 80 m, 移动卤钨灯目标的位置, 目标置于不同距离楼体窗口, 并且和目标大致在同一海拔高度, 实际距离由某型激光测距机测定, 因移动目标所引起目标海拔的变化在 10 m 以内, 故观测天顶角近似为 90°, 忽略因观测天顶角改变所引起的误差, 同时忽略城市杂散灯光对背景的影响, 设置测量波段为 740—790 nm, 光谱分辨率为 1 nm, 固定带宽为 3.6 nm, 分别采集了 570 m, 1095 m, 1255 m, 1905 m, 2360 m 距离下目标辐射光谱, 并利用其均值进行了归一化, 如图 1 所示.

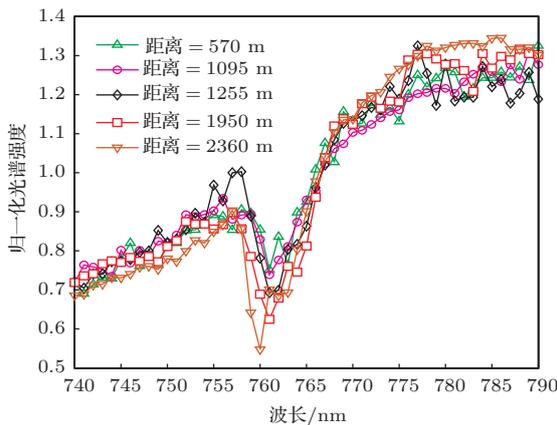


图 1 不同距离下目标归一化光谱分布

图中可以看出在不同距离下吸收峰值有 1—2 nm 的偏移, 所以在计算氧气吸收率时, 选择氧气 A 吸收带中心波长吸收最强的波段 759—762 nm,

选定另外两个窄波段分别为 748—758 nm 和 773—783 nm. 利用 (4) 式得到所选氧气 A 吸收带处基线强度值, 然后根据 (5) 式计算得到了不同时刻下目标的氧气吸收率分布, 计算得到不同距离下目标经大气传输后氧气吸收率分布如表 2 所示.

表 2 探测距离与吸收率对应关系

距离值/m	570	1095	1255	1950	2360
氧气吸收率	0.106514	0.167262	0.189412	0.231312	0.278334

将本实验所测的氧气吸收率与路径关系模型进行指数拟合, 拟合结果如图所示, 该拟合结果作为东经 114.51°, 北纬 38.04° 夏季氧气吸收率与路径关系模型.

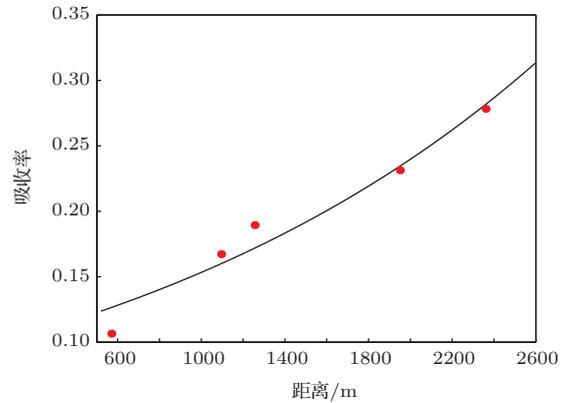


图 2 氧气吸收率与路径关系模型拟合曲线

5 白天不同时刻目标光谱辐射测量及误差分析

在建立模型之后, 为分析晴天背景辐射对被动测距的影响, 进行了白天不同时刻同一距离下氧气吸收率测量. 测量地点位于东经 114.51°, 北纬 38.04°, 5 月 22 日, 地面能见度 5 km, 城市气溶胶, 晴天无云, 日出时间为 5: 06, 日落时间 19:34. 探测器置于上节实验的 2360 m 处; 观测方向为正南, 目标朝向正北, 视野开阔无遮挡. 因上下午太阳高度角和方位角对称, 所以测量时间从下午一点半开始, 每间隔一个小时采集一次, 这里以正南为零度太阳方位角.

设置测量波段为 740—790 nm, 光谱分辨率为 1 nm, 固定带宽为 3.6 nm, 积分时间 0.12 s, 图 3 给出了下午 14:30 时光谱仪所采集的 740 nm 波长的原始图像及方框内的灰度分布三维图, 图中方框内亮点为距离 2360 m 处的卤钨灯目标.

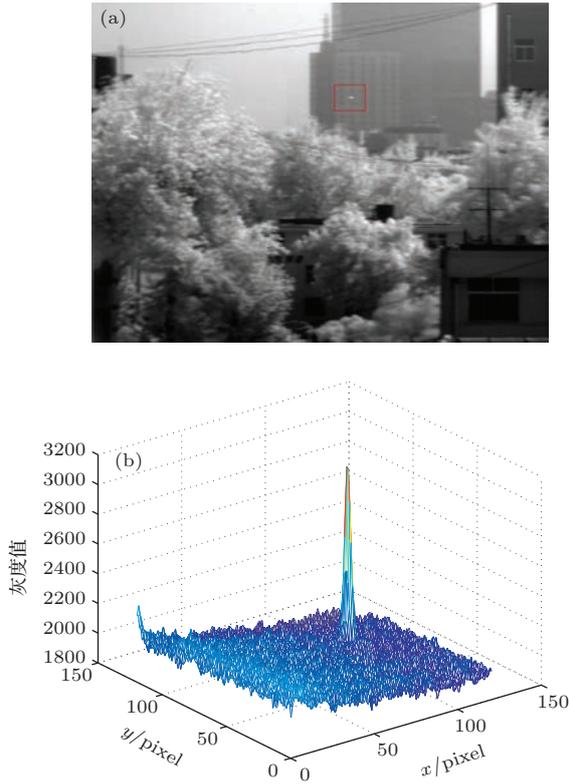


图3 下午14:30时740 nm波长图像 (a) 原始图像; (b) 方框内的三维图

分别对不同时刻下采集到的图像数据进行处理, 提取各自的光谱曲线, 而后将目标光谱强度曲线利用各自的均值进行归一化处理并绘制在同一幅图中, 如图4所示. 利用与上节同样的方法计算得到了不同时刻下目标的氧气吸收率分布, 计算结果如表3和图5所示.

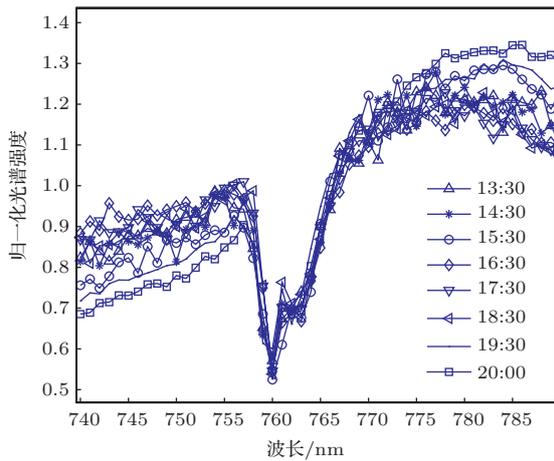


图4 不同时刻下目标归一化光谱分布

从氧气吸收率随时间的变化规律图我们可以看出, 随着时间的推移, 太阳高度角变小, 所测得的

目标氧气吸收率逐渐减小.

利用上节所建立的氧气吸收率和路径关系模型, 分析不同时段所解算的距离值与实际值的差异, 进而得到背景辐射对测距精度的影响. 图6为不同时段所测得的氧气吸收率对应的距离解算值, 对其误差的分析如表4所示.

表3 不同时刻下目标的氧气吸收率

时刻	太阳高度角/(°)	太阳方位角/(°)	氧气吸收率
13:30	66.53	-46.19	0.302478
14:30	56.60	-67.56	0.295324
15:30	45.24	-80.74	0.294735
16:30	33.48	-90.75	0.291466
17:30	21.73	-99.48	0.288624
18:30	10.27	-107.48	0.2762700
19:30	-0.64	-116.86	0.274055
20:00	夜间	夜间	0.278334

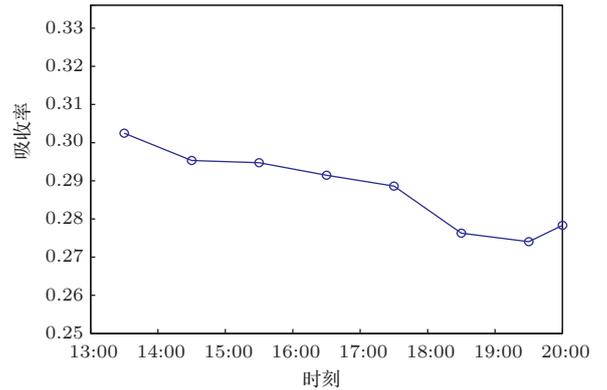


图5 不同时刻下目标吸收率分布图

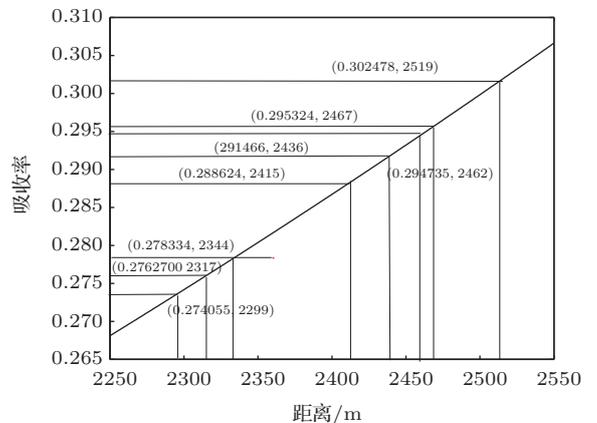


图6 不同时段所测得的氧气吸收率对应距离解算值

表4 距离解算值及误差

时刻	13:30	14:30	15:30	16:30	17:30	18:30	19:30	20:00
氧气吸收率	0.302478	0.295324	0.294735	0.291466	0.288624	0.2762700	0.274055	0.278334
距离解算值/m	2519	2467	2462	2436	2415	2317	2299	2334
绝对误差/m	159	107	102	76	55	-57	-61	-26
相对误差/%	6.74	4.53	4.32	3.22	2.33	2.42	2.58	1.10

通过对不同时刻所采集到的2360 m处目标氧气吸收率对应模型中距离的解算,可以看出在13:30时误差最大,其中绝对误差159 m,相对误差6.74%,此时太阳高度角大,随着时间推移,太阳高度角变小,整个背景变暗,对测距的影响逐渐变小,误差减小,在夜间误差最小,绝对误差仅-26 m,相对误差1.10%,达到了较高的测距精度.

6 结 论

通过实验得到了夜间不同距离下目标氧气吸收率与距离对应关系,据此建立了氧气吸收率与路径关系的模型,通过对晴天不同时刻2360 m处目标光谱分布的采集和氧气吸收率的计算,并根据模型解算实验所得距离数据,可以发现,在白天测距误差最大6.74%,随太阳高度角的变化,背景辐射变小,测距误差变小,到夜间相对误差1.10%.因此,在后续被动测距的研究中,须充分考虑背景辐射的影响,研究背景抑制方法,力求在一定经纬度和季节下,建立的被动测距模型能满足不同背景辐射环境下的目标探测.

参考文献

- [1] Kalyuzhny N M, Alexandrov S N, Asanov E E 2002 *Telecommunications and Radio Engin.* **58** 138
- [2] Lu Y, Feng Y S, Ling Y S, Qiao Y 2012 *Optics and Precision Engineering* **20** 2680 (in Chinese) [路远, 冯云松, 凌永顺, 乔亚 2012 光学精密工程 **20** 2680]
- [3] Yang D G, Xiao S P 2009 *Infrared and Laser Engineering* **38** 946 (in Chinese) [杨德贵, 肖顺平 2009 红外与激光工程 **38** 946]
- [4] Hawks M R 2006 *Ph.D. Dissertation* (Ohio: Air Force Institute of Technology)
- [5] Anderson J R, Szczukowski L M, Abel B R, Johnson K E, Zavala E O 2009 *Project Air Cyclops* (Ohio: Air Force Institute of Technology)
- [6] Anderson J R 2010 *M.S. Thesis* (Ohio: Air Force Institute of Technology)
- [7] Vincent R A 2011 *M.S. Thesis* (Ohio: Air Force Institute of Technology)
- [8] An Y Q, Li J H, Wang Z B, Wang Z B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 144210 (in Chinese) [安永泉, 李晋华, 王志斌, 王召巴 2013 物理学报 **62** 144210]
- [9] Yan Z Q, Liu B Q, Hua W S, Zhang Y 2013 *Optics and Precision Engineering* **21** 2744 (in Chinese) [闫宗群, 刘秉琦, 华文深, 张瑜 2013 光学精密工程 **21** 2744]
- [10] Wang Z B, Zong P F, Li X 2013 *Chinese Journal of Lasers* **40** 0815002 (in Chinese) [王志斌, 宗鹏飞, 李晓 2013 中国激光 **40** 0815002]
- [11] Li J H, Wang Z B, Chen Y Y, Zong P F, Zhang P F 2013 *Laser & Infrared* **43** 1142 (in Chinese) [李晋华, 王志斌, 陈媛媛, 宗鹏飞, 张鹏飞 2013 激光与红外 **43** 1142]
- [12] Zhang Z X, Shu X Z, Chu J H, Li Z 2012 *J. Infrared Millim. Waves* **31** 203
- [13] Zong P F, Wang Z B, Zhang J L, Chen Y Y 2013 *Laser Technology* **37** 174 (in Chinese) [宗鹏飞, 王志斌, 张记龙, 陈媛媛 2013 激光技术 **37** 174]
- [14] Yan Z Q, Liu B Q, Hua W S 2013 *Optik* **124** 6450
- [15] Liu Z M, Liu W Q, Gao M G, Tong J J, Zhang T S, Xu L, Wei X L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4184
- [16] Zhu X F, Lin Z X, Liu L M, Shao J Y, Gong W 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 174203 (in Chinese) [朱湘飞, 林兆祥, 刘林美, 邵君宜, 龚威 2014 物理学报 **63** 174203]

Influence of background radiation on the precision of passive ranging

Zhang Yu[†] Liu Bing-Qi Yan Zong-Qun Hua Wen-Shen Li Gang

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

(Received 10 July 2014; revised manuscript received 22 July 2014)

Abstract

Experimental program is designed to analyze the influence of background radiation on the accuracy of passive ranging based on oxygen spectral absorption; an acousto-optic tunable hyper spectral imaging spectrometer is used as the measuring device and a halogen light as the target. Firstly, the basic principles and experimental program of passive ranging technology based on oxygen absorption are introduced; then the halogen light spectral distribution at different distances during the night is collected using the acousto-optic tunable hyper spectral imaging spectrometer. Oxygen absorption rate is calculated and the relationship model between the oxygen absorption rate and the path is established according to the principle of oxygen spectrum absorption passive ranging. Then the oxygen absorption rate of the target is collected and calculated at the distance of 2360 m for different time. The measuring ranges during the day are solved by the model and the errors are analyzed, the influence of background radiation on the passive ranging is gained finally. Results show that according to the model, the maximum ranging error is 6.74% during the daytime, and the error becomes smaller with the elevation angle of the sun becoming smaller and the background darker. The results give 1.10% ranging error during the nighttime.

Keywords: oxygen A absorption band, passive ranging, oxygen absorption rate, background radiation

PACS: 42.68.Ay, 92.60.Ta, 43.58.Kr

DOI: [10.7498/aps.64.034216](https://doi.org/10.7498/aps.64.034216)

[†] Corresponding author. E-mail: zhangyuoecc@163.com