

基于 O₂ 吸收特性单站被动测距机理研究

安永泉^{1,2,3}, 王志斌^{1,2,3}, 李晋华^{1,2,3}, 王召巴^{1,2}

- (1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051;
3. 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘要: 大气中氧分子浓度分布相对稳定, 随纬度位置和季节变化不大; 吸收波段跨越 762 nm, 易于被非低温探测器探知; 带内无叠加其他大气组分吸收谱。据此提出基于其吸收特性的比尔定律被动测距。通过基线拟合寻找 762 nm 和 690 nm 附近的吸收率来反演距离。朗伯-比尔定律应用中的一项目固有误差项被发现, 定义为非线性初值。其本质是仪器非理想特性的限制引起的不可消除的线间辐射强度。搭建距离测算实验平台, 对东经 113°, 北纬 38° 地区, 不同季节不同时段不同天气条件, 建立大量的不同组约束条件下的氧吸收率与距离的关系样本数据库。统计拟合得到经验模型实时修正理论模型中的非线性初值项, 距离反演精度小于 2.7%。

关键词: 氧吸收特性; 谐振频带; 被动测距; 统计实验

中图分类号: TP751.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0310-07

Research on single station passive ranging based on O₂ absorption characteristics

An Yongquan^{1,2,3}, Wang Zhibin^{1,2,3}, Li Jinhua^{1,2,3}, Wang Zhaoba^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The distribution of oxygen density is relatively stable in the atmosphere. It changes little with latitude and season. Its absorption bands step across 762 nm which is easy to be obtained by non-cryogenic detectors. No other absorption spectrum of atmospheric constituents add to this band. Accordingly, the single station passive ranging based on O₂ absorption characteristics and Beer's law was proposed. The absorption rate near 762 nm and 690 nm was used to calculate distance by baseline fitting. An inherent error term was found in application of Lambert-Beer law. It was defined as Nonlinear Initial Value (NIV). Its innate character is the radiation intensity between the lines caused by limitations of instrument characteristics. It can not be eliminated. The experimental platform was built to calculate the distance. For 113 degrees east longitude, 38 degrees north latitude, different seasons, times and weather

收稿日期: 2014-05-12; 修订日期: 2014-06-15

基金项目: 国际科技合作项目(2013DFR10150); 国家自然科学基金(61074184)

作者简介: 安永泉(1976-), 女, 副教授, 博士, 主要从事光学信息处理方面的研究。Email: anyongquan107@163.com

conditions, a large number of samples were collected to establish the database. Each sample is a relationship between absorption rate and distance in one set of constraints. Empirical model was gotten through statistical fitting. The Nonlinear Initial Value (NIV) in theoretical model was corrected in real time. The distance inversion accuracy is 2.7%.

Key words: oxygen absorption characteristics; resonant frequency band; passive ranging; statistical experimental

0 引言

基于红外辐射传输特性的被动测距技术目前国内外发展迅猛^[1]。通过接收目标辐射的热能对其搜索与跟踪,隐身无源,结构精炼易布署,实时性强,动态范围大。

基于大气传输衰减特性的单站红外光谱被动测距法由美国空军技术研究院的 Michael R. Hawks 在 2006 年首先提出^[2],旨在弥补单站双波段差分被动测距法的不足,协助战区弹道导弹防御系统在第一时间发现处于助推起飞阶段的敌方导弹位置。课题组详细比较了 O₂、CO₂ 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 O₂ 吸收,不受其他气体成分干扰,受天气影响小,利用该波段,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%。但其带平均吸收系数处理方式导致推导的距离值误差较大,需额外计算目标黑体辐射基线,计算量巨大,并引入了新误差。

国内很多学者对相关技术进行了深入研究。建立了 762+nm 氧分子吸收带大气透过率的温压多项式^[3];应用 Modtran 软件进行蒙特卡洛大气红外传输建模^[4];利用相邻采样时刻目标辐射强度的关系,建立了小采样间隔内目标辐射强度与目标距离及大气消光系数的关系式^[5];对影响单站单波段被动测距精度的因素进行了分析,提出了线性预测的思想^[6];提出了多项式插值拟合算法进行氧分子吸收带基线拟合^[7];采用二维谱图还原算法建立了光栅光谱仪标定模型^[8]等等,为基于大气衰减的单站被动测距奠定了理论基础,但在基本物理定律——朗伯-比尔定律的应用中,由于仪器非理想特性的限制,谱段内的谱线计算宽度达不到足够小,计算中存在不可消除的

线间辐射强度。将其定义为非线性初值。文中工作是分析理论模型,搭建距离测算实验平台,建立大量的不同组约束条件下的氧吸收率与距离的关系样本数据库。统计拟合得到经验模型实时修正理论模型中的非线性初值项,确保距离反演精度。

1 基于氧吸收特性的距离反演

辐射源到光电探测器,存在一定距离。来自辐射源的辐射受到所在介质的吸收、散射,光学元件表面的反射等过程的衰减,只有一部分辐射功率被探知。这个物理过程遵循两大定律:总功率守恒定律和朗伯-比尔定律。

1.1 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^[1],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:

$$-\frac{dP}{P} = \alpha dx \quad (1)$$

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。

将上式从 0 到 x 积分,得到点 x 处的辐射功率为:

$$P(x) = P(0)e^{-\alpha x} \quad (2)$$

式中:P(0)是在 x=0 处的辐射功率。

1.2 氧分子吸收带

大气气体的吸收需考虑频率积分、大气非均匀路径、天顶角角度积分和不同气体吸收带重叠。氧分子是大气中浓度相对稳定的成分,更优越的是其吸收谱带内没有叠加其他大气组分的吸收谱。吸收波段有两个谐振频带(具有与红外光谱区域相应的振动-转动频率以及纯转动频率,产生对红外辐射的吸收。NIR 段:13 122-13 200 cm⁻¹; Vis 段:14 527-14 566 cm⁻¹)并且有吸收系数几乎可以忽略的波段:非谐振频带(距

离谐振频带较远的频带, 吸收发射作用薄弱。NIR 段: $13\,200\text{--}13\,360\text{ cm}^{-1}$ 和; Vis 段: $14\,590\text{--}19\,900\text{ cm}^{-1}$ 。氧吸收谱的线强分布如图 1 所示(来自 HITRAN2008 数据库)

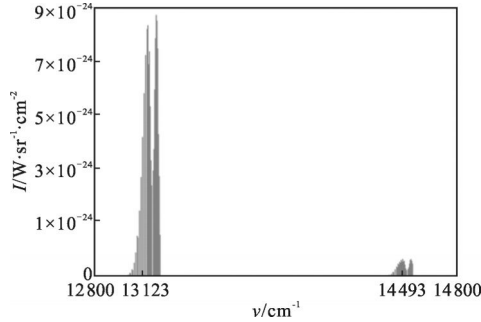


图 1 氧吸收谱的线强分布

Fig.1 Line intensity distribution of oxygen absorption spectrum

根据光谱仪得到的目标光谱辐射功率, 分析非谐振频带的辐射强度, 确定归一化拟合规律 R 。对整个氧吸收带按照映射法则 R 进行归一化, 得到氧吸收发射全谱带的基线, 如图 2~图 4 所示。研究谐振谱带内辐射强度分布与基线的差值, 建立其与距离的关系, 摆脱了对目标本身辐射强度分布 $P(0)$ 的依赖。

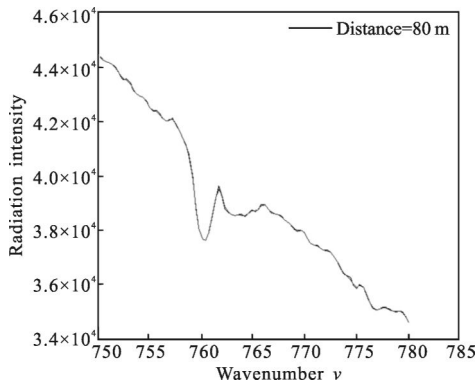


图 2 目标衰减后的光谱线强分布

Fig.2 Spectral line intensity distribution after attenuation

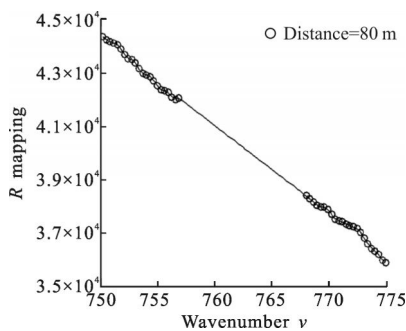


图 3 由非谐振频带得到拟合基线

Fig.3 Fitting baseline obtained by the non-resonant frequency band

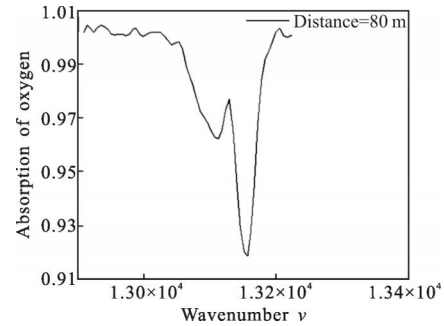


图 4 对全氧吸收带运用归一化映射

Fig.4 Normalized mapping of the total oxygen absorption band

公式(2)中 $P(0)$ 由法则 R 归一化处理, 另一个参数 $\alpha(\lambda)$ 则通过 HITRAN 数据库提供的高精度氧气吸收谱线以及分子线强修正模型, 对大气分子光谱数据库运用逐线积分或带模式方法计算得到。

然而, 在对氧分子吸收带光谱进行 R 映射处理后, 吸收峰值波长不可避免的发生了偏移, 不同次测距实验结果的吸收峰值波长不能严格地位于同一数值上, 如图 5 中的两个最低吸收点, 不在同一波长上。为此, 只能建立阴影部分涉及波段的谱带积分吸收量(或平均吸收系数)与距离的关系。

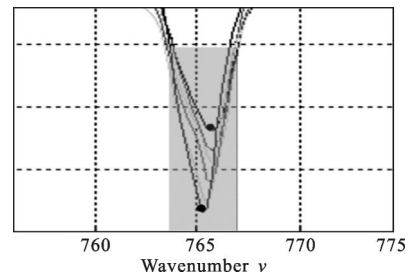


图 5 R 映射后不同距离的吸收峰值波长

Fig.5 Wavelength of absorption peak for different distances after R mapping

朗伯-比尔定律在计算单条谱线吸收时是严格适用的。但光谱仪器的分辨率(目前市场上高分辨率光谱仪可达到 0.005 nm)无法达到理想的线宽。这使得求解带平均系数时, 线间的光强被积分到了结果中。这部分线间光强包含着距离的信息, 没有滤除, 导致了平均吸收系数与距离的关系呈现非线性特征, 测距结果出现固有误差。

朗伯-比尔定律呈现以下形式:

$$P(x) = P_0(x) + P(0)e^{-\alpha x} \quad (3)$$

仪器特性引起了不可消除的误差 $P_0'(x)$ ($P_0(x)$ 基线拟合后的光谱) 部分, 称之为非线性初值。采用统

计实验的方法抑制和修正。

1.3 基于氧吸收特性的距离反演

被动测距系统整体技术框图如图 6 所示。前述 1.1 节和 1.2 节为被动测距系统中的距离反演模块的理论依据。

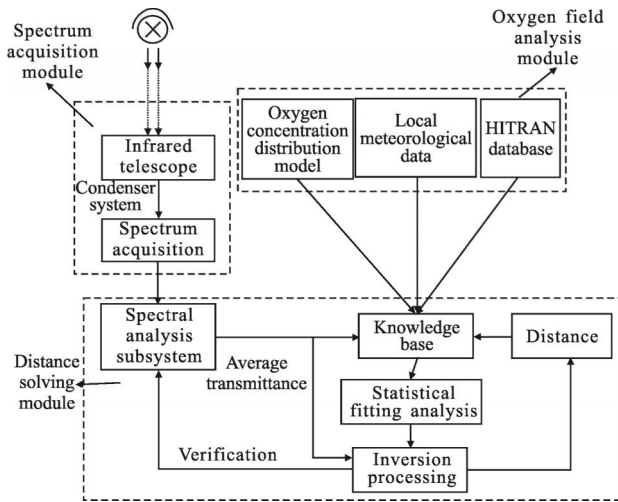


图 6 被动测距系统技术框图

Fig.6 Technical diagram of passive ranging system

目标的红外辐射经大气传输衰减,到达红外望远镜,通过光谱获取模块获得其辐射光谱信息,作为距离反演模块的输入。光谱处理单元进行拟合基线和 R 映射处理,得到谐振频带的平均透过率,一种应用是输入知识库,同时记录此时对应的距离,增加一个测距样本;另一种应用是输入反演处理部分,得到目标与探测器之间的距离。

距离反演基于氧气的吸收特性,其精度受到被动测距装置所处位置的温度、大气压强等当地气象条件的影响,为此进行了氧气传输特征分析。结合氧气浓度随海拔高度变化的标准分布模型以及氧气分子吸收线强随温度、压强变化的修正模型,计算出当时条件下的氧气吸收系数,作为距离反演模块的约束条件和先验知识。

2 距离测算实验平台

对一定范围经纬度地区,不同季节不同时段不同天气条件,实验获得大量测距样本,建立数据库。每一样本反应了一组约束条件下,氧谐振带平均吸收率与距离的关系。对大量样本统计拟合得到经验公式,以理论模型验证,实时修正理论模型中的氧吸

收系数。整体系统为可自反馈校正系统。

实验结果与理论模型之间的偏差可能产生于以下几个方面:

(1) 系统本身的误差,模型本身的计算精度。

(2) 氧吸收系数作为距离反演模块的重要输入参数,其计算与实验的实时实地性关系密切,存在一定的不稳定性与无法确定性,引起了误差。

(3) 实验测试平台引起的误差。

(a) 实验测试条件的不稳定性。卤素灯光源通过反射杯聚焦,光纤收集,理想情况是每次实验得到光源的光谱强度分布完全相同,但目前通过人工调节和对准,存在误差。目前解决方法是同一距离得到若干组数据,取平均。

(b) 结果光谱中掺杂反射杯等非光源实验设备的光谱。

(c) 实验平台中,采用了光栅光谱仪。光栅光谱仪不可避免的就是光栅对不同频率电磁波的衍射效率不同。减小此类误差的方法是探测器预标定,将在 2.2 节论述。

距离测算实验平台的组织结构如图 7 所示。

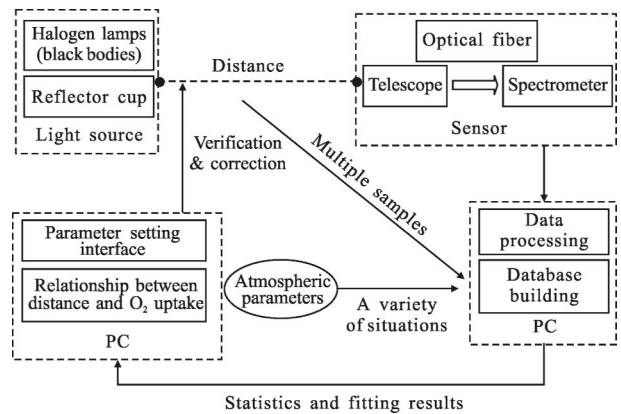


图 7 被动测距实验系统

Fig.7 Experimental system of passive ranging

2.1 可探测范围确定

采用 OCEANOPTICS 光谱仪 HR4000CG,分辨率为 1 cm^{-1} ,实验用光源的辐射强度范围限定为:5~1000 W。目标源的辐射功率被衰减比率,即 $P(x)/P(0)$ 范围约在(0.001,0.999)之间,确定在 NIR 段距离测量范围为:16.118~11 128 m, Vis 段的距离测量范围为 147.4~79 220 m。

2.2 光谱仪器波长标定

光谱仪器的波长标定直接关系着仪器的波长准

确度,对测距样本的精确性与可采用性有重要影响。对所选用光谱仪器,采用了具有一系列已知波长的谱线的光源(各种温度下的黑体)进行波长标定。对在仪器输出的“空间位置-光度”光谱图上寻峰得到各谱线峰值点对应的空间位置,用这些峰值点的数据拟合整个探测范围内的“空间位置-波长”关系,即映射规律 Ω 。对实验平台的光电探测器读取的实时实地目标源的光谱辐射强度,均需运用 Ω 映射。

2.3 距离测算数据库

基于氧吸收特性的距离测算数据库中包括参数设定模块、距离反演模块和输出模块。输入参数包括五大类,如表 1 所示。

表 1 影响氧分子吸收特性的因素

Tab.1 Impact factors of oxygen absorption characteristics

Spatial coordinates	Patterns of seasons and weather	Atmospheric model	Aerosol properties	Instrument parameters
Latitude longitude altitude	Cloud mode (No clouds /cumulus/ stratus/ cirrus)	Atmospheric model/ constituents	Extinction coefficient calculation model	Wave band
Countries regions	Rain mode (amount/ intensity)	Atmospheric profile	Country/ city/ocean /desert	Full width at half maximum
	Wind mode (speed/ direction)	Vertical column density (vapor/ ozone)	Tropo- sphere/ stratosphere	
	Fog mode (vertical column density)	Solar irradiance	Advection/ divergence fog	

在一组参数下,对一已知距离,探测器上读取到的光谱线强为:

$$P(x) = P_0(x) + P(0)e^{-\alpha T_{scat}(v)}R(v) \quad (4)$$

式中: $T_{scat}(v)$ 为散射特性; $R(v)$ 为仪器特性。

通过探测器标定映射 Ω , 归一化映射 R , 得到吸收率 $P''(x, v)$ 。定义

$$\delta_{(v_1, v_2)} = \int_{v_1}^{v_2} P''(x, v) dv \quad (5)$$

为吸收量,其中 v_1 和 v_2 为氧光谱带的两个谐振频带 NIR 段或 Vis 段的起始频率和终止频率。

在一组输入条件下,建立第 i 个“吸收量-距离”样本: $\delta_{(v_1, v_2)}(i) \leftrightarrow x(i), i=1, 2, 3, \dots$ 。

3 被动测距

卤素灯光源,功率为 100 W,望远镜口径大小为 25 mm。实际距离 75、100、125、150、175 和 200 m,夏季环境,午夜 24 点整,能见度大于 6 km。山西太原北郊区上兰村(东经 113°47', 北纬 38°2', 海拔 840 m)。

通过归一化方法,去除目标光谱特性,得卤素灯光源经过不同距离后的辐射强度分布,如图 8 所示。

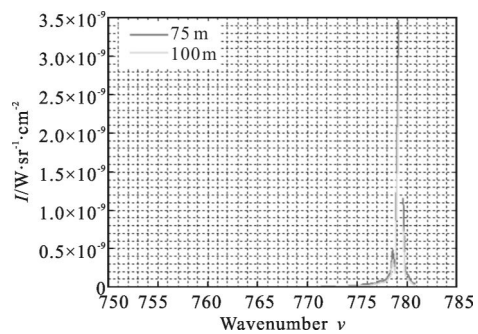


图 8 归一化后卤素灯光源的辐射强度分布

Fig.8 Radiation intensity distribution of halogen light source after normalization

根据非谐振频带的谱线分布规律进行再一次归一化,得到不同距离下氧的吸收谱,如图 9 所示。

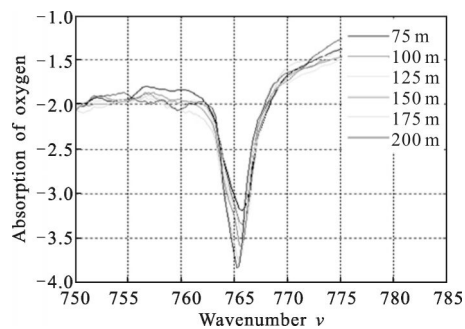


图 9 不同距离下氧的吸收

Fig.9 Absorption of oxygen for different distances

由 24 组 NIR 段谐振频带的吸收量 $\delta_{(NIR)}(i)$ 与对应距离 $x(i)$ 的样本,得到距离与吸收量之间的经验公式。

$$x = 293.9\delta^7 + 1046\delta^6 - 1518\delta^5 + 1156\delta^4 + 49.4\delta^3 + 117.9\delta^2 - 14.76\delta + 0.92 \quad (6)$$

由公式(4)和(5)可得

$$x = \ln \left(\frac{\delta}{TR(v_2 - v_1)} - \frac{P_0}{P(0)} \right) / \frac{-(\alpha_{v_1} - \alpha_{v_2})}{(v_2 - v_1)} \quad (7)$$

将其进行泰勒级数展开(在 δ 处),按照系数相等的原则,与公式(6)对照,可得到 $P_i/P(0)$ 的若干值。剔除异常点,取合理点的平均值,作为非线性初值项的估计。可以看出,初值项无法摆脱原始目标辐射强度 $P(0)$ 。

取不同季节(夏,秋两季)、不同时段(早六点,正午十二点,下午四点),不同地区(山西太原北郊区上兰村,山西太原南市区汾河公园)的氧气场实地气象数据(24 组),与理论距离对照,最大相对误差不超过 2.7%。

距离测量系统 NIR 波段吸收量、波长与距离的关系如图 10 所示。

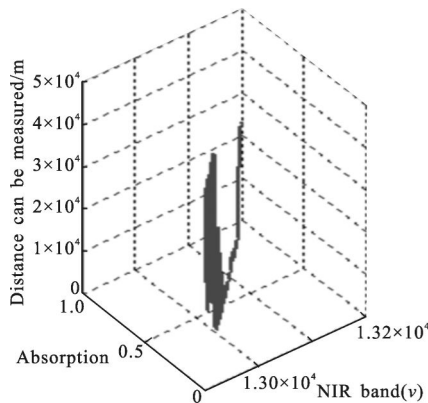


图 10 NIR 波段吸收量、波长与距离的关系

Fig.10 Relationship among absorption, wavelength and distance of NIR band

距离测量系统 Vis 波段吸收量、波长与距离的关系如图 11 所示。

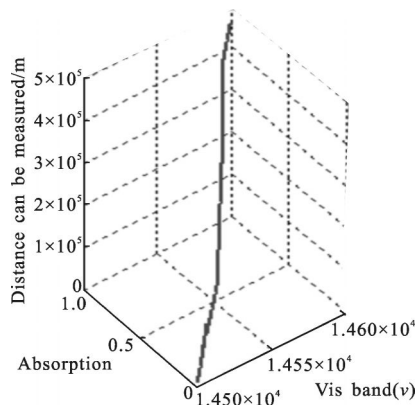


图 11 Vis 波段吸收量、波长与距离的关系

Fig.11 Relationship among absorption, wavelength and distance of Vis band

事实上,光纤对光能量的捕获效率、光电探测器

的仪器特性、目标截面积、目标存在时间对距离测算的精度亦存在一定影响。

4 结论

针对空中红外军事目标(喷气式战斗机、导弹等)距离探测的迫切需求,研究了基于红外辐射光谱特性、氧分子吸收光谱以及比尔吸收定律的单站单波段红外光谱被动测距技术。在氧吸收谱段选取两个频带:谐振和非谐振频带。根据非谐振频带的辐射强度分布,确定归一化拟合规律,拟合得到氧吸收全谱带的基线,研究谐振谱带内辐射强度分布与基线的差值,建立其与距离的独立于目标的关系。构建实验平台,建立不同输入条件下、氧分子带平均吸收系数和距离的关系数据库,得到距离反演公式,与理论结果相互验证与校正,修正仪器非理想特性引起的朗伯-比尔定律应用中的非线性初值。

文中的研究为我国对空探测及武器预警中的实时实地被动测距提供新的技术手段。相关成果还可应用于承担军事任务的机器人系统、基于运动分析的空间卫星跟踪系统等。

参考文献:

- [1] Kalyuzhny N M, Alexandrov S N. General provisions for the procedure of masked ranging using single-station passive-active means of air targets identification[J]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2002, 58(7): 138-142.
 - [2] Michael R H, Glen P P. Passive ranging using atmospheric oxygen absorption spectra air force institute of technology, wright-patterson air force base [R]. Dissertation AFIT/DS/ENP/06-02, 2006.
 - [3] Zhang Zhaoxian. Accurate atmosphere transmittance model for O₂ absorption band near 762 nm [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2012, 31(3): 203-209.
 - [4] Cho H, Chun J. Range estimation of passive infrared targets through the atmosphere [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(4): 046402.
 - [5] Fu Xiaoning, Wang Di, Zhang Jianqi. Passive ranging algorithm utilizing single-band IR sensor without extinction coefficient[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2272-2275. (in Chinese)
- 付小宁, 王荻, 张建奇. 无需消光系数的单波段红外被动测距[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2272-2275.

- [6] Gao Xuhui, Li Liya. IR passive ranging based on Mono-station and single-band [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2012, 26(3): 234–239. (in Chinese)
高旭辉, 李丽亚. 基于单站单波段的红外被动测距[J]. 测试技术学报, 2012, 26(3): 234–239.
- [7] Zong Pengfei, Wang Zhibin. Study on baseline fitting method based on passive infrared range measurement [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 174–177. (in Chinese)
宗鹏飞, 王志斌. 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.
- [8] Chen Shaojie, Cui Jicheng. A method of precise adjustment and calibration for high-resolution echelle spectrograph [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32 (8): 2280 – 2285. (in Chinese)
陈少杰, 崔继承. 高分辨率中阶梯光栅光谱仪精确装调与标定[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2280–2285.
- [9] An Yongquan, Zhao Yan. Infrared spectral radiative properties of high temperature gas with multi-component [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(23): 5885–5890.