

基于氧气光谱吸收的被动测距中无云天空背景辐射特性研究

张 瑜¹, 刘秉琦¹, 魏合理², 华文深¹, 闫宗群¹

(1. 军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

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, 将包含氧气 A 吸收带在内的无云天空背景辐射和黑体辐射作为研究对象, 利用 CART 软件模拟计算了不同观测天顶角、不同时段、不同太阳天顶角的无云天空背景氧气吸收率分布, 并与不同观测天顶角、不同距离下的黑体辐射氧气吸收率进行了比较分析, 结果表明: 当探测距离大于 3 km 时, 黑体辐射的氧气吸收率大于无云天空背景辐射氧气吸收率, 所以根据不同观测条件设置被动测距的氧气吸收率阈值, 可提高对目标的探测概率, 降低背景辐射对被动测距的影响。

关键词: 被动测距; 氧气 A 吸收带; 氧气吸收率; 背景辐射; CART

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0298-07

Study on cloudless sky background radiation characteristic in passive ranging based on oxygen spectral absorption

Zhang Yu¹, Liu Bingqi¹, Wei Heli², Hua Wenshen¹, Yan Zongqun¹

(1. Department of Electronics and Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Oxygen absorption rate is the core of passive ranging technology calculation which used oxygen A band. The cloudless sky background radiation and blackbody radiation which contained oxygen A absorption bands was researched. The oxygen absorption rate distribution of cloudless sky background was calculated under the different conditions of observation zenith angle, times and solar zenith angle used CART. Then the calculation results was compared with the oxygen absorption rate of blackbody radiation with different observation zenith angle at different distances. The results show that the oxygen absorption rate of blackbody radiation is greater than the oxygen absorption rate of cloudless sky background radiation when the detection distance is more than 3 km. So depending on different viewing conditions to set the oxygen absorption rate threshold will improve the detection probability of the target and reduce the influence of background radiation on passive ranging.

Key words: passive ranging; oxygen A absorption band; oxygen absorption rate; background radiation; CART

收稿日期: 2014-05-11; 修订日期: 2014-06-15

基金项目: 武器装备军内科研计划

作者简介: 张瑜(1987-), 男, 博士生, 主要从事光电对抗方面的研究。Email: zhangyuec@163.com

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

0 引言

基于氧气吸收的被动测距技术是一种利用大气中氧气 A 吸收带(12 820~13 245 cm^{-1} /758~778 nm)对目标辐射光谱吸收的特性而进行目标距离解算及预警的技术。美国对该技术进行了理论研究,并对飞行中的 F-16 战机以及发射过程中的 Falcon 9 运载火箭进行了跟踪与测距,对运载火箭在发射过程长达 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%^[1-4]。国内也进行了初步的理论和近程实验研究^[5-9],并将气象因素对测距的影响进行了仿真分析^[10],发现氧气吸收特性随气象条件变化很小甚至可以忽略。但是对飞机或导弹尾焰目标进行探测时,要求目标在很远处就能被检测到,而在实际探测飞机或导弹目标尾焰的辐射特性时,目标成像的面积很小,同时由于大气辐射对探测器的影响,所采集到的目标氧气 A 吸收带波段图像的中包含有严重的起伏背景,使得对空探测目标的光谱辐射信息被淹没其中难以分辨。因此,在进行飞机或导弹尾焰目标探测之前,若能对天空背景辐射进行有效的预处理,将会提高对目标的探测概率。所以,研究天空背景光谱辐射特性就显得非常重要。

参考文献[11-12]对 CART 软件^[13-16]在大气散射辐射计算精度和分子吸收及热辐射计算精度进行了验证,计算精度高。文中以晴天无云天空背景为研究对象,利用 CART 软件对天空背景辐射在氧气 A 带附近的光谱分布进行了计算,分析得到了无云天空背景大气光谱辐射特征及氧气吸收率随观测天顶角、太阳天顶角等因素的变化关系,并将不同条件下黑体辐射氧气吸收率与无云天空背景的吸收率进行了对比,为后续飞机或导弹尾焰目标的准确检测奠定了基础。

1 利用氧气吸收进行被动测距的基本原理^[7]

飞机或导弹在空中飞行时,尾焰向外辐射电磁波,探测器所接收到的氧气 A 吸收带附近的光谱辐射强度是尾焰辐射经氧气吸收、大气散射及大气湍流衰减后的辐射强度,其表达式为:

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

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; I_0 为目标自身辐射强度; I 为探测器接收到的辐射强度。

由于燃料的充分燃烧,使得飞机或导弹尾喷焰中氧气充分耗尽,因此其辐射可以看为黑体或类黑体辐射的连续光谱,在经过大气传输后呈现氧气吸收带。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,如公式(2)所示。

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

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。由于氧气吸收带左右两侧没有任何其他气体成分的吸收,这时测得左右两侧的光谱强度 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;氧气吸收带处光谱强度为 I_2 ,通过 I_1 和 I_3 插值得到的 I_{22} 即为氧气吸收带处的目标等效辐射,如图 1 所示。利用测得的吸收带处经氧气吸收衰减后的辐射强度 I_2 ,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。

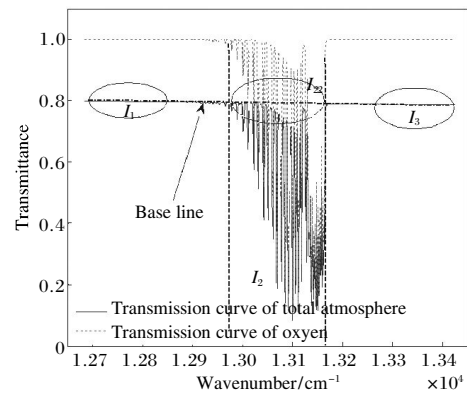


图 1 大气光谱吸收曲线和氧气吸收谱线

Fig. 1 Atmospheric spectral absorption curve and oxygen absorption curve

图 1 中,实际测量值 I_1 、 I_2 和 I_3 分别为相应波段内的平均强度值;如果将这一窄波段内的辐射曲线假设为一平滑的直线,则氧气吸收带处的目标等效辐射强度 I_{22} 便可通过公式(3)直接插值得出。

$$I_{22}=I_1 + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_1} (I_3 - I_1) \quad (3)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_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为:

$$A=1-I_2/I_{22} \quad (4)$$

根据比尔定律可知,在吸收带中心波长处的氧

气吸收率还可表示为:

$$A=1-\exp(-\alpha(\lambda)\cdot L) \quad (5)$$

式中: $\alpha(\lambda)$ 为氧气的吸收系数; L 为目标的距离。

根据公式(4)和(5)便可以得出目标距离 L 的计算公式为:

$$L=\frac{1}{\alpha(\lambda)}\ln\frac{I_2}{I_1} \quad (6)$$

由此可见,只要实时测得三个谱段处的光强,便可以根据公式(6)计算出目标的距离。由于公式中采用的是相对光强,所以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。

2 无云天空大气背景辐射光谱分布及氧气吸收率分布

天空背景辐射的主要来源是太阳辐射,太阳辐射通过大气时,会受到大气分子、气溶胶以及云的吸收、散射作用,而使投射到大气上界的太阳辐射不能完全达到地面,到达地面的也会受到地面的反射。因此,天空背景辐射的主要来源包括以下几个方面:(1)太阳辐射通过大气时由大气分子、气溶胶以及云的散射作用而形成大气背景辐射;(2)下垫面对太阳辐射的反射能量。探测器在对目标辐射进行采集时,不可避免的要接收到目标所处天空背景的光谱辐射。

文中利用 CART 软件对不同观测天顶角和不同时刻的无云天空光谱辐射分布作了计算,获得了不同条件下的天空光谱辐射亮度的分布特征。具体计算数据如下:东经 114° , 北纬 38° , 第 200 天,地面能见度 23 km,城市气溶胶,晴天无云,观测时间分别为 8 点,10 点,12 点,14 点,16 点,18 点,观测天顶角为 90° 、 60° 、 30° 的天空光谱分布。根据经纬度和日期及时间,得到相应时刻太阳天顶角如下: 59.9° 、 36.5° 、 18.2° 、 25.8° 、 48.0° 、 71.5° 。观测方位与太阳的相对方位角为 180° 。探测器位于海拔 50 m,测量波段 $12\ 680\sim 13\ 425\ \text{cm}^{-1}$ ($745\sim 790\ \text{nm}$),光谱分辨率一个波数。

图 2~7 为在不同时刻,不同观测天顶角下 CART 模拟的晴天无云大气在氧气 A 吸收带附近背景辐射的光谱分布。

从图中可以看出以中午 12 时为中间点,在 10 时到 14 时时,观测天顶角为 30° 时天空辐射在氧气 A 吸收带波段最强, 90° 时最弱,这一时段太阳天顶角较小,观测天顶角 30° 和太阳天顶角比较接近;8 时,18 时观测天顶角为 60° 时天空辐射在氧气 A 吸收带波段最强, 90° 时最弱,这是因为这一时段太阳天顶角较大,观测天顶角 60° 和太阳天顶角比较接近。

根据氧气吸收特性被动测距技术的基本原理,参考文献[10]在计算吸收率时选取的是整个氧气吸收 A 带(即 $758\sim 778\ \text{nm}$)的吸收率。氧气吸收谱线为

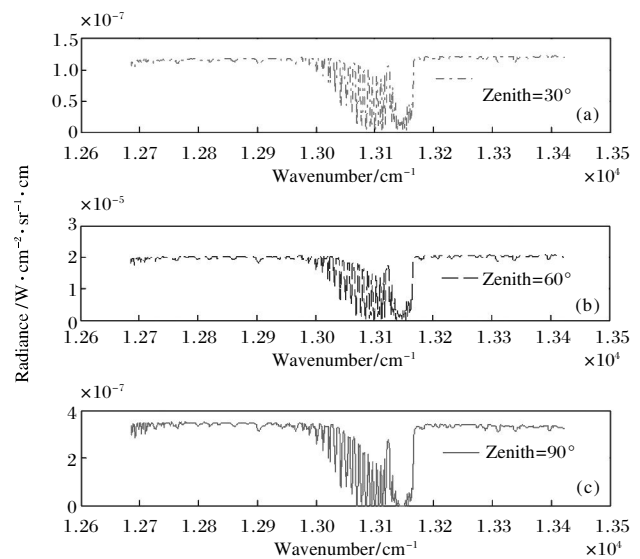


图 2 8 时天空背景辐射分布

Fig.2 Sky background radiation distribution at 8:00

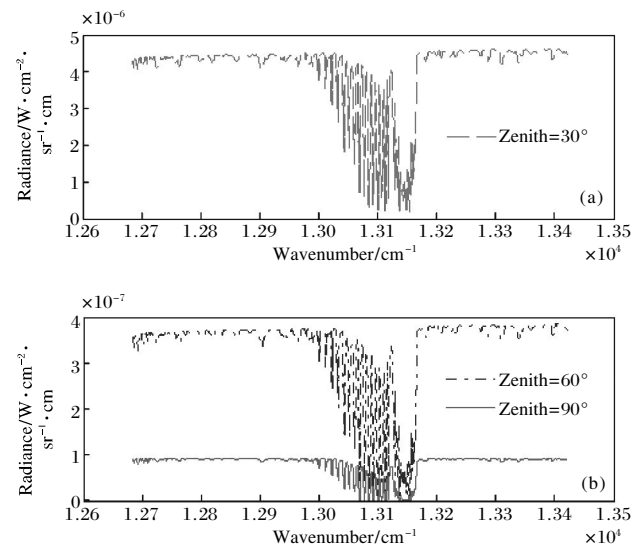


图 3 10 时天空背景辐射分布

Fig.3 Sky background radiation distribution at 10:00

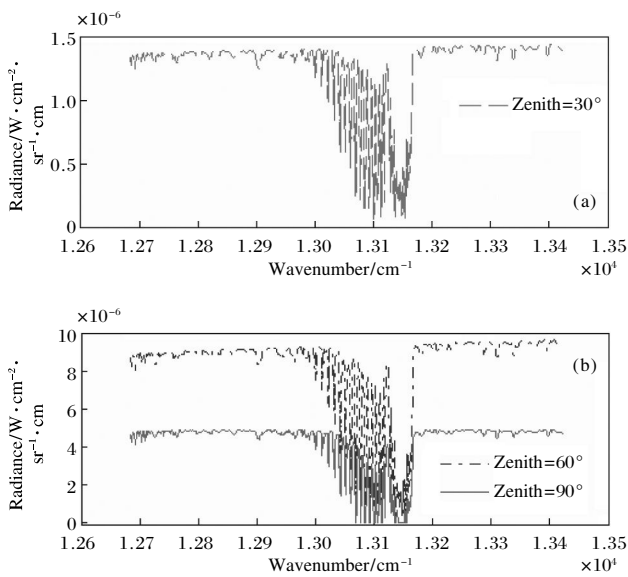


图 4 12 时天空背景辐射分布
Fig.4 Sky background radiation distribution at 12:00

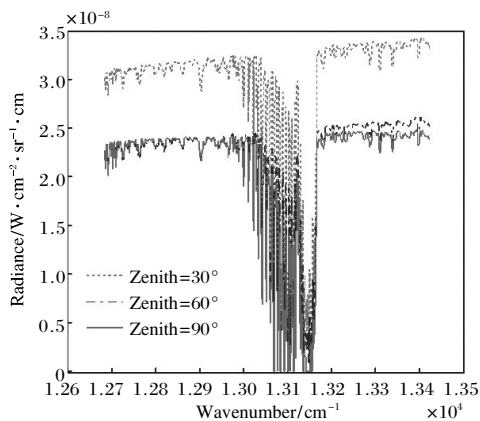


图 5 14 时天空背景辐射分布
Fig.5 Sky background radiation distribution at 14:00

分布规则的双峰结构,当距离较远时氧气吸收率在 A 带达到饱和^[10],文章选择了氧气 A 吸收带中心波长附近更窄的波段,这里选定用于计算被动测距中氧气吸收率的 3 个窄波段分别为:13 245~13 423 cm⁻¹ (745~755nm)、13123~13193cm⁻¹(758~762nm)、12685~12820cm⁻¹ (780~790 nm)。根据 CART 计算的辐射值,分别计

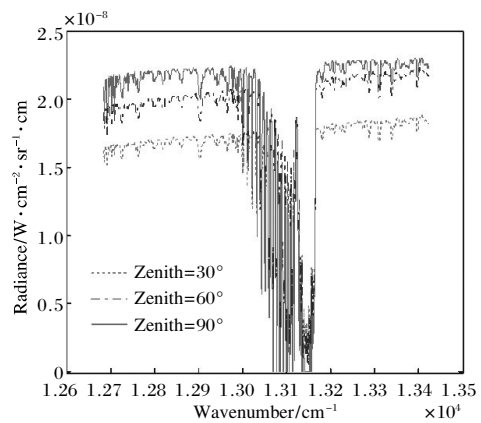


图 6 16 时天空背景辐射分布
Fig.6 Sky background radiation distribution at 16:00

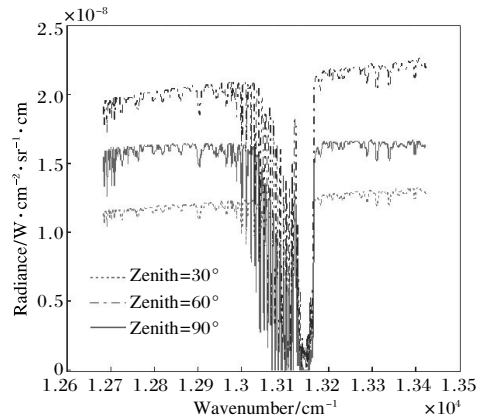


图 7 18 时天空背景辐射分布
Fig.7 Sky background radiation distribution at 18:00

算了三个波段的平均辐射强度,利用公式(3)得到所选氧气 A 吸收带处基线强度值,然后根据公式(4)计算得到了不同时刻、不同观测天顶角下的氧气吸收率,计算结果如表 1 和图 8~9 所示。

通过图表中的数据分布规律可以看出,在同一观测天顶角下,氧气吸收率从早 8 时到晚 18 时呈现先降低后升高的趋势,在中午 12 时达到最低,这时对应的太阳天顶角也最小;这是因为早晚太阳穿过大气的路径长,中午短,导致早晚的氧气 A 带的吸收率大,中午则相反。

表 1 无云天空背景氧气吸收率

Tab.1 Oxygen absorption rate of cloudless sky background

Observation zenith angle/(°)	8:00(sun zenith angle 59.9°)	10:00(sun zenith angle 36.5°)	12:00(sun zenith angle 18.2°)	14:00(sun zenith angle 25.8°)	16:00(sun zenith angle 48.0°)	18:00(sun zenith angle 71.5°)
30	0.457 0	0.419 6	0.405 6	0.410 5	0.429 7	0.470 2
60	0.480 5	0.449 4	0.438 2	0.448 9	0.466 6	0.500 0
90	0.536 4	0.514 3	0.506 7	0.509 2	0.522 8	0.557 3

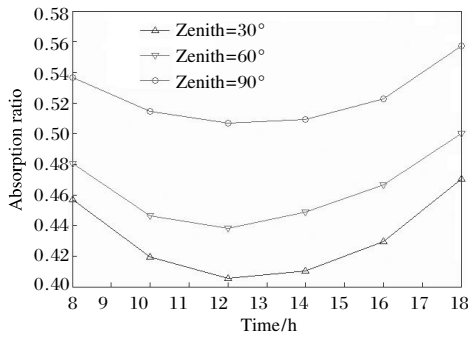


图 8 不同时刻下氧气吸收率分布

Fig.8 Distribution of oxygen absorption rate at different times

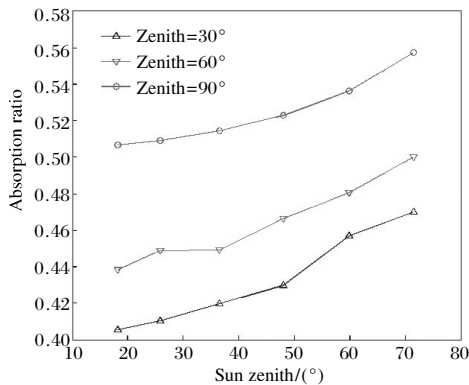


图 9 不同太阳天顶角下氧气吸收率分布

Fig.9 Distribution of oxygen absorption rate at different sun zenith angle

图 9 所示的变化趋势表明,同一观测天顶角下,随着太阳天顶角的增大,晴天大气所呈现的氧气吸收率随之增大;在同一太阳天顶角下,观测天顶角越大,氧气吸收率越大。原因也是大的天顶角下入射/散射的光线穿过大气的路径长,因此氧气 A 带的吸收率增加。

3 黑体辐射氧气吸收率分布特征

利用 CART 软件对不同观测天顶角、不同距离下的黑体目标光谱辐射经大气吸收后的特性作了计算分析,获得了不同条件下的黑体目标辐射经大气吸收散射后的氧气吸收率的分布特征。具体计算数据如下:东经 114°,北纬 38°,第 200 天,地面能见度 23 km,城市气溶胶,晴天无云,探测器位于海拔 50 m,观测天顶角为 90°、60°和 30°,观测距离为 1~10 km,12 km,15 km;测量波段 12 680~13 425 cm⁻¹ (745~790 nm),光谱分辨率一个波数。

图 10~12 为 CART 计算的不同天顶角下 1km,5km,10 km,15 km 处黑体目标辐射经大气传输后透过率分布,图 13 为探测距离为 5 km 时不同天顶角下大

气透过率分布。从图中可以看出,同一天顶角下,随着探测距离的增加,大气对黑体辐射的透过率减小;在同一探测距离下,随着天顶角的增加,大气对黑体辐射的透过率减小。

在氧气 A 吸收带,氧气是唯一的吸收气体,选取和上节计算天空背景氧气吸收率相同的波段,13 123~13 193 cm⁻¹(758~762 nm),光谱吸收率的平均值即为氧气在此波段的吸收率。计算结果如表 2 和图 14 所示。

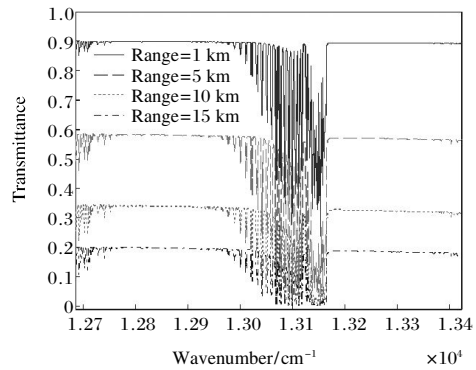


图 10 天顶角 90°时大气透过率

Fig.10 Atmospheric transmittance when observation zenith angle is 90°

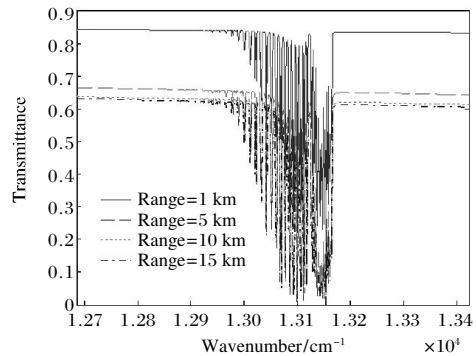


图 11 天顶角 60°时大气透过率

Fig.11 Atmospheric transmittance when observation zenith angle is 60°

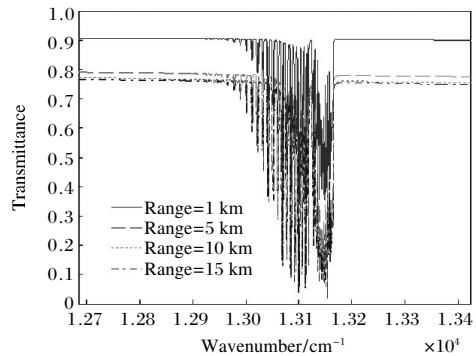


图 12 天顶角 30°时大气透过率

Fig.12 Atmospheric transmittance when observation zenith angle is 30°

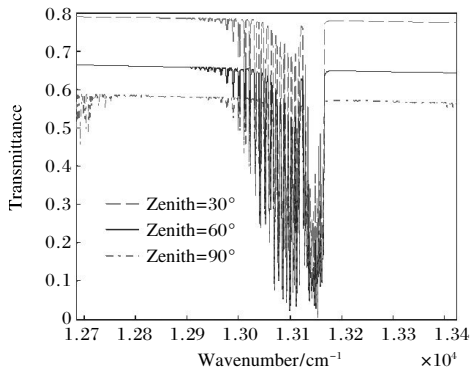


图 13 距离 5 km 时不同天顶角下大气透过率

Fig.13 Atmospheric transmittance at different observation zenith angle when the distance is 5 km

表 2 不同探测距离不同观测天顶角下的氧气吸收率

Tab.2 Oxygen absorption rate at different distance and different observation zenith angle

Range/km	Zenith angle 30°	Zenith angle 60°	Zenith angle 90°
1	0.278 9	0.380 3	0.393 9
2	0.389 4	0.512 0	0.523 8
3	0.447 3	0.575 6	0.590 2
4	0.480 5	0.609 5	0.630 8
5	0.501 0	0.629 3	0.665 4
6	0.515 0	0.642 4	0.707 0
7	0.525 2	0.657 9	0.746 5
8	0.532 5	0.658 7	0.779 7
9	0.537 6	0.663 2	0.807 9
10	0.541 1	0.666 3	0.831 8
12	0.545 1	0.670 2	0.870 3
15	0.547 2	0.672 4	0.910 9

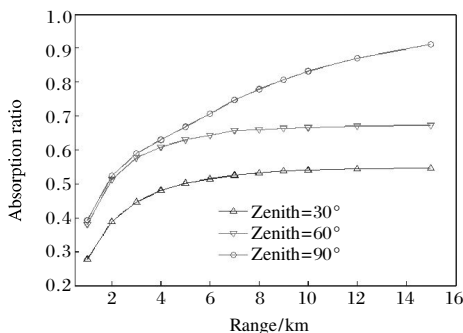


图 14 不同探测距离下氧气吸收率分布

Fig.14 Distribution of oxygen absorption rate at different distance

从表 2 和图 14 的数据可以看出,地对空观测时,当天顶角一定的情况下,随着观测距离的增大,氧气吸收率增大。同时,同一观测距离下,天顶角越大,氧气吸收率越大,这是因为观测天顶角越大,固定高度上两点间等效气体分子含量越大,并且对应

路径上的氧气浓度变化率越小,对辐射的吸收越强。在天顶角为 30°和 60°时,路径长度超过 10 km 以后,氧气吸收率曲线变化平缓,即氧气吸收率随观测距离的变化趋势变小,这是因为当路径长度达到 10 km 以后,目标所处的海拔分别为 8.66 km 和 5 km,氧气浓度比水平路径时变小,随着路径的增长,氧气浓度按指数规律迅速下降,因此氧气吸收率变化率变得很小。在天顶角 90°时,即海拔 50 m 处水平观测,温度和气压可近似认为是恒定的,氧气吸收系数取决于路径长度,路径越长氧气吸收率越大,并趋近于 1,所以氧气吸收率变化率比斜程时大。

4 无云背景与目标氧气吸收率对比

由于飞机或导弹尾焰目标在空中的方位未知,在对空中目标辐射进行扫描采集时,目标所处天空背景的光谱辐射会干扰对尾焰目标的判别,为了抑制背景辐射对目标判别的干扰,下面分析晴天无云大气条件下大气辐射与目标辐射的差异,为准确提取目标辐射和提高探测概率提供方法。

将 CART 计算的不同时段、不同太阳天顶角、不同观测天顶角下的大气辐射在氧气 A 吸收带处 13 123~13 193 cm⁻¹(758~762 nm)的氧气吸收率与黑体目标辐射氧气吸收率对比,通过对比可以看出,当探测天顶角为 30°,探测距离小于 2 km 时,无云天空背景氧气吸收率大于黑体辐射氧气吸收率;探测距离大于 3 km 时,黑体辐射的氧气吸收率大于任意时段无云背景氧气吸收率。当探测天顶角为 60°,探测距离大于 2 km 时,黑体辐射的氧气吸收率大于任意时段无云背景氧气吸收率。当探测天顶角为 90°,探测距离大于 3 km 时,黑体辐射的氧气吸收率大于任意时段无云背景氧气吸收率。综上,只要目标与探测器的距离大于 3 km,其所呈现的氧气吸收率大于无云背景辐射的氧气吸收率。

在利用氧气吸收率对目标进行测距和预警时,当目标距离探测器大于 3 km,目标所呈现的氧气吸收率远大于无云背景辐射氧气吸收率,所以,在对空中目标进行扫描探测时,可在观测天顶角为 30°、60°、90°时分别设置吸收率阈值为 0.447 3、0.575 6、0.590 2 来判别目标是否存在,若空中某点处测得的氧气吸收率大于设置的阈值,则可初步判定该点为尾焰目标,在此基础上进行距离解算,这为准确进行目标判别和被

动测距提供了一种参考,可提高探测的概率。但是,阈值设置每次仅可以针对一定观测条件下的背景抑制,所以在实际应用中需进行大量的工作建立不同天气条件、不同时刻、不同天顶角下无云天空背景氧气吸收率,为被动测距的背景抑制提供数据支持。

5 结论

文中利用通用大气辐射传输软件(CART)计算了晴空无云大气条件下天空背景光谱辐射分布特性及黑体辐射光谱经大气分子吸收、大气散射、大气湍流衰减后的透过率,并基于氧气吸收被动测距的原理,详细分析了观测天顶角和观测时间,太阳天顶角对无云天空背景氧气 A 吸收带吸收率的影响;将不同观测天顶角、不同距离下的黑体目标辐射的氧气吸收率与天空背景辐射氧气吸收率进行了对比分析。结果表明,对 3 km 以外的飞机或导弹尾焰目标进行探测时,可以根据不同的太阳天顶角、不同的观测天顶角设置不同的氧气吸收率阈值来提高对目标的探测概率,降低背景辐射对被动测距的影响。

参考文献:

- [1] Michael R Hawks. 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[D]. Ohio: Air Force Flight Test Center(AU), 2009.
- [3] Joel R Anderson. Monocular passive ranging by an optical system with band pass filtering[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2010.
- [4] Vincent R. Passive ranging of dynamic rocket plumes using infrared and visible oxygen attenuation[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2011.
- [5] An Yongquan, Li Jinhua, Wang Zhibin, et al. Mono-station and single-band passive ranging based on oxygen spectrum [J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(14): 144210. (in Chinese)
- [6] Zong Pengfei, Wang Zhibin, Zhang Jilong, et al. Study on baseline fitting method based on passive infrared range measurement[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 174-177. (in Chinese)
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] Wang Zhibin, Zong Pengfei, Li Xiao. Oxygen 'A' absorption band simulation of infrared distance inversion algorithm and experimental research [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0815002. (in Chinese)
- [9] Li Jinhua, Wang Zhibin, Chen Yuanyuan, et al. Calculation of near infrared oxygen A-band atmospheric transmittance[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1142-1145. (in Chinese)
- [10] Yan Zongqun, Liu Bingqi, Hua Wenshen. Theoretical analysis of the effect of meteorologic factors on passive ranging technology based on oxygen absorption spectrum [J]. *Optik*, 2013, 124: 6450-6455.
- [11] Dai Congming, Wei Heli, Chen Xiuhong. Validation of the precision of atmospheric molecular absorption and thermal radiance calculated by combined atmospheric radiative transfer (CART) code [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 174-180. (in Chinese)
- [12] Dai Congming, Wei Heli, Chen Xiuhong. Validation of atmospheric scattering radiance calculated by combined atmospheric radiance transfer (CART)code [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1575-1581. (in Chinese)
- [13] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong. Introduction to the combined atmospheric radiative transfer software CART [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 446-450. (in Chinese)
- [14] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong, et al. A moderate spectral resolution transmittance model based on fitting the line-by-line calculation [J]. *Optics Express*, 2007, 15: 8360-8370.
- [15] Chen Xiuhong, Wei Heli, Yang Ping, et al. An efficient method for computing atmospheric radiances in clear-sky and cloudy conditions[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2011, 112(1): 109-118.
- [16] Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming. Combined atmospheric radiative transfer (CART) model and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3360-3366. (in Chinese)
- [17] Chen Xiuhong, Wei Heli, Li Xuebin, et al. Calculating model for aerosol extinction from visible to far infrared wavelength [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(2): 183-189. (in Chinese)
- [18] Zong Pengfei, Zhang Jilong, Wang Zhibin. Simulation and analysis of oxygen 'A' band's transmittance of infrared radiation along slanting route[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(2): 171-175. (in Chinese)