

氧气吸收被动测距技术中的折射吸收误差

闫宗群¹ 刘秉琦¹ 华文深¹ 张瑜¹ 吴健²

(¹ 军械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)
(² 中国人民解放军 66267 部队, 河北 石家庄 050003)

摘要 大气层中气体浓度随海拔高度的指数衰减造成了大气折射率的不均匀分布。目标辐射在大气层中传播时,其辐射路径因折射作用变为曲线,而在求解目标距离时却是沿视在路径计算氧气吸收率,这使得氧气吸收被动测距中存在一个固有误差项,这里称之为折射吸收误差。为了分析折射吸收误差对氧气吸收被动测距的影响,分别计算目标辐射路径和视在路径的氧气浓度,并通过辐射路径和视在路径上吸收气体含量相等的方法,建立了不同视在天顶角的折射吸收误差和目标真实距离的关系。结果表明:相同天顶角下,折射吸收误差随路径长度增加而变大。天顶角小于 90° 时,折射吸收误差变化规律复杂,但能满足100 km以内的高精度近程测距和150 km以上的远程告警;天顶角大于 90° 时,折射吸收误差的变化规律简单且误差值很小,可实现全程高精度测距。因此该结论可为氧气吸收被动测距技术的误差修正提供一定的理论支持,同时也证明了该被动测距技术的适用性。

关键词 大气光学;被动测距;折射吸收误差;氧气吸收;视在天顶角

中图分类号 TN976; TN219

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201434.0901002

Refraction Absorption Error of Passive Ranging Technology Based on Oxygen Absorption

Yan Zongqun¹ Liu Bingqi¹ Hua Wenshen¹ Zhang Yu¹ Wu Jian²

(¹ Department of Electronics and Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)
(² Army 66267 of PLA, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

Abstract In the atmosphere, the exponential decay of the gas concentration with altitude causes the uneven distribution of atmospheric refractive index. With the propagation of the target radiation in the atmosphere, the radiation path turns into curves due to refraction. While getting target distance, oxygen absorption rate is calculated along the apparent path, which makes the existence of an intrinsic error term of oxygen absorption passive ranging named refraction absorption error. In order to analyze the impact of the refraction absorption error on passive ranging, the oxygen concentrations of the radiation path and apparent path are individually calculated. The relationship between the refraction absorption error and target real distance under different apparent zenith angles is established, through the method of making oxygen content of radiation path equaling that of apparent path. The results show that the refraction absorption error increases with the increasing of the path length at the same zenith angle. When zenith angle is less than 90° , the change of refraction absorption error is very complex, but could satisfy precision of shorten ranging under 100 km and long range alarm above 150 km. When zenith angle is greater than 90° , the change of the refraction absorption error is simple and the value of that is very small, and therefore precision ranging in the whole ranging can be realized. The conclusion can provide a theoretical support for the error correction of passive ranging technology based on oxygen absorption, and prove the applicability of the passive ranging technology.

Key words atmospheric optics; passive ranging; refraction absorption error; oxygen absorption; apparent zenith angle

OCIS codes 010.1030; 010.1285; 050.1940; 050.1970

收稿日期: 2014-04-08; **收到修改稿日期:** 2014-05-08

作者简介: 闫宗群(1986—),男,博士研究生,主要从事光电对抗和多目标跟踪方面的研究。

E-mail: yanzongqun@163.com

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

1 引言

自2006年Michael等^[1-2]提出氧气对目标红外辐射吸收衰减特性的单目被动测距技术后,凭借其无源隐身、探测简便、动态范围大、作用距离远和实时性强等优势在被动测距技术领域的研究中得到迅猛发展。

Michael等用单参数近似方法将沿探测器与目标之间直线路径上非均匀分布的氧气浓度(这里将气体浓度分布不均匀的路径称之为非均匀路径)转换成海平面上均匀等效路径的氧气浓度,给出了任意海拔和天顶角下非均匀路径上总氧气含量的积分公式,解决了非均匀路径的吸收率计算问题,并以此模型为基础对飞行中的F-16战斗机^[3]以及发射后的Falcon 9运载火箭^[4]进行跟踪测距,在长达90 km的探测距离内,最大测量误差小于5%,平均测量误差小于3%。国内以中北大学为首,也对基于氧气吸收被动测距技术的基本原理、算法误差等进行了研究^[5-8],他们虽然对算法中的基线拟合误差进行了讨论,但是并未考虑由大气折射率不一致导致的视在天顶角方向非均匀直线路径和目标与探测器之间的直线路径并不相同的情况。大气的非均匀性不但使氧气非均匀分布,还使光波在大气中的传播路径由直线变为曲线。这时,若按视在天顶角方向非均匀路径进行氧气含量的积分必然与实际情况存在一定的误差。

大气对电磁波折射效应的修正一直是雷达定位修正和天地激光通信领域的热题和难题。国内许多研究人员对大气折射率及其影响进行了深入研究。建立了折射误差与激光束初始仰角的关系^[9-11];推导了雷达至目标电波传送射线轨迹公式^[11];提出了机动雷达系统中电波折射误差的快速算法^[12];解决了激光在大气传输中的到达角修正问题^[13-14]等,为大气折射率误差修正奠定了理论基础。但是,这些研究主要解决的是折射率引起的仰角误差和真假路径终点的距离差。

氧气吸收被动测距技术中的吸收率是根据光路可逆原理沿视在天顶角方向非均匀路径进行计算的。若不考虑吸收系数的影响,吸收率的计算主要是路径上氧气含量的积分计算。本文主要分析与实际光路吸收率等值的沿视在天顶角方向路径长度与目标真实距离之间的误差,建立该误差与视在天顶角和探测系统海拔高度的关系,正确有效地修正大气折射率对被动测距的精度影响,确保测距精度。

2 大气折射率对目标辐射传输路径的影响

辐射在均匀介质中沿直线传播,但实际大气介质却是非均匀的,折射率的变化必然引起辐射传输方向的变化,使辐射发生折射。

假定探测器位于海拔高度 h_0 的位置,目标位于海拔 h_r 的地方,如图1所示。 L_r 为目标与探测器之间直线路径 OT 的长度,也是均匀大气情况下的目标辐射路径;实际大气下的目标辐射光路是长度为 L_1 的连接目标与探测器的曲线 OT' ; θ_0 为探测器处目标的天顶角,也称之为视在天顶角或者视在天顶角。根据光路可逆和光的直线传播原理,在主动测距技术中的目标定位和测距均是沿视在路径 OT' 进行解算的,长度是目标辐射路径 L_1 在视在天顶角方向 θ_0 上的等值距离。此时,视在距离 $L_c = L_1$,误差修正只需要计算目标真实距离和真实仰角即可。

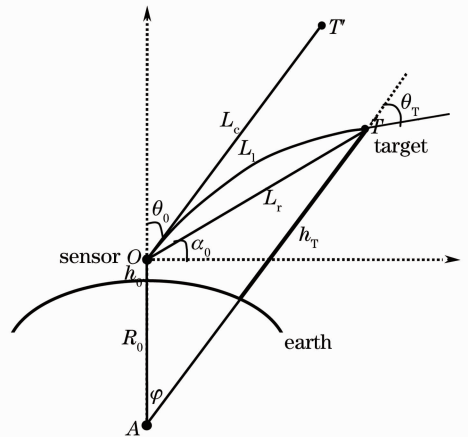


图1 目标辐射路径与视在路径示意图

Fig. 1 Map of target radiation path and apparent path

本文研究的基于氧气吸收的被动测距技术是通过测得的真实辐射路径 L_1 上氧气吸收率与距离关系模型解算目标距离。为了计算真实辐射路径上氧气吸收,首先需测量氧气吸收带及其左右两侧无气体吸收带肩的光谱信息;然后利用带肩光谱信息拟合得到的吸收带内非吸收基线,并与吸收带内的测量光谱信息进行对比计算,从而解算出氧气吸收带内的吸收。通过对若干个已知距离点吸收率的计算,拟合出氧气吸收率与距离关系模型中的模型参数,便可利用模型沿视在路径对未知距离上的目标进行测距。但是由于大气折射率的影响,使得目标辐射路径与真实距离之间存在距离误差。在不考虑吸收系数影响时,沿某一路径的氧气吸收率就仅与该路径上的氧气分子浓度有关。文献[1]中的氧气

含量积分路径是视在天顶角下的视在路径，是一条倾斜向上的射线，比真实目标辐射路径的海拔要高，且距离探测器愈远海拔差愈大。众所周知，大气分子浓度随海拔指数衰减，氧气作为大气中的第二大组分气体，其分布规律更为如此。因此，要使视在路径上氧气含量积分等于目标辐射路径的氧气总含量，视在路径长度 L_c 就要大于 L_1 。这时进行测距误差修正时，需对此进行修正。由于该距离误差是由于大气折射效应和大气成分的非均匀吸收引起的，所以将其称之为折射吸收误差；而传统雷达测距和激光主动测距的误差只是由大气折射效应引起，故此称之为折射误差。下面依次对视在路径和目标辐射路径上氧气含量进行积分计算。

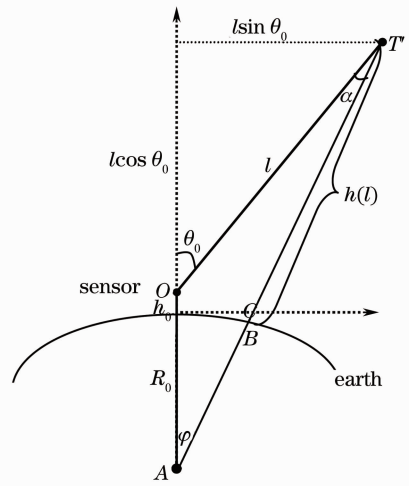


图2 视在路径示意图

Fig. 2 Map of the apparent path

图2所示。视在路径上 T' 处的海拔 $h(l) = BC + CT' = AC - AB + CT'$ 。已知视在路径长度为 l ，视在天顶角为 θ_0 ，视在路径的地心张角为 φ 。在 $\triangle AOT'$ 中，根据余弦定理可以计算出视在路径上任一点处的海拔

$$h(l) = [(R_0 + h_0)^2 + l^2 - 2(R_0 + h_0)l \cos(\pi - \theta_0)]^{1/2} - R_0. \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可积分得出视在路径上的氧气总量(氧气分子数)为

3 非均匀直线路径上氧气含量计算

实际大气复杂多变，很难利用数学公式来精确地描述大气剖面。因此，通常情况下将大气浓度分布假设为一个简单而准确的指数分布。这里假设氧气分子浓度随着海拔高度的增加而指数衰减，即

$$N(h) = N_0 \exp(-h/H), \quad (1)$$

式中 N_0 为海平面处氧气分子浓度； H 为大气标高^[15]，通常取 8 km； h 为海拔高度，单位为 km。

假设视在路径上的等效距离目标点为 T' ，如

$$m_{O_2} = N_0 \int_0^{L_c} \exp\{-[\sqrt{(R_0 + h_0)^2 + l^2 + 2(R_0 + h_0)l \cos \theta_0} - R_0]/H\} dl, \quad (3)$$

式中各符号的定义与图1和图2中的定义完全相同。等式右侧的积分上限 L_c 即为非均匀直线路径在海平面上的等效路径长度，即视在距离。

4 目标辐射路径上氧气含量计算

大气折射率影响下的目标辐射在大气中沿曲线路径进行传播。路径的弯曲程度由大气折射率的变化规律和光束的初始入射角共同决定。大气折射率变化是由大气密度的分布不均匀引起的，同时又与温度、压强和湿度有关^[16-17]。因此实时精确地获取大气折射率分布是十分困难的。常用的折射率模型有分段分布模型、指数分布模型和伽马分布模型^[13]。其中分段分布模型精度最高、指数模型方便但误差较大、伽马分布模型可调整参数较多，精度比较好。由于本文主要目的是分析大气折射引起的折射吸收误差对被动测距技术的影响，而不是对比不

同大气折射率模型的精度，因此本文以指数分布模型为例。

一般情况下，水平方向上的大气折射率变化要比垂直方向小 1~3 个量级。这里假设大气折射率水平方向内均匀。将大气在垂直方向上按着折射率分为若干层，各层内的折射率及其他物理参数均相同，如图3所示。已知探测器位于海拔 h_0 处，折射率为 n_0 ；目标处的海拔为 h_T ，折射率为 n_T ；辐射传输路径 S 上任一点 E 处的海拔为 h ，折射率为 n ，天顶角为 θ 。根据大气光路方程可知：

$$n_0(R_0 + h_0) \sin \theta_0 = n(R_0 + h) \sin \theta = n_T(R_0 + h_T) \sin \theta_T = C, \quad (4)$$

式中 C 为常数。在辐射传输路径 S 上的 E 点处取小段微元 dS ，如图3右侧所示， E 点处入射角为 θ ，海拔变化量为 dh 。根据三角函数关系可知：

$$\cos \theta = dh/dS. \quad (5)$$

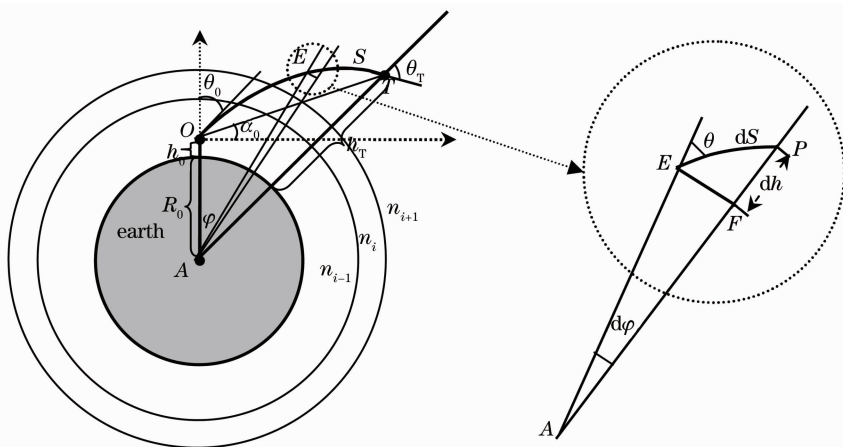


图 3 实际大气中目标辐射路径示意图

Fig. 3 Map of the target radiation path in the atmosphere

由(4)式可知:

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{n^2(R_0 + h)^2 - n_0^2(R_0 + h_0)^2 \sin^2 \theta_0}{n^2(R_0 + h)^2}}, \quad (6)$$

$$dS = \frac{n(R_0 + h)}{\sqrt{n^2(R_0 + h)^2 - n_0^2(R_0 + h_0)^2 \sin^2 \theta_0}} dh, \quad (7)$$

则辐射路径上的氧气总量为

联立(5)式和(6)式可得辐射路径上任一微元为

$$m_{O_2} = \int_0^S N(S) dS = N_0 \int_{h_0}^{h_T} \exp\left(-\frac{h}{H}\right) \frac{n(R_0 + h)}{\sqrt{n^2(R_0 + h)^2 - n_0^2(R_0 + h_0)^2 \sin^2 \theta_0}} dh, \quad (8)$$

式中折射率 $n = 1 + 10^{-6} N_a$, 大气折射指数为 $N_a = N_s \exp(-h/H_s)$, N_s 为地面折射指数, h 和 H_s 分别为海拔高度和大气等效高度。

当探测器和目标位置确定及辐射进入探测器的天顶角已知, 便由(8)式计算得出目标辐射路径 S 上的氧气含量。当(3)式右侧积分上限的距离值使

得左侧积分的氧气含量等于(8)式的值时, 积分上限的距离值便是利用氧气吸收进行被动测距的解算距离值。显然, 该距离值不但大于辐射路径长度, 更大于目标与探测器之间的真实距离。

由图 3 右侧的微元放大图可知地心张角为

$$\varphi = \int_{h_0}^{h_T} \frac{dh}{(R_0 + h) \cot \theta} = \int_{h_0}^{h_T} \frac{n_0(R_0 + h_0) \sin \theta_0}{(R_0 + h) \sqrt{n^2(R_0 + h)^2 - n_0^2(R_0 + h_0)^2 \sin^2 \theta_0}} dh. \quad (9)$$

在 $\triangle AOT$ 中, 根据余弦定理可得目标相对探测器的真实仰角和目标距离探测器的直线距离, 即

$$\alpha_0 = \arctan\left[\frac{(R_0 + h_T) \cos \varphi - (R_0 + h_0)}{(R_0 + h_T) \sin \varphi}\right], \quad (10)$$

$$L_r = \frac{(R_0 + h_T) \sin \varphi}{\cos \alpha_0}. \quad (11)$$

由此便可以计算出氧气吸收被动测距技术的折射吸收误差为 $\Delta L = L_c - L_r$; 俯仰角误差为 $\Delta \alpha = \pi/2 - \theta_0 - \alpha_0$ 。

5 数值分析

为了分析不同视在天顶角下的折射吸收误差的变化规律, 对不同视在天顶角下的折射吸收误差进行计算。在数值计算中, 大气折射率指数模型的参数取经验数值: 地面折射指数为 255.5, 大气等效高度为 8.3857 km, 海平面单位体积内的氧分子数目为 5.3368×10^{24} , 且氧分子分布指数模型中的大气标高为 8 km、地球平均半径为 6370 km。

1) 视在天顶角小于 90°

设探测器海拔为 1 km,目标海拔值取大于探测器海拔的不同海拔值,视在天顶角取值范围不大于 90°;从而模拟地基探测器被动测距情形。数值计算结果如图 4 所示。

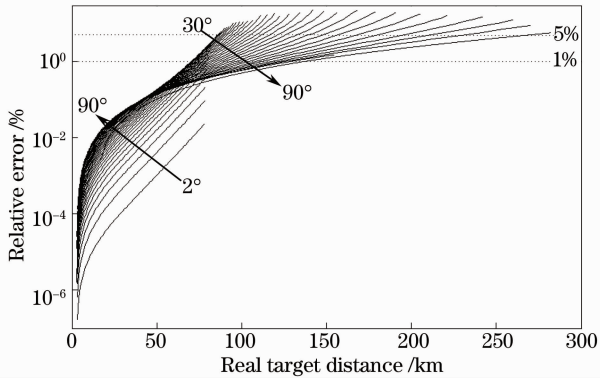


图 4 不同视在天顶角下相对折射吸收误差与目标真实距离的关系曲线

Fig. 4 Relation curves of relative refraction absorption error and real target distance under different zenith angles

图 4 给出了不同视在天顶角下相对折射吸收误差与目标真实距离的关系曲线。当天顶角一定时,相对折射吸收误差随着真实目标距离的增加而增大,0°~30°天顶角范围内视在路径长度受大气层高度影响只能达到 80 km 左右,但在有限路径长度内各视在路径的相对折射吸收误差以基本相同的斜率上升。30°以上天顶角内的路径长度随着角度的增加明显增长,同时相对误差随路径长度增加的速率随着角度的增加逐渐减小,且斜率减小的开始距离随角度增加逐渐变短,在 90°时视在路径的相对误差斜率从 35 km 起便开始减小。

总体趋势上,在短距离内相对折射吸收误差随着天顶角的增加而增大,而在长距离上则正好相反。这是因为相对折射吸收误差是由视在路径与辐射路径之间的高度差与浓度差共同决定的。在短距离内海拔差占优,海拔差随角度增加而增大的变化趋势决定了相对误差的变化趋势;在远距离处浓度差占优,天顶角愈大路径所处的海拔愈低、浓度差也愈小,从而使得相对误差也随着角度的增加而减小。误差限一定时,天顶角越大可探测的真实目标距离越长;1%误差要求时,所有角度下的真实路径长度在 150 km 以下,适合高精度的测距;5%误差要求时,在接近水平方向上的真实路径长度可达 200 km 以上,适合远距离测距告警。

图 5 给出了 45°视在天顶角方向上不同视在路径长度处海拔与目标真实海拔的海拔差(实线)和沿

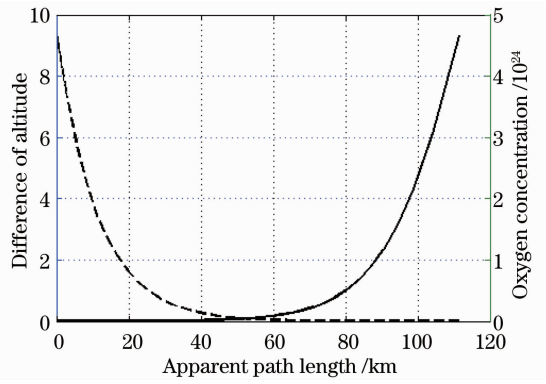


图 5 视在天顶角为 45°时视在路径长度上的海拔差与氧气浓度

Fig. 5 Difference of altitude and oxygen concentration on the apparent path at the zenith angle degree of 45°

视在路径的氧气浓度(虚线)。由图 5 可知,对于某一固定角度,随着视在路径长度的增加,海拔差也逐渐增大。由于吸收气体含量是海拔高度的指数衰减函数,所以随着视在路径长度的增加,海拔的增高,单位辐射路径的吸收需要更长的视在路径吸收来等效,因此,随着目标距离的增加,相对折射吸收误差的曲线曲率也逐渐增大。

表 1 给出了不同视在天顶角典型测距距离上的折射吸收误差值。由于 50°以下视在天顶角路径在 80 km 以后便到达海拔 60 km 以上的稀薄空气层,吸收气体的含量很低,导致折射吸收误差很大,所以将这些天顶角下的有效测程定为 80 km,同理,70°以下有效测程为 100 km。在视在天顶角接近 90°的十几度范围内,目标辐射主要在对流层和平流层范围内传播,折射产生的海拔高度差和氧气浓度差都不是很大,所以传播距离可以很远,但是在底层大气内氧气吸收对目标辐射的衰减很快,很难达到二三百公里,故将这些角度下的有效测程定为 150 km。

2) 视在天顶角大于 90°

假设视在天顶角大于 90°、探测器海拔为 20 km,目标海拔值即从海平面到探测器所在高度,以此来模拟空基探测器的被动测距情形。数值计算得到的相对折射吸收误差如图 6 所示。

图 6 中最大的相对折射吸收误差 0.106%发生在 110°视在天顶角上。所有天顶角下的相对误差值都很小,且随着角度的增大,相对误差也逐渐减小。在同一角度路径上,相对误差在小距离处一直保持平缓的较小值,当达到一定距离后相对误差才快速增大,但其增大幅度比天顶角小于 90°情形时要小得多,相对折射误差也要比其小很多。这是因为当探测器从高海拔向低海拔探测时,虽然高海拔

表 1 不同视在天顶角不同目标距离上的折射吸收误差(单位: 米)

Table 1 Refraction absorption errors under different zenith angles and target distances (unit: m)

	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
30 km	0.8807	3.2285	6.3215	9.3736	11.844	13.541	14.547	14.990	8.4007
50 km	12.431	41.786	71.319	88.709	92.195	87.046	79.443	73.447	52.057
80 km	529.69	1611.1	2172.5	1873.4	1261.7	769.02	479.09	339.56	360.01
100 km	—	—	—	—	—	3098.3	1340.5	741.79	505.89
150 km	—	—	—	—	—	—	—	3780.9	1882.2

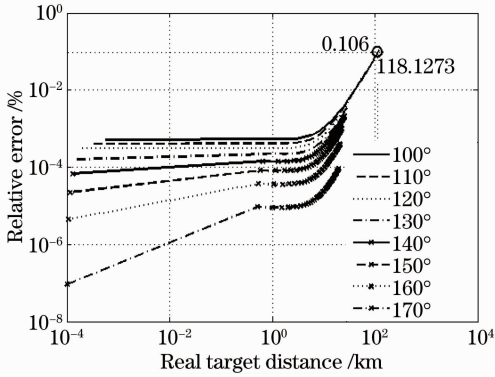


图 6 不同视在天顶角下相对折射吸收误差与目标真实距离关系曲线

Fig. 6 Relation curves of relative refraction absorption error and real target distance under different zenith angles

测器不同海拔高度下相同视在天顶角时的折射吸收误差,计算了几个典型海拔高度处 100°视在天顶角路径上的折射吸收误差,结果如图 8 所示。

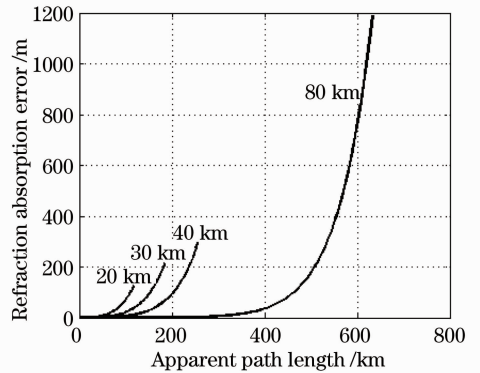


图 8 探测器不同海拔高度下视在路径长度与折射吸收误差的关系曲线

Fig. 8 Relation curves between the refraction absorption error and apparent path length after putting the detector into different altitudes

图 8 给出了视在天顶角为 100°,探测器海拔为 20、30、40、80 km 时折射吸收误差和视在路径长度的关系曲线。由图 8 可知,虽然不同海拔下的曲线快速增大点不同,但是曲线走势完全相同;随着海拔的不断升高,探测器可探测的范围迅速增加,折射吸收误差增加幅度也愈来愈快,但是其绝对误差值并不是很大。因此,在视在天顶角大于 90°的空对空、空对地情形下,基于氧气吸收被动测距的测程很长且折射吸收误差很小,可以进行一定精度下的远程告警测距。

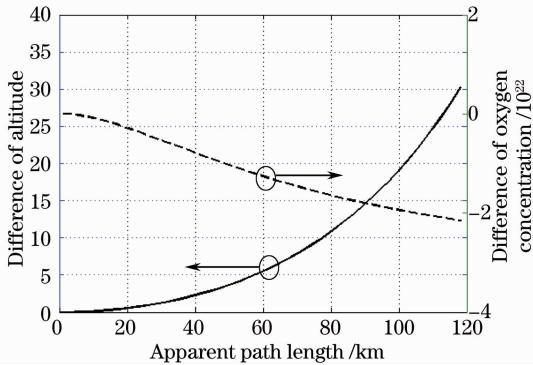


图 7 视在天顶角为 100°时视在路径长度上的海拔差和氧气浓度差曲线

Fig. 7 Difference curves of altitude and oxygen concentration on the apparent path at the zenith degree of 100°

区域不同高度处的氧气浓度差很大,但是与辐射路径吸收等效的视在路径长度处的海拔与目标真实海拔差很小,故折射吸收误差值也很小;随着目标真实距离的增加、视在路径射线的不断向下伸展,氧气浓度差在减小的同时海拔差却在增大,当后者的程度大于前者时便造成了相对误差值的增加。

图 7 给出的是视在天顶角为 100°时,不同视在路径长度处的海拔与目标真实海拔的海拔差(实线)以及它们所对应的氧气浓度差(虚线)。为了对比探

6 结 论

在详细研究基于带模式方法和单参数近似的氧气吸收被动测距模型的基础上,在考虑大气折射率的情况下,计算分析了目标辐射路径、目标探测器连线路径和视在路径的不一致性给被动测距带来的折射吸收误差。地基探测器情形下,短距离内误差随天顶角的增大而增大,在远距离上误差变化趋势正好相反。同一角度上,折射吸收误差随目标距离增

加而增大,尤其在吸收气体稀薄的高海拔地区,在越来越大的海拔差和氧气浓度差的双重作用下,折射吸收引起的误差迅速变大,从而限制了该情况下的被动测距测程。空基探测器情形下,误差变化规律较地基情形要简单,在有限测程内都是随天顶角的增加而减小且误差值要小得多。

通过分析可知,在地基探测器测距时,要注意考虑测程的限制,在进行远程测距时必须利用折射吸收误差对距离值进行修正。在空基探测器进行告警测距时,由于折射吸收误差较小,可忽略不计;但如果想获得更加精确的目标距离仍需要利用折射吸收误差进行修正。因此,本文的研究不仅为氧气吸收被动测距技术的误差修正提供了一定的理论支持,同时也证明了该被动测距技术具有很广的应用前景。

参 考 文 献

- 1 R H Michael. Passive Ranging Using Atmospheric Oxygen Absorption Spectra [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology. Wright-Patterson Air Force Base, 2006.
- 2 Joel R Anderson, Louis M Szczkowski, Brandon R Abel, *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. Wright-Patterson Air force Base, 2010.
- 4 R Anthony Vincent. Passive Ranging of Dynamic Rocket Plumes Using Infrared and Visible Oxygen Attenuation [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology. Wright-Patterson Air Force Base, 2011, 8052.
- 5 Zong Pengfei, Zhang Jilong, Wang Zhibin, *et al.*. Simulation and analysis of oxygen 'A' band's transmittance of infrared along slanting route [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(2): 171-175. 宗鹏飞, 张记龙, 王志斌, 等. 氧气 A 带红外辐射不同路径透过率的仿真分析[J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 171-175.
- 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. 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.
- 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. 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.
- 8 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(23): 6450-6455.
- 9 Lu Yuan, Ling Yongshun, Nie Jinsong. Study on the retraction error of laser beam through the earth's atmosphere [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(1): 69-72. 路远, 凌永顺, 聂劲松. 激光穿越大气层时的折射误差研究[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 69-72.
- 10 Yuan Hongwu, Mei Haiping, Huang Yinbo, *et al.*. Research on atmospheric refraction correction algorithm and model for satellite laser range-finding [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0401004. 袁宏武, 梅海平, 黄印博, 等. 星载激光测距大气校正算法与模型研究[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0401004.
- 11 Wang Haiyong, Lin Haoyu, Zhou Wenrui. Technology of atmospheric refraction compensation in starlight observation [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1101002. 王海涌, 林浩宇, 周文睿. 星光观测蒙气差补偿技术[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1101002.
- 12 Zhang Yu, Yuan Qiulin. The method research of radio-wave radial track description from radar to objective [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2006, 34(2): 50-53. 张瑜, 袁秋林. 雷达至目标的电波射线描述方法研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2006, 34(2): 50-53.
- 13 Zhang Yu. The method of radio wave refraction correction in movable radar system [J]. Chinese Space Science and Technology, 2000, 20(4): 67-71. 张瑜. 机动雷达系统中的电波折射修正方法[J]. 中国空间科学技术, 2000, 20(4): 67-71.
- 14 Zhang Yu. The arriving angle error correction method of the laser transmitting in atmosphere [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2008, 36(2): 57-59. 张瑜. 激光在大气传输中的到达角误差修正方法研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2008, 36(2): 57-59.
- 15 Zhang Shijie, Li Junshan, Sun Lihui, *et al.*. Aero-optical imaging deviation under the small-incidence-angle condition [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1001002. 张士杰, 李俊山, 孙李辉, 等. 小入射角条件下气动光学成像偏移[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1001002.
- 16 Shi Guangyu. Atmospheric Radiation Science [M]. Beijing: Sciences Press, 2007. 石广玉. 大气辐射学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- 17 Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming, *et al.*. Profile and character of atmospheric temperature [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 592-596. 孙刚, 翁宁泉, 肖黎明, 等. 大气温度分布特性及对折射率结构常数的影响[J]. 光学学报, 2004, 24(5): 592-596.
- 18 Wang Min, Hu Shunxing, Su Jia, *et al.*. Measurement of refractive profiles using a pure rotational Raman radar in the lower-atmosphere [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(12): 1986-1991. 王敏, 胡顺星, 苏嘉, 等. 纯转动拉曼激光雷达反演低层大气折射率廓线[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1986-1991.

栏目编辑: 王晓琪