

文章编号 1004-924X(2015)03-0667-11

## 相关 K 分布法在氧气吸收被动测距中的应用

闫宗群<sup>1\*</sup>, 刘秉琦<sup>1</sup>, 华文深<sup>1</sup>, 张 瑜<sup>1</sup>, 李 刚<sup>1</sup>, 周 斌<sup>2</sup>, 沈宏斌<sup>1</sup>

- (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 71192 部队, 山东 威海 264200)

**摘要:**为快速、准确地解算氧气吸收被动测距技术中氧气吸收率所对应的路径长度, 对该项技术中氧气吸收率与路径长度的数学模型进行了研究。首先证明了不同温度压强下氧气吸收系数分布的强相关性, 给出了吸收系数分布随温度和压强的变化规律; 其次利用相关 K 分布法和曲面地球模型建立了实际非均匀路径上氧气吸收率与路径长度的数学模型; 最后对提出的模型进行了理论分析与实验验证。结果显示: 本文数学模型不仅能够很好地适应不同大气模式的变化, 而且能够快速、准确地计算出指定路径上的氧气吸收率曲线和目标距离; 平均数学模型下的相对测距误差为 4.4%, 消除背景减小测量误差后数学模型解算距离的相对误差仅为 1%。结论表明: 利用相关 K 分布法建立的数学模型能够很好地解决氧气吸收被动测距技术中的距离反演问题, 可为被动测距技术的进一步优化和应用提供理论支撑。

**关键词:** 氧气吸收; 被动测距; 相关 K 分布法; 非均匀路径; 吸收系数

**中图分类号:** TN976; TN219 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0667

### Application of CKD method to passive ranging by oxygen absorption

YAN Zong-qun<sup>1\*</sup>, LIU Bing-qi<sup>1</sup>, HUA Wen-shen<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>,  
LI Gang<sup>1</sup>, ZHOU Bin<sup>2</sup>, SHEN Hong-bin<sup>1</sup>

- (1. Department of Electronics and Optics Engineering,  
Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;
  2. Unit 71192, Chinese People's Liberation Army, Weihai 264200, China)
- \* Corresponding author, E-mail: yanzongqun@163.com

**Abstract:** To quickly and accurately solve the path length corresponding with the oxygen absorptivity of oxygen absorption passive ranging technology, this paper explores the mathematical model on oxygen absorptivity and path length. Firstly, the strong correlation of different absorption coefficient distributions under different temperatures and pressures was verified and the relation between absorption coefficient distributions and temperatures, pressures was given. Then, the mathematical model on oxygen absorptivity and path length was established by using Correlation-K Distribution (CKD) method and surface Earth's model. Finally, the theoretical analysis and experimental checking were performed. The results show that this mathematical model not only well adapts to altered atmospheric models, but also quickly and accurately calculates the oxygen absorptivity curves of specified path and the target distances. The relative ranging error is 4.4% under average math mode,

收稿日期: 2014-08-25; 修订日期: 2014-10-10.

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(F2014506004)

but the relative error is only 1% after eliminating background and reducing measurement errors. The conclusion shows that the math mode solves the ranging inverse problem of the oxygen absorption passive ranging technology, and provides some theoretical supports for the further optimization and application of passive ranging technology.

**Key words:** oxygen absorption; passive ranging; correlated-K distribution method; nonhomogeneous path; absorption coefficient

## 1 引言

K 分布法<sup>[1]</sup> (K Distribution, KD) 是一种用来计算一定波数范围内气体平均吸收率的方法。相关 K 分布法<sup>[2]</sup> (Correlated-K Distribution, CKD) 在 KD 法的基础上, 合理假设了不同温度和压强下吸收系数重排后其概率密度分布的相关性, 因而成为了目前解决非均匀大气平均吸收率的重要方法。与传统逐线积分算法相比, CKD 法效率高, 能节省大量计算资源; 与传统带模式法相比, CKD 法不仅精度好, 而且还可以直接解决带模式法无法解决的大气散射问题。

由于在解算精度和解算效率上的优势, CKD 法一经提出便成为了国内外学者的研究重点, 并已在行星大气研究、遥感探测、辐射分析等领域得到了广泛的应用<sup>[3-14]</sup>。Tsang 等利用 CKD 方法分析了金星大气近红外波段的多次散射问题<sup>[3]</sup>。Caliot 等利用 CKD 法的改进算法对远距离高温 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CO 混合气体的红外光谱进行了分析, 并成功实现了对热喷流的遥感辨别<sup>[7]</sup>。石广玉和张华大大提高了 CKD 法的计算效率并给出了 CKD 法解决非均匀路径的基本思想<sup>[8-9]</sup>。尹雪梅和刘林华将 CKD 法用于高温尾喷焰的远程探测, 大大提高了气体辐射特性的计算效率<sup>[10-11]</sup>。魏合理等人利用 CKD 法成功实现了水汽宽吸收带光学透过率的快速解算<sup>[12-13]</sup>。CKD 算法的不断改进和在众多领域的成功应用<sup>[21-22]</sup>, 进一步验证了其计算精度好、效率高的优点, 并因此成为了研究热点。

氧气吸收被动测距技术<sup>[15-19]</sup> 是一种利用大气中氧气 A 吸收带对目标近红外辐射的吸收, 被动获取目标距离的单目被动测距技术。由于氧气 A 吸收带及其左右带肩具有很好的光谱独立性, 所以通过左右带肩便可拟合出吸收带内无氧气吸收时的吸收基线, 然后通过计算吸收带吸收前后的目标辐射来消除其它气体吸收及散射效应的影响, 获得准确的氧气吸收率。快速准确地解算吸

收率所对应的目标距离是实现实时被动测距的基础, 因此需要构建一个高效、准确的氧气吸收率与路径长度的数学模型。本文充分利用 CKD 法计算平均吸收率的优势, 在曲面地球模型的基础上建立了实际大气内非均匀路径上氧吸收率与路径长度的数学模型, 从而为氧气吸收被动测距技术的实际应用提供了一定的理论支撑。

## 2 氧气吸收系数分布的相关性

### 2.1 相关 K 分布法

CKD 法是在 KD 法的基础上提出的, 它通过吸收系数的有序重排将随波数剧烈变化的吸收系数变换成与波数无关的平滑曲线, 如图 1 所示。CKD 法利用简单的高斯积分代替波数空间的复繁积分, 从而快速准确地解算某一温度、压强组合下吸收带的平均吸收率。通过合理假设不同温度和压强组合下重排后吸收系数累积概率分布的相关性, 将只能用于均匀大气的 CKD 法拓展到非均匀大气路径平均吸收率的计算中。

图 1(b) 中的  $g(k)$  为吸收系数的累积概率函数, 它是一个吸收系数空间的单调递增函数, 该函数表示为:

$$g(k) = \int_0^k f(k') dk', \quad (1)$$

式中:  $k$  为吸收带内的吸收系数,  $f(k')$  为波数空间吸收系数的概率分布函数。由于图 1 中两条吸收系数曲线的面积完全相同, 图 1(b) 中吸收系数曲线面积可以利用简单的高斯积分法, 通过对重排后吸收系数分布曲线的积分进行求解, 其计算公式为:

$$\bar{T}(u) \approx \sum_{j=1}^n \exp[-k(g_j)u] \Delta g_j, \quad (2)$$

式中:  $n$  为高斯积分点的个数,  $k(g_j)$  为第  $j$  个高斯积分点处的吸收系数值,  $\Delta g_j$  为第  $j$  个高斯积分点处的累积概率密度宽度。从数学意义上讲,  $k(g_j)$  和  $\Delta g_j$  分别为被积曲线第  $j$  个积分间隔的曲线函数值和间隔宽度。

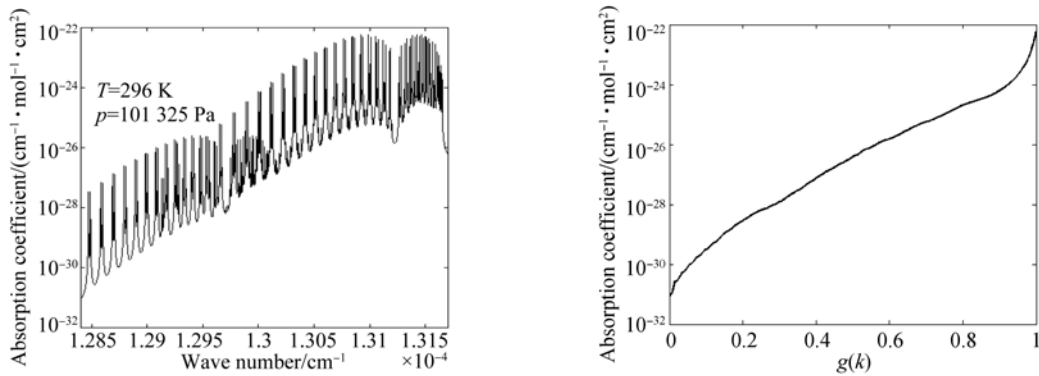


图 1 氧气 A 吸收带内随波数和累积概率变化的吸收系数曲线

Fig. 1 Absorption coefficient as a function of wavenumber and cumulative probability respectively in A absorption band of oxygen

基于上述机理,在均匀大气中一旦获得吸收气体含量和需要计算波数范围内吸收系数的  $k$  分布曲线,便可便捷、精确地计算出该波数范围内的平均透过率。然而,实际大气中对吸收系数影响极大的温度和压强随着海拔的变化而不断改变,故对于实际大气中的一条倾斜路径来说,路径上不同点处的吸收系数分布也不相同。因此,研究人员在 CK 法的基础上,假设不同温度和压强下重排后吸收系数的概率密度分布曲线( $k$ - $g$  曲线)具有一定的相关性,进而提出了可用于处理实际非均匀大气内路径平均透过率问题的相关 CKD 法。按照一定的规则将实际大气层划分为若干个分层,式(2)中的  $n$  个高斯积分点适用于所有的大气分层,则在实际大气中一条穿过  $m$  层大气分层的非均匀路径上的平均透过率为:

$$\bar{T}(u) = \sum_{j=1}^n \exp\left[-\sum_{i=1}^m k_j^i(g) u_i\right] \Delta g_j, \quad (3)$$

式中:  $k_j^i(g)$  为第  $i$  层大气分层第  $j$  个高斯积分点上的吸收系数;  $u_i$  为第  $i$  层大气分层内吸收气体

的分子含量。由于光学厚度等于吸收系数和吸收气体含量的乘积,所以上式指数项内的累加便是对路径所穿过的各个大气分层的光学厚度的累加。由此可见,一旦氧气吸收带内的吸收系数分布满足 CKD 的假设前提,便可以利用相关 CKD 法来建立任意路径上氧气平均吸收率与路径长度的关系模型。

### 2.2 氧气吸收系数分布的相关性

为了验证氧气 A 吸收带内吸收系数分布在大气层范围内的相关性,这里分别设定 9 个不同的压强和温度格点,压强格点上的压强值分别为  $1.013\ 25 \times 10^{-2}$ ,  $0.103\ 325$ ,  $1.013\ 25$ ,  $10.132\ 5$ ,  $101.325$ ,  $1\ 013.25$ ,  $10\ 132.5$  和  $121.590$  Pa;温度格点上的温度值分别为 170, 200, 230, 260, 280, 290, 300, 310 和 320 K。图 2 分别给出了温度为 296 K 时不同压强下吸收系数的累积概率分布曲线和压强为 1 013.25 hPa 时不同温度下吸收系数的累积概率分布曲线,如图 2 所示。

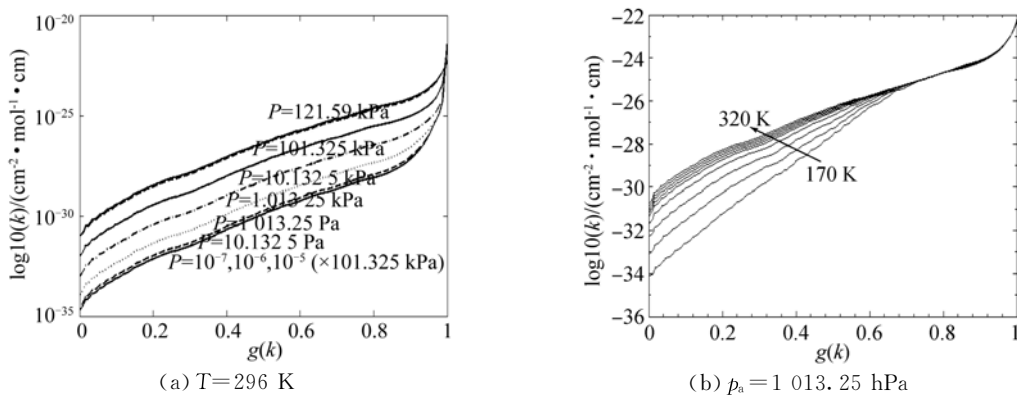


图 2 在不同压强和不同温度上的吸收系数累积概率分布曲线

Fig. 2 Distribution curves of cumulative probability under different pressures and temperatures in oxygen A band of  $12\ 840\text{--}13\ 170\ \text{cm}^{-1}$  respectively

从图 2(a)可知,所有压强下重排后的吸收系数分布趋势基本一致,分布曲线也较为平滑;在较弱的吸收系数一端,吸收系数与大气压强变化成正比,吸收系数随压强的变化较为明显且在大部分累积概率分布处吸收系数的变化程度也较为一致;但当累积概率接近 1 时,所有压强下的吸收系数曲线变化迅速且较小气压下的吸收系数值反而大于较大气压下的吸收系数,呈现出与压强成反比的变化规律。这说明大气层中不同大气压强下氧气 A 吸收带的吸收系数分布曲线之间具有较好的相关性,虽然不能严格满足压强与吸收系数一一对应的关系,但是依然能够满足 CKD 处理的要求。

从图 2(b)可知,温度对吸收系数的影响较压

强变化的影响要小得多;在整个累积概率分布上吸收系数变化均与温度变化成正比,且随着概率和吸收系数的增大,温度对吸收系数的影响减小。由于在计算氧气吸收率或者透过率时,大吸收系数起主要作用,所以温度对吸收率或者透过率的影响较弱。

一方面考虑到氧气 A 吸收带的带宽范围高达 330 个波数,另一方面根据吸收系数的累积概率分布曲线两端陡峭中间平缓的变化趋势,这里选择了张华<sup>[9]</sup>提出的用 32 个高斯积分点计算吸收系数累积概率分布曲线面积,即平均吸收率。为了详细分析吸收系数随压强和温度的变化规律,图 3 给出了固定温度和固定压强下 32 个高斯积分节点上吸收系数随压强和温度的变化曲线。

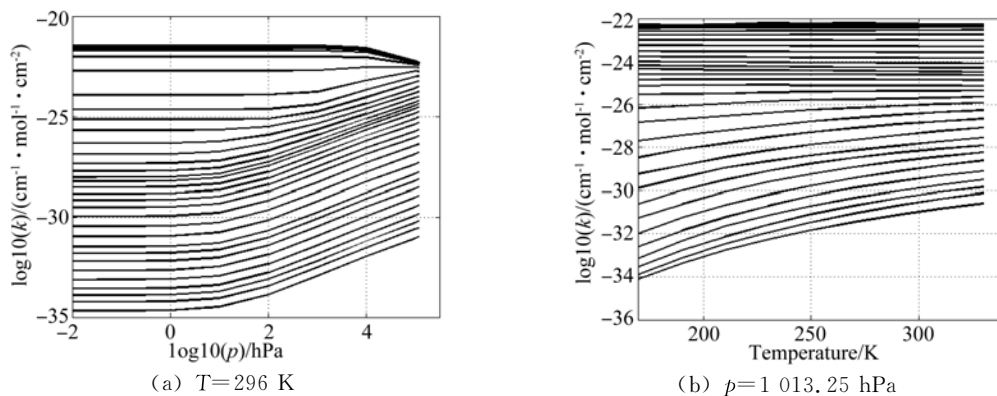


图 3 高斯积分节点上吸收系数随压强和温度的变化曲线

Fig. 3 Absorption coefficient curves with variation of pressure and temperature respectively on Gauss integral points

由图 3(a)可知,32 个高斯积分节点中在大吸收系数位置的节点间隔很小,节点分布密集,在吸收系数变化比较平缓的中小吸收系数位置的节点分布较为稀疏,这样便能保证 CKD 法累加计算平均吸收率的精度。其中,最大吸收系数反映的是各条吸收谱线中心位置处的吸收系数;而最小吸收系数则反映的是各条吸收谱线线翼部分的吸收系数。从图中可知:第一,所有积分节点上的吸收系数都有一段与压强无关的水平区域;第二,大吸收系数位置处的几个积分节点在绝大多数压强上都是不变的,但随着压强的继续增大,吸收系数开始逐渐减小;第三,随着积分节点上吸收系数值愈来愈小,各个节点上与大气压强无关的水平范

围越窄,吸收系数线性增大的阈值压强越小。因此,在设定参考吸收系数后,用分段函数来计算任意压强下的每个高斯积分节点上的吸收系数。

从图 3(b)可以看出:在整体趋势上,温度对吸收系数的影响要比大气压强的影响小得多,小吸收系数随大气压强的变化幅度可达 4 个数量级,而温度对它的影响最多仅有 2~3 个数量级;大吸收系数随温度变化的幅度更小,基本可看作不变。在细节上,对气体吸收起主导作用的大吸收系数随温度的变化很小,基本可忽略不计。积分节点上吸收系数随温度的变化规律可以在确定不同温度和压强下吸收系数关系式或者预制吸收系数列表时加以考虑,以在保证精度的前提下进一步简化模型。

### 3 非均匀路径的氧气吸收率模型

通过对氧气吸收系数  $k-g$  曲线相关性的分析,证明了氧气 A 吸收带的吸收系数分布具有很好的温度和压强相关性。因此,可以利用 CKD 法来计算氧气吸收被动测距技术中非均匀路径氧气的平均吸收率,并建立实际非均匀路径上氧气平均吸收率与路径长度的数学模型。

这里将地球近似为一个标准球体,半径为  $R_e$ ;观测平台 O 点的海拔为  $h_0$ ,从 O 点出发倾斜路径的天顶角为  $\theta_0$ ,倾斜路径上任意一点 T 距离 O 点的路径长度为  $l$ ,如图 4 所示。

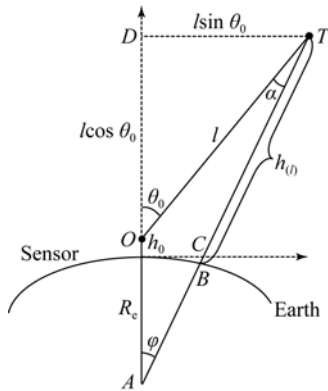


图 4 倾斜路径上任一点的海拔高度图

Fig. 4 Map of altitude height of any point along slant path

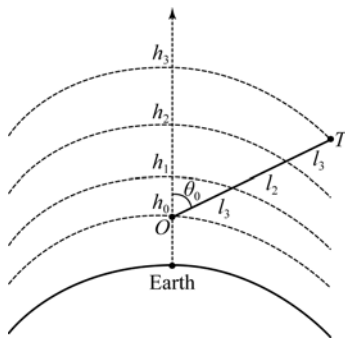


图 5 实际非均匀倾斜路径的分段示意图

Fig. 5 Schematic map of sublevel of nonhomogeneous slant path

根据 Hawks<sup>[15]</sup> 的研究,可以将非均匀路径上任意一点的海拔高度表示为起点海拔、路径天

顶角和路径长度的关系,如式(4)所示:

$$h_{(l)} = h_0 + l \cos \theta_0 + \frac{(l \sin \theta_0)^2}{2R_e} \quad (4)$$

将实际非均匀倾斜路径按照路径长度变化分为若干个等长的子路径(如图 5 所示),从而将非均匀的倾斜路径转化为若干个均匀路径进行处理。

实际大气中的一条倾斜路径 OT,已知其起始位置 O 处的位置和气象信息  $(h_0, \theta_0; T_0, p_0)$ ,整个路径 OT 的长度  $L = l_1 + l_2 + \dots + l_n = M\Delta l$ ,倾斜路径的每个分路径  $\Gamma_i$  可以用这段分路径两端的海拔信息和该段路径的长度信息来表示,即  $\Gamma_i = \Gamma(h_{i-1}, h_i, l_i)$ 。则倾斜路径 OT 在指定波数  $\nu$  上的光谱透过率为:

$$T(L, \nu) = e^{-\tau(L, \nu)}, \quad (5)$$

式中:  $\tau(L, \nu)$  为倾斜路径在波数  $\nu$  上的光学厚度,  $L$  为倾斜路径的总长度。因此整个倾斜路径上的光学厚度表示为:

$$\tau(L, \nu) = \int_L k(l, \nu) N(l) dl, \quad (6)$$

其中:  $l$  为倾斜路径上的任意一点;  $k(l, \nu)$  为点  $l$  上波数  $\nu$  处的吸收系数;  $N(l)$  为点  $l$  处吸收气体的浓度;  $dl$  为点  $l$  处的一个有限元。用各段分路径中间点处的吸收系数和气体浓度分别作为该段子路径的平均吸收系数和吸收气体的平均浓度,则整个倾斜路径上总的光学厚度公式(6)可改写为所有子路径光学厚度的累加形式,即:

$$\tau(L, \nu) = \sum_{i=0}^M k(i, \nu) N_i \Delta l, \quad (7)$$

式中:  $k(i, \nu)$  为第  $i$  段子路径波数  $\nu$  处的吸收系数;  $N_i$  为第  $i$  段子路径上吸收气体的平均浓度;  $\Delta l$  为子路径的间隔长度。利用倾斜路径起点上的位置信息和气象信息,根据式(3)及大气中温度与压强随海拔高度的变化规律<sup>[20]</sup>,便可以分别求出各段子路径上的平均海拔  $\bar{h}_i = (h_{i-1} + h_i)/2$ 、平均温度  $\bar{T}_i$ 、平均压强  $\bar{p}_i$  以及吸收气体的平均浓度  $\bar{N}_i$ 。此时,倾斜路径上总的光学厚度为:

$$\tau(L, \nu) = \sum_{i=0}^M k_\nu(\bar{T}_i, \bar{p}_i) \bar{N}_i \Delta l. \quad (8)$$

倾斜路径指定波数内的平均透过率为:

$$\bar{A}^k = 1 - \sum_{g=1}^G a_g \exp\left[-\sum_{i=0}^M k_g(\bar{T}_i, \bar{p}_i) \bar{N}_i \Delta l\right], \quad (9)$$

其中:  $G$  为高斯积分点的个数;  $k_g$  为第  $g$  个高斯

积分点处的吸收系数;  $a_g$  为第  $g$  个吸收系数所对应的概率。在已知倾斜路径总长度的前提下, 可以通过直接累加  $M$  个子路径解算出倾斜路径上的平均吸收率。如果仅仅知道倾斜路径起点的位置信息和路径的平均吸收率, 则可利用式(9)求出若干个  $M$  值所对应路径长度处的平均吸收率, 绘制出该倾斜路径方向上平均吸收率与路径长度的关系曲线, 从而及时插值出某一测量吸收率所对应的路径长度。

因此, 这里将式(9)作为实际大气内非均匀路径的氧气吸收率模型。该函数不仅是个数值函数, 而且还是个隐函数, 虽然不能利用该函数直接解算出被动测距中测量目标的距离, 但是它提供了一个方便、快捷、准确的平均吸收率与路径关系曲线的制定方法。

#### 4 模型分析和实验验证

根据高斯节点上吸收系数随压强的分段函数式变化和随温度的弱正比变化, 依次计算从海平面到大气层顶内不同海拔高度上压强和温度所对应的吸收系数分布, 并提取相应高斯积分点上的吸收系数, 制成一个二维的吸收系数列表, 如图 6 所示。在根据路径点上的温度和压强插值计算相应高斯积分点上的吸收系数时, 只需利用压强进行插值计算便可。这种处理方式忽略了温度对吸

收系数的影响, 可以大大减少数据资源消耗, 提高程序的解算效率。

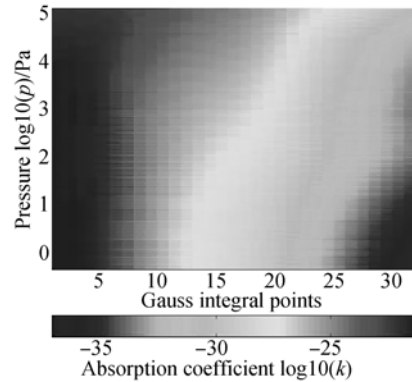


图 6 不同压强下高斯积分节点上的吸收系数分布  
Fig. 6 Absorption coefficient distribution of Gauss integral points under different pressures

根据预制的吸收系数列表和非均匀路径上平均吸收率与路径长度的关系模型, 编写一个快速插值计算程序, 在已知路径起点信息的情况下, 快速准确地给出相应路径上的平均吸收率曲线。为检验模型的适应性, 分别在 6 种标准大气模式下计算同一起点海拔为 0 km, 天顶角为  $45^\circ$  的倾斜路径的平均吸收率曲线。其中路径长度为 50 km, 6 种标准大气模式在路径起点处的温度和压强如表 1 所示, 计算结果如图 7 所示。

表 1 倾斜路径起点处的压强和温度信息

Tab.1 Pressures and temperatures on starting points of slant path

	MLS	MLW	TM	SLS	SLW	1976USS
Pressure/hPa	1 013.00	1 018.00	1 013.00	1 010.00	1 013.00	1 013.25
Temperature/K	294.2	272.2	299.7	287.2	257.2	288.1

表 1 中, MLS, MLW, TM, SLS, SLW, 1976USS 分别代表 Modtran 软件中中纬度夏季、中纬度冬季、热带、亚北极区夏季、亚北极区冬季和 1976 美国标准大气这 6 种大气模式。

由图 7 可知: 在 6 种典型大气模式中, 氧气平均吸收率与路径长度的数学模型都能很精确地给出设定路径的氧气平均吸收率曲线, 证明数学模型在不需要调整的情况下便可以适用于不同海拔

和不同天顶角的倾斜路径; 同时, 倾斜路径上的相对误差基本不大于 2% 且小于软件仿真结果。整体上, 数学模型计算的氧气吸收率误差均在开始段有所增加, 达到一个最值后迅速减小, 并逐渐变得平滑; 同时随着路径长度的增加, 相对误差并没有增加, 说明平均吸收率的绝对误差并不随路径长度的增加而增大。这不仅保证了氧气吸收被动测距的测距精度, 也成为了氧气吸收被动测距技术好于其它被动测距技术的优势所在。

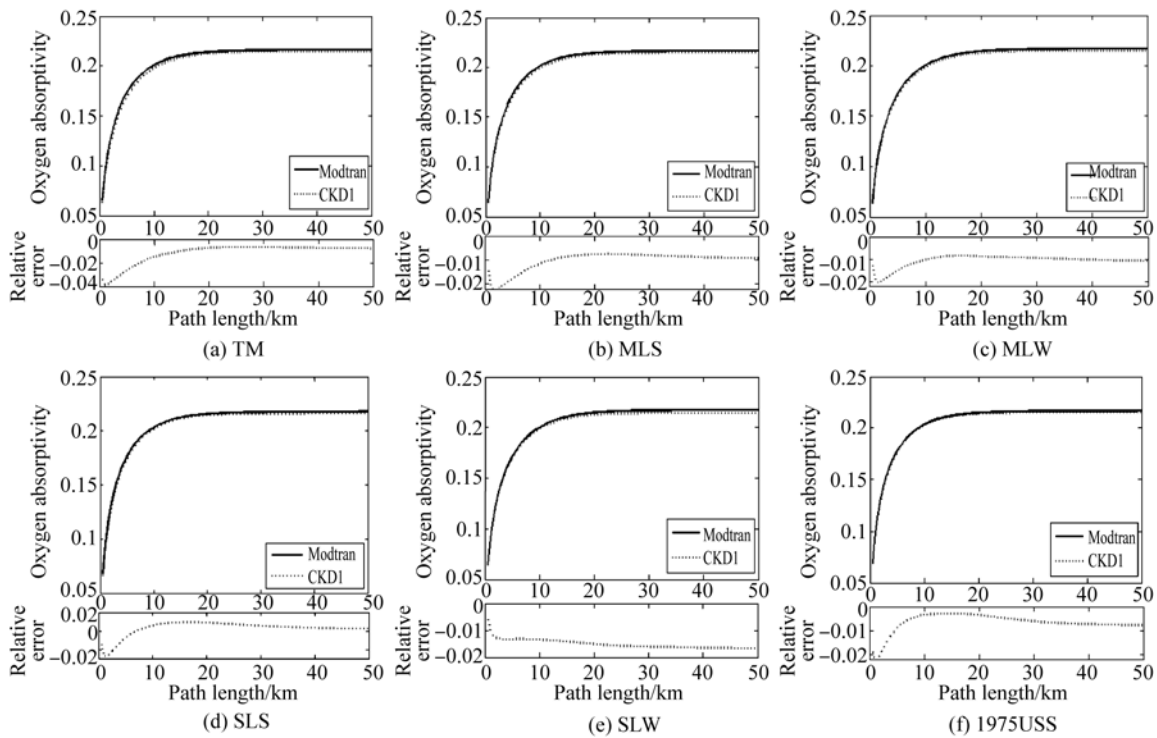


图7 不同大气模式下倾斜路径上软件仿真和模型计算的氧气平均吸收率对比

Fig. 7 Comparison of oxygen absorption between model calculation and software simulation under different atmosphere models

2006年国外学者Hawks曾针对氧气平均吸收率与路径的关系问题,提出了利用带模式法中的随机分布模型和曲面地球模型建立平均吸收率与路径长度的关系模型<sup>[15]</sup>。该模型函数与本章所建立的模型函数一样为数值隐函数,但是该模型中不仅包含不完全 $\gamma$ 函数、贝塞尔函数和误差函数等计算复杂的特殊函数,而且还有4个未定参量。每次使用前需要预知所需路径上若干个距离点及其所对应的氧气吸收率,这样才能通过拟合确定未定参量,从而绘制所需路径上的氧气吸收率曲线;这不仅需要大量的时间,而且其实际应用存在一定难度。图8给出了在MLS大气模式下,10 km海拔、 $89^\circ$ 天顶角路径上两种数学模型绘制的氧气吸收率曲线。

图8(a)中显示的是Modtran软件仿真的平均吸收率曲线和带模式模型绘制的平均吸收率曲线。带模式模型将软件仿真计算出的60个等间隔距离点处的氧气吸收率作为预知数据,然后通过拟合方法得到了模型函数中的未定参数值,进而绘制出该条路径上的平均吸收率曲线。因为数据处理函数复杂且数据处理量大,所以图8(a)中

的曲线耗时大约为30 s左右,所以该方法适合用于数据的后处理。图8(b)中本文模型所绘的曲线是在仅知道探测系统位置及气象信息的情况下绘制的。当子路径步长为1 km时绘制300 km距离上的氧气吸收率曲线共需时1.34 s,相比带模式模型来说耗时少得多。由于一方面计算机硬件有限以及数学模型的程序未进行优化,另一方面计算的路径较长,累加次数高达300次,本文数学模型统制曲线的耗时较多。随着课题研究的深入,专用硬件设计和程序优化工作的完善,本文数学模型的计算效率仍能进一步得到提高。

从精度上来说,带模式模型的精度在路径开始段要好于本文数学模型的精度,但在远距离上二者的精度相当。这是因为带模式模型有较多已知距离点对模型曲线进行约束;如果约束的已知距离点数减少,该模型的精度必然要受到影响,而本文算法却不受此影响。通过两种模型的对比,证明本文利用CKD法建立起来的模型函数简洁、在保证精度较高并较为稳定的同时大大提高了计算效率,缩短了计算时间。

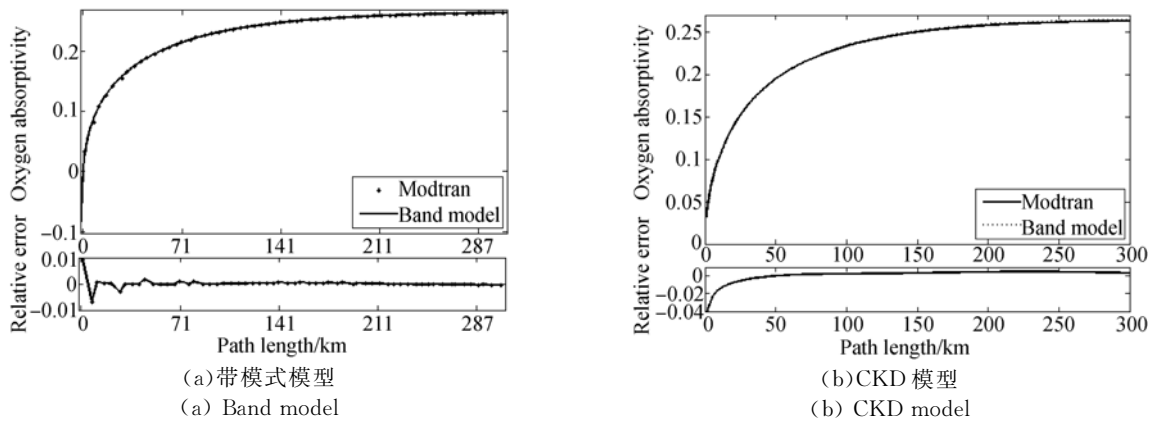


图 8 带模式模型和 CKD 模型的氧气平均吸收率及其相对误差曲线  
 Fig. 8 Oxygen absorption and relative error of band model and CKD model

为了检验数学模型在实际测距中的初步效果,这里设定了 4 个不同距离的目标点,目标均为功率 1 000 W 的卤钨灯。测量目标光谱的成像光谱仪的光谱分辨率为 1 nm,设置成像光谱仪位置处的海拔高度为 0.08 km、温度为 10 °C、压强为 1 018 hPa,目标探测器连线路径的天顶角为 90°。以上温度、压强和天顶角为该段测量时间内的平均值,则数学模型在这些参数下给出的距离解算曲线以及各个测量点处的氧气吸收率如图 9 所示。

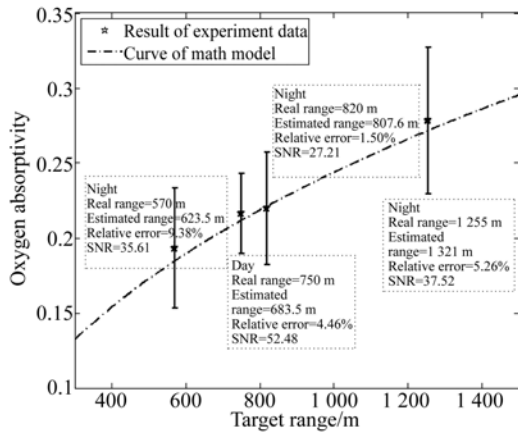


图 9 外场实验数据结果和数学模型曲线  
 Fig. 9 Results of experimental data and curve of CKD model

图 9 给出了实验过程中 4 个实验点的氧气吸收率以及依据光谱仪位置信息和路径天顶角信息模型计算的氧气吸收率曲线。由图可知:利用平均输入参数数学模型解算的 4 个实验点距离的平

均相对误差为 4.4%,且所有估算距离值都接近氧气吸收率计算误差带的中心,同时利用数学模型给出的整个氧气吸收率与目标距离的关系曲线基本上从所有实验点的误差带中心通过;所有实验点处的估算距离基本上都大于目标的真实距离;信噪比越大,吸收率的计算误差越小,计算的吸收率也越稳定。同时,本次数学模型对 4 个点的解算仅耗时 0.191 s。结果表明,仅用测量系统处海拔、温度、压强和路径倾角信息解算的氧气吸收率曲线能够较为准确地反应真实的吸收率与距离的变化关系;初步证明了数学模型的有效性。实验结果中较大的相对误差有以下两个来源:一是测量误差,即数据测量和处理过程中的背景光谱、目标提取方法、数据采集实时性等都会造成目标光谱曲线的误差,进而导致氧气吸收率的计算误差;二是模型输入误差,即模型计算氧气吸收率时所需要的 4 个参数可能存在一定的测量误差。

为了进一步验证数学模型的有效性,减小测量误差和模型输入误差的影响,对一远距离独立目标点进行了被动测距,模拟了数学模型在实际应用中的被动测距情况。系统架设于一栋建筑的六楼室内,目标布置在距离该建筑 2 360 m 远的另一栋建筑的 15 层室内。系统架设处的海拔高度为 90 m,温度为 297 K,大气压强为 1 007 hPa,目标相对成像光谱仪的天顶角为 89.34°。成像光谱仪系统采集到的目标在 740 nm 波长处的原始图以及三维灰度图如图 10 所示。

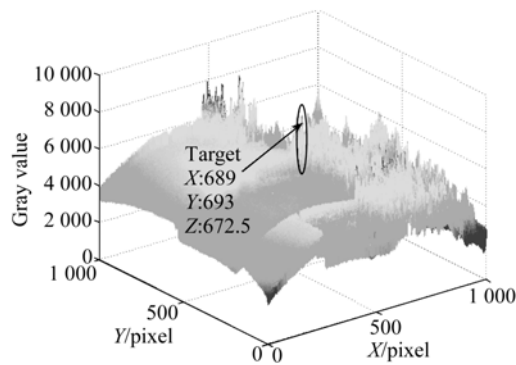


图 10 目标在 740 nm 波长处的原始图及三维灰度图

Fig. 10 Raw image and three-dimensional image of target on 740 nm

为了减少测量噪声,对目标区域数据进行背景消除处理,去除背景光谱对提取目标光谱的影响。设置一定的目标提取阈值对各个波长上的目

标灰度值进行提取,则背景消除前后利用提取目标光谱数据计算出来的氧气吸收率及数学模型输出的解算曲线如图 11 所示。

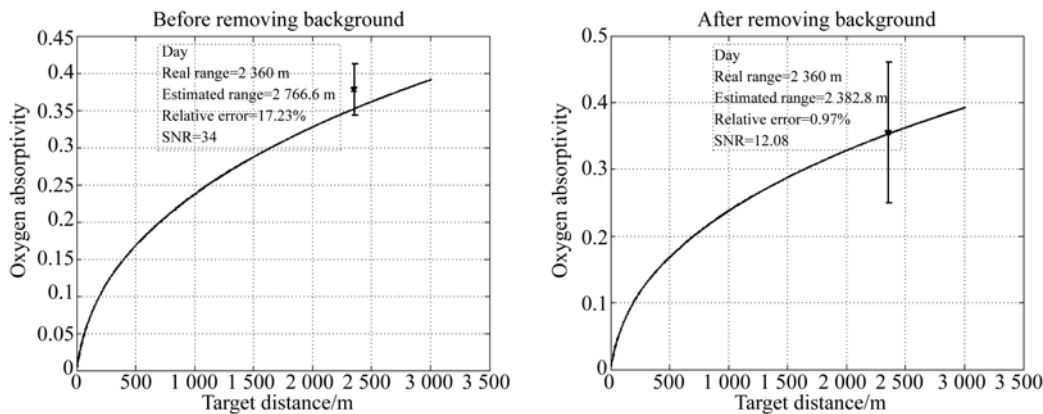


图 11 背景消除前后的氧气吸收率和数学模型的解算曲线

Fig. 11 Resolving curves of math model and oxygen absorptivity before and after removing backgrounds

图 11 分别给出了数学模型利用成像光谱仪位置处的已知信息计算所得的距离解算曲线,以及背景消除前后的氧气吸收率。由图可见:背景消除前后的氧气吸收率均有较大的误差带,尤其是背景消除后的吸收率误差带更大;虽然背景消除后的目标光谱曲线的信噪比降低了,但是测距精度却大大提高,测距的相对误差仅为 0.97%。其原因在于不论是否消除背景,提取的目标光谱曲线都会因为目标亮度的时变性而变得起伏,只是背景消除前大量背景光谱的存在掩盖了真实目标的光谱细节,减弱了目标亮度时变性的影响,所以背景消除后的光谱曲线信噪比降低,吸收率误

差带增大。但是由于背景光谱主要是背景散射或者反射的太阳光谱,而这些太阳光谱中氧气吸收带波段光谱已经过了整个大气层的衰减,很大的吸收带深度会将目标吸收带的深度拉深,从而导致背景消除前较大的氧气吸收率及测距相对误差。背景消除后虽然带来了一定的基线拟合误差,但是大幅减小的测量误差增大了数学模型用于距离反解的氧气吸收率的精度。由此可见,在保证氧气吸收率计算精度的情况下,数学模型具有很高的距离解算精度,可以满足实际被动测距的需要。

## 5 结 论

不同温度和压强下氧气吸收系数的累积概率分布之间具有很高的相关性,满足 CKD 处理实际非均匀路径平均吸收率问题的假设前提,本文通过分析高斯积分节点上吸收系数随温度和压强的变化规律,得到了积分节点上吸收系数随压强的分段函数式变化规律和随温度的弱正比关系,将 CKD 法和曲面地球模型相结合较好地解决了氧气吸收被动测距技术中由氧气平均吸收率向目标距离的逆向解算问题,给出了氧气平均吸收率

与路径长度的数学模型,并设计了相应的计算程序。通过数学模型分析和实验验证,证明了本文所建立的数学模型不仅具有很好的气候适应性,而且具有模型函数简洁、速度快捷、精度较好的优势。该模型在实际应用中能够很好地逆向解算目标距离,初步验证了其正确性,也分析了影响数学模型的因素,为数学模型的进一步优化及它在氧气吸收被动测距技术的应用提供了一定的理论支撑。研究减小测距误差、增大吸收率计算精度的背景抑制和消除算法,目标识别和提取算法以及像元光谱解混算法等将是氧气吸收被动测距技术下一阶段的主要工作。

### 参考文献:

- [1] 石广玉. 大气辐射计算的吸收系数分布模式 [J]. 大气科学, 1998, 22(4):559-674.  
SHI G Y. On the k-distribution models in the atmospheric radiation calculations [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(4):559-674. (in Chinese)
- [2] GOODY R, WEST R, CHEN L, *et al.*. The correlated-k method for radiation calculations in non-homogeneous atmospheres [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1989, 42(6):539-550.
- [3] TSANG C C C. A correlated-k model of radiative transfer in the near-infrared windows of Venus [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008, 109:1118-1135.
- [4] SEIJI K, THOMAS P. The k-distribution method and correlated-k approximation for a shortwave radiative transfer model [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1999, 62: 109-121.
- [5] WEST R, GOODY R. The correlated-k method and related methods for broadband radiation calculations [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111:1672-1673.
- [6] HASEKAMP O P, BUTZ A. Efficient calculation of intensity and polarization spectra in vertically inhomogeneous scattering and absorbing atmospheres [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113:D20309.
- [7] CALIOT C, LE MAOULT Y. Remote sensing of high temperature H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CO mixture with a correlated k-distribution fictitious gas method and the single-mixture gas assumption [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2006, 102:304-315.
- [8] 石广玉. 大气辐射学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
SHI G Y. *Atmospheric Radiation* [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [9] 张华. 非均匀路径相关 K 分布方法的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 1999.  
ZHANG H. *The study on correlated K-distribution for inhomogeneous atmosphere* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 1999. (in Chinese)
- [10] 尹雪梅, 刘林华. 气体宽带 k 分布模型及其在远程探测中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3):420-423.  
YIN X M, LIU L H. Wide band k distribution model for gas absorption and its application in long-range sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3):420-423. (in Chinese)
- [11] 尹雪梅, 刘林华. 水蒸气有效带宽计算的宽带 k 分布模型 [J]. 工程热物理论, 2008, 29(5): 868-870.  
YIN X M, LIU L H. Wide band k distribution model for equivalent line width of water vapor [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(5):868-870. (in Chinese)
- [12] 周建波, 魏合理, 陈秀红, 等. 相关 K 分布法在水汽强吸收带计算中的应用 [J]. 激光技术, 2009, 33(2):176-179.  
ZHOU J B, WEI H L, CHEN X H, *et al.*. Application of the CKD method in the strong water vapor absorption bands [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(2): 176-179. (in Chinese)
- [13] 周建波, 魏合理, 陈秀红, 等. 用 K 分布法计算大气吸收的进展 [J]. 大气与环境光学学报, 2008,

- 3(2):92-100.
- ZHOU J B, WEI H L, CHEN X H, *et al.*. Progress of calculating the atmospheric absorption by K-distribution method [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(2):92-100. (in Chinese)
- [14] 尹宏. 提高K分布法计算遥感通道透过率精度的方法 [J]. *应用气象学报*, 2005, 16(6):811-819.
- YIN H. Improvement of K-distribution precision for calculating the transmission of satellite remote sensing channel [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(6):811-819. (in Chinese)
- [15] MICHAEL R H, GLEN P P. *Passive ranging using atmospheric oxygen absorption spectra air force institute of technology* [D]. Wright-Patterson Air Force Base, 2006.
- [16] ANTHONY VINCENT R. *Passive ranging of dynamic rocket plumes using infrared and visible oxygen attenuation* [D]. Air Force Institute of Technology (AU), 2011.
- [17] 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.
- YAN Z Q, LIU B Q, HUA W SH, *et al.*. Short-range experiment of passive ranging by oxygen absorption [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2744-2750. (in Chinese)
- [18] YAN Z Q, LIU B Q, HUA W SH. Theoretical analysis of the effect of meteorologic factors on passive ranging technology based on oxygen absorption spectrum [J]. *Optik*, 2013, 124: 6450-6455.
- [19] 闫宗群,刘秉琦,华文深,等. 氧气吸收被动测距技术中的折射吸收误差 [J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0901002.
- YAN Z Q, LIU B Q, HUA W SH, *et al.*. The refraction absorption error of passive ranging technology by oxygen absorption [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0901002. (in Chinese)
- [20] 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.
- SUN G, WENG N Q, XIAO L M, *et al.*. Profile and character of atmospheric temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(5): 592-596. (in Chinese)
- [21] 王飞. 实时激光三维成像焦平面阵列研究进展 [J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 297-305.
- WANG F. Research progress in focal plane array for real-time laser three dimensional imaging [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 297-305. (in Chinese)
- [22] 屈恒阔,张清源,阮友田. 扫描成像跟踪激光雷达 [J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 242-247.
- QU H K, ZH Q Y, RUAN Y T. Laser radar based on scanning image tracking [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 242-247. (in Chinese)

## 作者简介:



闫宗群(1986—),男,河南获嘉人,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,河北衡水人,教授,博士生导师,主要从事光电对抗方面的研究. E-mail: whelmmail@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)