

基于大气氧光谱吸收特性的单目单波段被动测距*

安永泉^{1)†} 李晋华¹⁾ 王志斌¹⁾ 王召巴²⁾³⁾

1) (中北大学, 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 太原 030051)

2) (中北大学, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

3) (中北大学, 电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

(2012年12月14日收到; 2013年2月6日收到修改稿)

根据目标红外辐射在大气中传输衰减的特性探测传感器与目标的距离, 隐身无源, 难于被敌方探测, 发展了一种基于大气氧组分光谱吸收特性的单目单波段被动测距方法. 引入视线路径的概念, 将氧物性分布场离散化, 寻找辐射积分路径; 利用离散传递法基本思想, 得到目标窄带辐射强度分布. 基于氧分子吸收发射谱独立、吸收系数恰当, 饱和可测范围大等特性, 分析氧吸收波段内谐振频带和远谐振频带辐射强度谱线分布的相对关系, 得到其与积分路径(即距离)的关联. 采用分辨率为 0.75 nm 半高宽的窄带高分辨率光谱仪, 实地校准氧物性分布场, 实现了测距实验范围 75—200 m, 模型测算相对误差最大为 7.56% 的样机.

关键词: 被动测距, 单目测距, 单波段测距, 氧光谱

PACS: 42.68.Ay, 92.60.Ta, 42.79.Sz, 42.82.Et

DOI: 10.7498/aps.62.144210

1 引言

目前, 国内外基于红外辐射传输特性的被动测距技术发展迅猛^[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.

目前单目被动测距研究方法主要有: 1) 基于目标辐照度的单目单波段被动测距^[2], 假设目标为具有恒定辐射强度的点源、与系统距离足够远、匀速直线运动、光谱辐照度与距离平方成反比, 约束条件多, 实现困难, 目前仅有仿真结果报道; 2) 基于红外成像的单目被动测距^[3], 克服假设目标匀速直线运动的局限, 但需目标相对系统的初始速度及距离等先验知识, 可实施性较差; 3) 基于目标辐照度的单目双波段被动测距^[4], 利用目标红外辐射在不同大气窗口产生的衰减不同实现对目标的被动测距, 美国 KTAADN 公司和弹道导弹防御机构 1999 年对助推段战区导弹基于此法测距, 可达

20 km, 相对误差 5%—15%, 实时性好, 但在两个大气窗口中, 目标与背景的红外辐射对比度差异大, 测距精度严重受天气影响; 4) 基于红外光谱的单目被动测距^[5-7]. Jeffrey 于 2005 年首先提出, 近几年逐渐兴起, 不断改进发展, 目前美国空军技术研究所 Michael 课题组^[5] 致力于基于红外光谱特征和大气传输模式的被动测距方法研究, 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, 不受天气影响, 测量可靠性高, 并利用该波段, 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%, 原理简单, 实时性好, 测距过程瞬时即可完成, 对所有运动形式都有效. 但其采用的带平均吸收系数处理方式导致推导的距离值误差较大, 需要额外计算目标黑体辐射基线, 导致计算量过大, 并引入了新的误差.

* 国家自然科学基金仪器专项基金(批准号: 61127015)、国家自然科学基金(批准号: 61074184)和国际科技合作项目(批准号: 2012DFA10680)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: anyongquan107@hotmail.com

本文在基于红外光谱的单站被动测距技术的基础上, 提出基于大气氧组分光谱吸收特性的单目单波段被动测距方法; 建立单组分窄谱带辐射计算模型, 测算目标与传感器之间的距离, 不受入射角度和地球弧度的影响, 不需对目标进行连续跟踪和多次采样; 测量时间仅取决于模型计算速度, 可瞬时完成; 其中介质分层离散的思想可以使地域和天气造成的测距误差降到最低。

2 大气介质的分层离散

利用瞬间冻结的思想, 给出传感器与目标之间的大气介质, 如图 1(a) 所示. 探测光学系统包括光学望远镜和窄带光谱仪, 具有固定的探测孔径形状和大小. 以光学孔径中心为三维对称的中心点, 选取包含目标的、尺寸为 $DX \times DY \times DZ$ 的长方体大气介质. 其内氧分子温度、密度和压力分布分别为 $T(x, y, z)$, $\rho(x, y, z)$ 和 $P(x, y, z)$. 介质与环境的界面是镜反射半透明界面. 对于在三维空间内任意连续分布氧分子, 难以直接求解辐射路径。

根据以全球经纬度分界的标准大气廓线模型, 得到氧分子密度与海拔高度的关系, 结合当地当时的气象信息, 把三维大气介质按照海拔高度离散为 S 层, 每层厚度为 10—100 m (实地实时调整校准), 如图 1(b) 所示. 图中坐标轴 Z 代表海拔方向, X, Y 坐标确定的平面为正射投影当地水平面. 沿光学探测孔径中心方向取截面, 如图 1(b)。

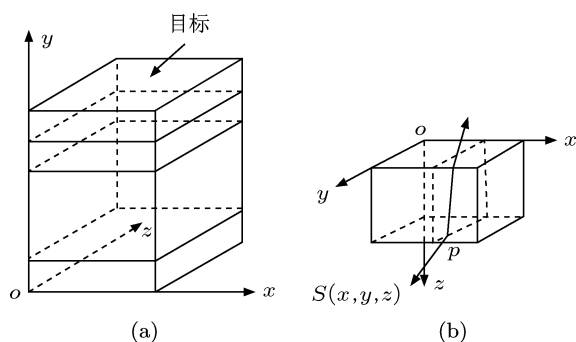


图 1 介质离散过程示意图

当层分辨率较高时, 认为层内的物性 (密度、温度、压力、折射率) 各向均匀; 辐射能在层之间的界面传递时, 只考虑它的折射或全反射, 忽略散射。

介质离散将对光线穿过三维大气的分析转化为光线依次穿过一系列具有不同密度的介质单元的分析; 同时将辐射传递方程在微元体半球空间的热辐射求解简化为垂直于每个边界层面元的均匀谱带辐射强度的求解 [8]。

3 单组分窄谱带辐射计算模型 (MN-RCM) 的建立

3.1 视线路径

采用蒙特卡罗迹法与几何光线追迹改进组合模型计算视线路径 (LOS, line of sight)。

3.1.1 蒙特卡罗光线踪迹

令 $s(z)$ 为每个层单元中的光线方程, 是 z 的函数, 三维 (x, y, z) 层中的光线方程, 通过层离散和取截面变成了沿 z 方向的一维方程, 如图 2 所示。

$$s(z) = \int_0^z (1 + K\rho(z)) dz \left[K^2(\rho^2 - \rho_0^2 \sin^2(\theta_0)) + 2K(\rho - \rho_0 \sin^2(\theta_0)) + (1 - \sin^2(\theta_0)) \right]^{-1/2}, \quad (1)$$

其中 $K = K_{GD}/\rho_0$, K_{GD} 是 G-D 常数, ρ_0 是所分析大气介质外的平均氧分子密度。

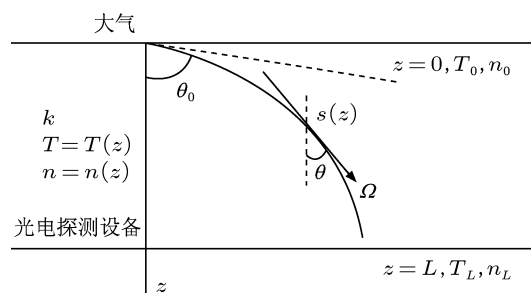


图 2 光线沿 z 方向传递轨迹

3.1.2 几何光线追迹

如图 3, 设光线初始入射角为 θ_0 , 通过节点 1-1 后折射角为 θ_1 , 第 k 次 (k 定义为光线 Z 向折变次数) 折射时对应折射角为 θ_k . 令 ΔX_k 表示光线单次平移量 (偏差量), 每发生一次折射就记录一个 ΔX_k , 并不断累加, 通过这种方法来追击光线记录它走过的路径 [9], 直到追击的光线射出大气介质范围到达入瞳处参考面。

追击模型的各参量的关系公式为

$$\begin{cases} \Delta X_k = d \tan(\theta_k), \\ (1 + \rho_{k+1,l}) \sin(\theta_k) = (1 + \rho_{k,l}) \sin(\theta_{k-1}), \\ (l, k = 1, 2, \dots) \\ OPL_k = (1 + \rho_{k+1,l})d / \cos(\theta_k), \\ (l, k = 1, 2, \dots) \end{cases} \quad (2)$$

这样就得到了计算偏移量 $\sum \Delta x_k$, 用于对最终距离结果进行修正.

对于图 3 所示的一维介质, 得到光线方程 $x = x(z)$, 射线轨迹上从点 $(z_{i-1}, x(z_{i-1}))$ 到达另一点 $(z_i, x(z_i))$ 的光线行程长度为

$$\begin{aligned} \Delta s = \int_{z_{i-1}}^{z_i} (1 + k\rho(z_i)) dz \{ & k^2 [\rho^2(z_i) \\ & - \rho^2(z_{i-1}) \sin^2(\theta_{i-1})] \\ & + 2k [\rho(z_i) - \rho(z_{i-1}) \sin^2(\theta_{i-1})] \\ & + (1 - \sin^2(\theta_{i-1})) \}^{-1/2}, \end{aligned} \quad (3)$$

θ_i 为辐射轨迹上点 $(z_i, x(z_i))$ 处的切向极角, 其边界条件为 $x(0) = 0, x'(0) = \tan \theta_0$.

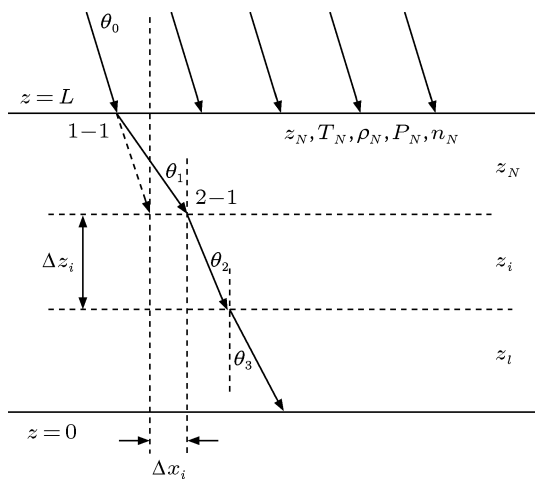


图 3 层介质光线传输模型示意图

3.2 红外谱带辐射强度

辐射强度对角度的依赖性使辐射问题复杂化的关键因素^[10]. 选定 LOS 为大气介质计算时的辐射积分路径, 采用离散传递法的基本思想. 离散传递法是沿着某根特征射线求解辐射传递方程. 从每个边界网格面元的节点向半球空间引出 $N_l (N_l = N\theta \times N\Psi)$ 条特征射线, 每条特征线都由引出点经过半透明介质到达另一边界, 如图 4 所示.

设由界面 1 发射的一根特征射线 $s(z)$ 进入单元网格控制体 (i, j) 时的谱带辐射强度为 $I_{i,j}$, 离开该控制体的谱带辐射强度为 $I_{i,j+1}$.

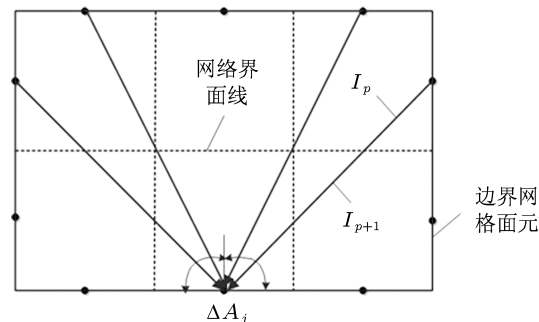


图 4 离散传递的计算模型

沿射线在控制体 (i, j) 上积分辐射传递方程直至最终到达界面 2, 忽略散射, 射线穿过控制体时谱带辐射强度的变化为

$$\begin{aligned} I_{i,j+1} = I_{i,j} \exp(-\kappa_k \delta_{s(j)}) + \frac{B_{k,T_{i,j}} \sigma(T_{i,j} + \delta_0) T_{i,j}^4}{\pi} \\ \times [1 - \exp(-\kappa_k \delta_{s(j)})], \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\delta_{s(j)}$ 为特征射线在控制体 (i, j) 中的行程, $T_{i,j}$ 为控制体 (i, j) 的温度; $B_{k,T_{i,j}}$ 为 $T_{i,j}$ 温度下 $\Delta \lambda_k$ 谱带内黑体辐射能占总辐射能的份额.

$$\begin{aligned} B_{k,T_{i,j}} &= \frac{\int_{\Delta \lambda_k} E_{b\lambda}(T_{i,j}) d\lambda}{\int_0^\infty E_{b\lambda}(T_{i,j}) d\lambda} \\ &= \frac{\int_{\Delta \lambda_k} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp[c_2/(\lambda T_{i,j})] - 1} d\lambda}{\int_0^\infty \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp[c_2/(\lambda T_{i,j})] - 1} d\lambda}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\Delta \lambda_k$ 为氧吸收发射谱波段 (近红外 (NIR) 段 12875—13360 cm^{-1} ; 可见光 (Vis) 段 14527—14900 cm^{-1}).

递推模型中还有一个至关重要的系数 κ_k (吸收系数) 需要确定.

3.3 氧的吸收发射系数

气体辐射的吸收和发射是大量原子分子能级间跃迁的结果, 其光谱特征包含在吸收系数 κ_k 和发射系数 J_ν^e 当中. 根据空气控制温度 T (跃迁过程的激发温度), 大气各组分的分子辐射机制 (原子束缚 - 束缚跃迁, 束缚 - 自由跃迁, 离子自由 - 自由跃

迁, 分子的电子谱带系跃迁), 当能量状态 E'' 改变到 E' (设 $E' < E''$), 将发射电磁辐射.

吸收系数 $\kappa_\nu = \sum_l N_l \delta_{\nu l}$, l 为吸收能级, $\delta_{\nu l}$ 是吸收截面 (cm^2), N_l 为 l 能级数密度 ($1/\text{cm}^3$) 对于氧组分的吸收系数.

发射系数 (体积发射源强度) 为 $\kappa_\kappa = \sum_m \kappa_\kappa^m$, s, m 代表某一辐射跃迁机理, 跃迁过程的激发温度为 T .

对于空气中氧分子发射的光谱, 比较强的谱带系是 Shumann-Runge 系.

分子振 - 转谱线吸收系数:

$$k(\nu) = \frac{8\pi^3 \bar{\nu} N_{J''} R_e^2(\bar{r}_{\nu', \nu''}) q(\nu', \nu'') s_{J'' \Lambda'}^{J' \Lambda'} F(\nu)}{3hc (2J'' + 1)}, \quad (6)$$

式中: $|R_e(\bar{r}_{\nu', \nu''})|^2$ 表示电子跃迁矩阵元, $q(\nu', \nu'')$ 为 Franck-Condon 因子, $s_{J'' \Lambda'}^{J' \Lambda'}$ 是线性强度因子, 其中包括高能态的转动简并度, $N_{J''}$ 为分子在低能态 J'' 的数密度 (cm^{-3}), $\bar{\nu}$ 是中心频率的波数.

3.4 MNRCM 模型结果

联立方程 (2)—(6), 得到 MNRCM. MNRCM 模型计算可得到不同光源的氧辐射强度谱.

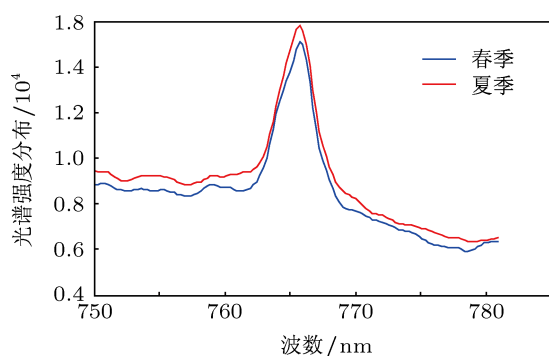


图 5 不同季节卤素灯光源的氧光谱辐射 (来自模型计算)

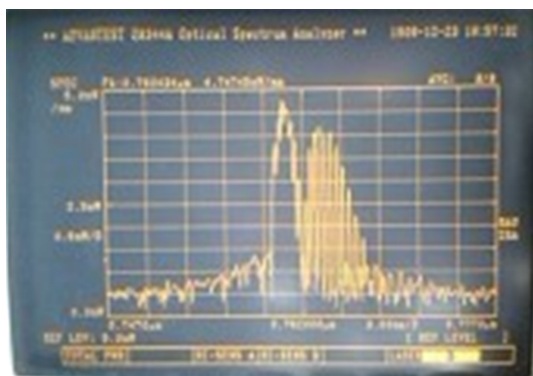


图 6 夏季卤素灯光源的氧光谱辐射 (来自光谱仪)

图 5 为不同季节美国标准大气模型输入条件下 MNRCM 模型计算得到的氧光谱辐射强度分布. 考虑了氧吸收发射谱段 NIR 段. 沿 x 轴方向分布. 图 6 为光谱仪获取的, 夏季卤素灯光源的氧光谱辐射.

4 单波段辐射特性被动测距

通过 MNRCM 得到目标在氧谱带内的辐射强度分布, 氧元素对目标辐射的吸收与辐射计算中采用的积分路径 δ (\approx 距离) 密切相关. 具有一定范围内普适性的测距系统, 必须摆脱对于目标本身的依赖, 考虑氧吸收发射谱段 (NIR 段 $\nu = 12875$ — 13360 cm^{-1} ; Vis 段 $\nu = 14527$ — 14900 cm^{-1}). 假设目标本身没有介质吸收衰减, 其辐射强度分布为 $I_0(\nu, \delta)$, 通过 MNRCM 计算得到实际的辐射强度分布为 $I(\nu, \delta)$, 寻找二者之间的增量 (或负增量) $\Delta I(\nu, \delta)$ 是摆脱原始量 $I_0(\nu, \delta)$ 的约束.

在氧吸收发射谱段选取两个频带: 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 13122 — 13200 cm^{-1} ; Vis 段 14527 — 14566 cm^{-1}) 和远谐振频带 (距离谐振频带较远的频带, 吸收发射作用薄弱, NIR 段 12785 — 12843 cm^{-1} 和 13200 — 13360 cm^{-1} ; Vis 段 14590 — 14900 cm^{-1}). 分析远谐振频带的辐射强度分布, 确定归一化拟合规律, 拟合得到氧吸收发射全谱带的基线, 研究谐振谱带内辐射强度分布与基线的差值, 建立其与距离的关系.

对于 (4) 式, 令 $\Delta\lambda_{k1}$, $\Delta\lambda_{k2}$ 和 $\Delta\lambda_{k3}$ 分别等于 0.757 — 0.762 , 0.782 — 0.779 和 0.748 — $0.757 \mu\text{m}$, 得到不同的 $B_{k, T_i}(1)$, $B_{k, T_i}(2)$ 和 $B_{k, T_i}(3)$, 分别得到 Δ_{1i} , Δ_{2i} 和 Δ_{3i} .

$$\Delta_{ji} = B_{k, T_i}(j) \sigma (1 + k\rho_i)^2 T_i^4. \quad (7)$$

根据 (4) 式, 计算比值 $\gamma = \frac{I_{1i}}{I_{2i} + I_{3i}}$, 其中

$$I_{ji} = I_{j(i-1)} \exp(-\kappa_1(\nu) \delta) + \Delta_{ji} [1 - \exp(-\kappa_1(\nu) \delta)] \quad j = 1, 2, 3. \quad (8)$$

对 (4) 式两边取对数, 可得

$$\ln \gamma = \ln I_{1i} - \ln (I_{2i} + I_{3i}). \quad (9)$$

积分路径, 即距离近似为

$$\begin{cases} \delta \approx \frac{\ln \gamma}{(\kappa_{k2} + \kappa_{k3} - \kappa_{k1})}, \\ \hat{\delta} \approx di - \frac{d}{2} \quad i = 1, 2, 3, \dots, \end{cases} \quad (10)$$

式中 δ 和 $\hat{\delta}$ 为距离, γ 为谐振频带与远谐振频带的平均辐射强度比, κ_{k1} 为氧光谱 NIR 段的谐振频带的吸收系数, κ_{k2} 和 κ_{k3} 为氧光谱 NIR 段两个远谐振频带的吸收系数, d 为层分辨率, i 为迭代计算的次数, 从 1 取, 终止条件为找到 $\min|\delta - \hat{\delta}|$.

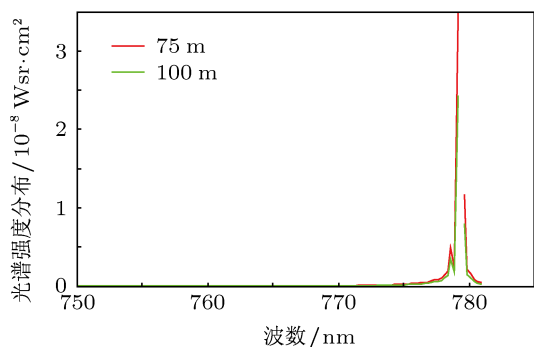


图 7 归一化后卤素灯光源的辐射强度分布

根据 MNRCM 的计算结果, 联立方程 (7)—(10) 式, 得到距离计算的工程应用公式, 计算精度同时受到当地气象环境和时段的影响.

采用卤素灯光源, 实际距离 75, 100, 125, 150,

175 和 200 m, 夏季环境, 正午 12:00 整, 山西太原北郊区上兰村. 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 7 所示.

根据远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 8 所示.

模型得到的结果, 谐振频带 NIR 段的平均辐射强度为 \bar{I}_{NIR} , 远谐振频带 NIR 段的平均辐射强度为 \bar{I}'_{NIR} , 根据 MNRCM 算法模型, 数值迭代计算得到辐射积分路径长度 δ_s (距离) 为 d , 光源距光谱探测仪实际距离为 d_0 . 对每个距离基准值测量 10 次, 取最佳值, 表 1 给出实验结果.

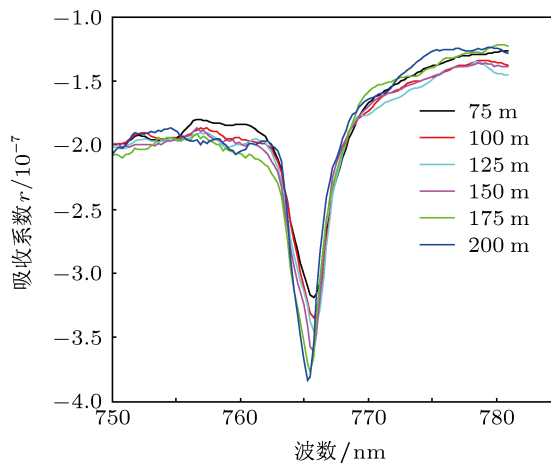


图 8 不同距离下氧的吸收

表 1 卤素灯光源单目单波段被动测距实验结果

d_0/m	75	100	125	150	175	200
\bar{I}_{NIR}	0.9885×10^{-9}	1.007×10^{-9}	1.026×10^{-9}	1.042×10^{-9}	1.081×10^{-9}	1.147×10^{-9}
\bar{I}'_{NIR}	3.153×10^{-9}	3.372×10^{-9}	3.537×10^{-9}	3.762×10^{-9}	4.072×10^{-9}	4.395×10^{-9}
d/m	70.23	107.21	121.98	161.34	182.65	211.88
误差/%	6.36	7.21	2.42	7.56	4.37	5.94

氧吸收谱段还有一个 690 nm 的频段可以对照验证分析.

取不同季节(夏, 秋两季)、不同时段(早 6:00, 正午 12:00, 下午 16:00), 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) 进行实验验证, 最大相对误差不超过 7.56%. 误差主要来源于三个方面: 模型本身的计算精度, 实验测试条件的非惟一性和大气中氧浓度分布的不稳定性. 卤素灯光源通过反射杯聚焦、光纤收集、人工调节和对准, 各次实验所得到

的光谱分布有偏差, 目前解决方法是对同一距离得到若干组数据取平均; 结果光谱中掺杂反射杯等非光源实验设备的光谱; 光谱仪光栅衍射效率与光源波长的相关性亦会导致一定的误差.

5 结论

建立 MNRCM, 约束条件为标准大气模型和实地气象数据, 输入信号为目标本身, 输出信号为目标在氧吸收谱带的辐射强度分布. 输出信号取决于

MNRCM 递推计算的积分路径 (距离) 和目标本身. 在氧吸收谱段选取两个频带: 谐振和远谐振频带. 根据远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. 这种测距技术不受入射角度和地球弧度的影响; 需对目标进行连续跟踪和多次采

样, 测量时间仅取决于模型计算速度; 受地域和天气影响较小.

本文研究为我国对空探测及武器预警中的实时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.

-
- [1] Kalyuzhny N M, Alexandrov S N, Asanov E E 2002 *Telecommun. Radio Engin.* **58** 138
- [2] Edward R, Dowski J R, Thomas W C 1994 *Appl. Opt.* **33** 6792
- [3] Huang S K, Zhang T L 2005 *Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering: Image Analysis Techniques* Wuhan China, 31 October–2 November, 2005 v6044
- [4] Ki-Man Kim, In-Sic Yang 2002 *IEEE J. Oceanic Engin.* **27** 638
- [5] Michael R H, Glen P P 2007 *Ph. D. Dissertation* (Air Force Institute of Technology)
- [6] Lü X J, Weng C S, Li N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234205 (in Chinese) [吕晓静, 翁春生, 李宁 2012 物理学报 **61** 234205]
- [7] Wu J F, Li F M 2007 *Infrared and Laser Engineering* **36** 560 (in Chinese) [吴健飞, 李范鸣 2007 红外与激光工程 **36** 560]
- [8] Huang Y, Wang J 2009 *J. Infrared Millim. Waves* **28** 38 (in Chinese) [黄勇, 王浚 2009 红外与毫米波学报 **28** 38]
- [9] Zheng W W, Xu J P, Wang L Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5098 (in Chinese) [郑巍巍, 许静平, 王丽琴 2009 物理学报 **58** 5098]
- [10] Chen X Y, Chou P L 2001 *Chin. Phys.* **9** 781

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

An Yong-Quan^{1)†} Li Jin-Hua¹⁾ Wang Zhi-Bin¹⁾ Wang Zhao-Ba²⁾³⁾

1) (*Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, North University of China,*

Taiyuan 030051, China)

2) (*Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

3) (*Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

(Received 14 December 2012; revised manuscript received 6 February 2013)

Abstract

Passive ranging has received much attention because of its concealment. The distance between sensor and the object is measured by the infrared radiation attenuation in atmosphere. A mono-station single-band ranging method based on spectra transmission characteristics of oxygen is developed. The concept of light of sight (LOS) is introduced. The ray tracing model is built. With the method of discrete transfer and the discretization of physical properties distribution field of oxygen, the radiation strength in oxygen band of the target is calculated by the LOS along the seeker detectors. The radiation strengths in resonant frequency band and non-resonant frequency band are analyzed. The distance is achieved by their relation. High-resolution spectrometer is adopted to build experiment platform. Real-time dynamic ranging can be implemented by field calibration. The present experimental range is 75–200 m. The maximal relative error is 7.56%.

Keywords: passive ranging, mono-station ranging, single-band ranging, oxygen absorption spectrum

PACS: 42.68.Ay, 92.60.Ta, 42.79.Sz, 42.82.Et

DOI: 10.7498/aps.62.144210

* Project supported by the Special Fund for Instrument of Natural Science Foundation of China (Grant No. 61127015), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61074184), and the Cooperation Project of International Science and Technology, China (Grant No. 2012DFA10680).

† Corresponding author. E-mail: anyongquan107@hotmail.com