

文章编号:1001-9014(2004)01-0077-04

地面目标的红外被动测距研究

路远, 凌永顺, 吴汉平, 李晓霞
(电子工程学院科研部202室, 合肥 安徽 230037)

摘要:讨论了地面目标与背景红外辐射在大气中的传输情况, 基于红外探测系统测出的目标与背景的辐照度差, 提出了一种新的被动测距方法. 利用该方法, 得到了测距公式和测距的距离分辨率公式. 计算了不同天气情况下, 目标与背景的辐照度差与距离以及距离分辨率与距离之间的关系. 计算结果表明, 该方法可用于对地面目标的被动测距.

关键词:地面目标; 红外辐射; 辐照度差; 被动测距
中图分类号: TN219 **文献标识码:** A

STUDY ON PASSIVE DISTANCE MEASUREMENT OF GROUND OBJECTS BY INFRARED RADIATION

LU Yuan, LING Yong-Shun, WU Han-Ping, LI Xiao-Xia
(Electronic Engineering Institute, 202 Room, Hefei 230037, China)

Abstract: The infrared transmission of ground object and its background were discussed. A new passive distance measuring method was deduced based on the irradiance errors between the ground object and its background detected. By the above-mentioned new method, the formula of distance measuring and the formula of distance resolving power were formed. The relationship between the irradiance errors and the distance, and the relationship between the distances resolving power and the distance under different weather conditions were calculated. The calculation result has proved that the method can be applied to the distance measurement of ground objects.

Key words: ground objects; infrared radiation; irradiance error; passive distance measurement

引言

被动探测系统由于系统本身不辐射电磁波, 不容易获取目标的距离信息. 传统的被动定位系统多采用两站或多站交叉定位, 定位所需探测系统较多. 本文旨在讨论空中平台的被动红外系统如何实现单站获取地面目标的距离信息.

1 地面目标与背景的红外辐射及其大气衰减

通常情况下, 地面目标和背景的红外辐射由两部分组成, 即自身辐射和反射环境的辐射. 目标与背景的组成材料不同, 热性能、发射率、温度不同, 造成两者红外辐射的差异, 这是红外系统探测目标的基础.

一般情况下, 地面静止目标如建筑物、桥梁等基本处于常温状态, 由普朗克公式可以知道, 常温下的物体在中远红外有较大的辐射能量. 在军事上比较有应用价值的波段是 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的大气窗口, 对地面目标进行成像探测的红外热像仪基本上工作在这个波段.

目标和背景的红外辐射在大气中传输时受到衰减的原因有二^[1]: 一是大气中某些气体成分的吸收, 二是大气分子和悬浮微粒的散射.

产生大气吸收的主要原因是大气中所含的一些吸收性的分子如 H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 CO 、 CH_4 、 N_2O 等, 它们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, 当遇到具有相同频率的红外辐射时, 能产生共振吸收. 其中以 H_2O 、 CO_2 、 O_3 引起的吸收起主要作用, 它们均具有多个强烈的吸收带, 且在大气

中具有相当高的浓度。

大气对辐射引起散射衰减的原因是大气中含有散射元,即大气中所含的气体分子和悬浮的微粒.悬浮在大气中的微粒系统称为气溶胶,气溶胶对大气的散射衰减影响很大,根据散射体粒子的半径 r 与在大气中传播波长 λ 之间的关系,散射一般可以分为以下 3 个类型:当 $r \gg \lambda$ 时,这时的散射为无选择性散射;当 $r \approx \lambda$ 时,这时的散射称为 Mie 散射; $r \ll \lambda$ 时,这时的散射为瑞利散射.其中第 1 和第 3 种情况可以看成 Mie 散射的特例.散射衰减的情况可由 Mie 公式计算得到.

多数情况下,红外辐射的传输衰减是由散射和吸收共同造成的,大气对红外辐射的衰减能力可使用大气消光系数 μ 来描述,由吸收和散射造成的大气的透射比为^[3]:

$$\tau(R) = e^{-\mu R}. \quad (1)$$

式(1)中, R ——红外辐射传播的距离.

大气的消光系数与波长有关,与大气的气象条件密切相关,天气的变化如阴、晴、雾、雨、雪、霾、尘等都对消光系数有很大的影响^[4,5].

2 对地面点目标的被动测距

当目标距离红外系统较远时,目标的像不能充满探测器单元,此时目标可视为点目标.设在某一时刻,目标距离红外系统 R_1 ,其在红外系统入瞳上产生的辐照度为^[2]:

$$E_i = \frac{I_i}{R_1^2} \tau(R_1). \quad (2)$$

式(2)中, I_i 为目标的辐射强度;由于目标没有充满瞬时视场,因此背景辐射也能到达探测器.为简单起见,假设背景的红外辐射均匀,此时背景辐射在红外系统入瞳上的辐照度为^[2]:

$$E_b = L_b(\omega - \omega_i) \tau(R_1). \quad (3)$$

式(3)中 L_b 为背景的辐射亮度; ω 为红外系统的瞬时立体视场角; ω_i 为目标对光学系统中心所张的立体角.目标和背景在红外系统入瞳上总的辐照度为:

$$E = E_i + E_b = \left[\frac{I_i}{R_1^2} + L_b(\omega - \omega_i) \right] \tau(R_1). \quad (4)$$

当没有目标,背景全充满探测器单元时,红外系统入瞳上的辐照度为:

$$E' = L_b \omega \tau(R_1). \quad (5)$$

由此,目标与背景在红外系统入瞳上形成的辐照度差为:

$$\begin{aligned} \Delta E_1 &= E - E' = \left(\frac{I_i}{R_1^2} - L_b \omega_i \right) \tau(R_1) \\ &= \frac{I_i - L_b A_i}{R_1^2} \tau(R_1). \end{aligned} \quad (6)$$

设经过一段时间以后,红外系统到目标距离为 R_2 ,设在此短时间内,目标与背景的辐射及大气条件不发生变化,这时目标与背景在红外系统入瞳上形成的辐照度差为:

$$\Delta E_2 = \frac{I_i - L_b A_i}{R_2^2} \tau(R_2). \quad (7)$$

式(6)除以式(7),并把式(1)代入,可得:

$$\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2} = \frac{R_2^2}{R_1^2} \cdot \frac{\tau(R_1)}{\tau(R_2)} = \frac{R_2^2}{R_1^2} e^{-\mu(R_1 - R_2)}. \quad (8)$$

令 $R_1 - R_2 = \Delta R$,

于是有:

$$\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2} = \left(\frac{R_2}{R_2 + \Delta R} \right)^2 e^{-\mu \Delta R}. \quad (9)$$

解式(9)方程,可得目标与红外系统之间的距离:

$$R_2 = \frac{1}{\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2} - e^{-\mu \Delta R}} \left(-\Delta R \frac{\Delta E_1}{\Delta E_2} \pm \Delta R \sqrt{e^{-\mu \Delta R} \frac{\Delta E_1}{\Delta E_2}} \right). \quad (10)$$

在式(10)中,大气对红外的消光系数 μ 可以实际测得,也可根据大气气象条件计算得到.典型天气在 8~12 μm 波段的消光系数如表 1^[1]所示. ΔR 反应了目标到探测系统径向距离的变化,可由红外系统载体根据平台的运动情况如速度、时间等得到,根据系统 2 次测到的目标与背景的辐照度差,即可解算出目标与探测系统的距离.在用本方法测距时, ΔR 必须达到系统所能分辨的最小距离.

表 1 8~12 μm 波段上的消光系数

Table 1 The distinction coefficient at 8~12 μm wave band

气象条件	晴朗干燥	晴朗	薄雾	轻雾	中雾
消光系数(/km)	0.05	0.08	0.105	1.9	3.5
气象条件	小雨	小雪	中雨	大雨	大雪
消光系数(/km)	0.36	0.51	0.69	1.39	9.2

3 距离分辨率

在此定义距离分辨率为系统的最小可分辨距离.在式(9)中,以 ΔR 为未知数解方程,

$$\Delta R = \frac{2}{\mu} \text{lambertw} \left(\pm \frac{1}{2} \mu R_2 \left(\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2} \right)^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{\mu R_2}{2}} \right) + R_2. \quad (11)$$

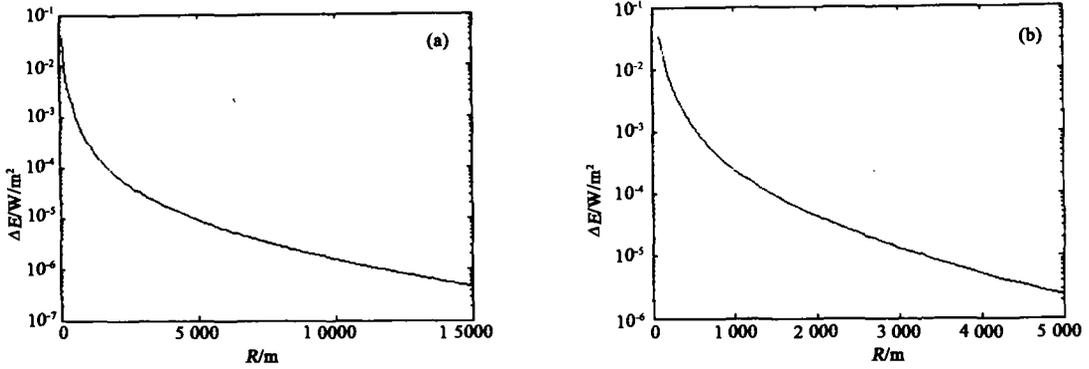


图 1 辐照度差与传输距离的关系 (a) $\mu = 0.08$ (b) $\mu = 0.36$
 Fig. 1 The relationship between the irradiance error and the transmission distance (a) $\mu = 0.08$ (b) $\mu = 0.36$

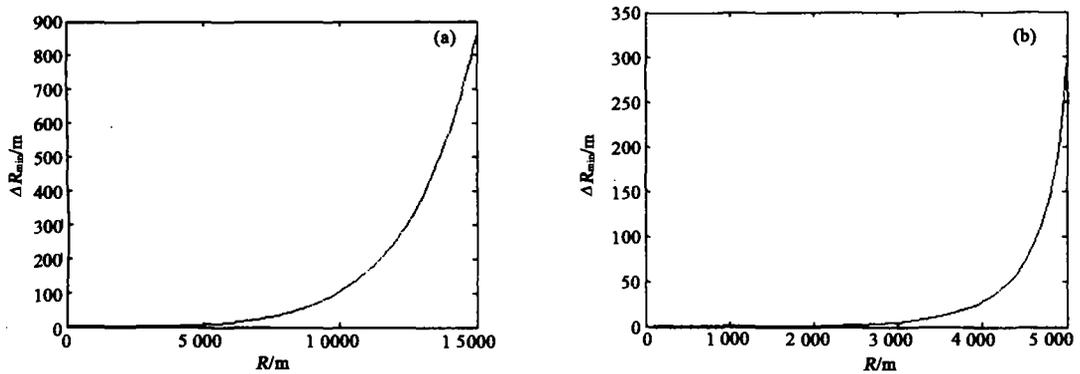


图 2 距离分辨率与目标到系统距离的关系 (a) $\mu = 0.08$ (b) $\mu = 0.36$
 Fig. 2 The relationship between distance resolving power and the distance (a) $\mu = 0.08$ (b) $\mu = 0.36$

式(11)中, $\text{lambertw}(x)$ 为兰伯特函数^[6], 是 $w \times e^w = x$ 一类方程的解.

当 ΔR 取最小值时, 即可得到系统的最小可分辨距离. 式中可以看出, 距离分辨率由以下几个因素决定: 系统到探测目标的距离 R , 大气的消光系数 μ 以及 $\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2}$. 由式(6)可以看出, ΔE 由目标和背景辐射特性及其在大气中传输情况决定, 而系统能检测的最小 ΔE 由系统的灵敏度决定. 设系统能检测到辐照度差为系统的噪声等效辐照度 $NEFD$, 则有

$$\Delta R_{\min} = \frac{2}{\mu} \text{lambertw}\left(\pm \frac{1}{2} \mu R_2 \left(\frac{\Delta E_2 - NEFD}{\Delta E_2}\right)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{\mu R_2}{2}}\right) + R_2 \quad (12)$$

4 实例计算

设目标的温度为 320K, 目标面积为 20m^2 , 具有灰体特性, 发射率为 0.9, 背景的温度为 300K, 具有灰体特性, 发射率为 0.9, 红外探测系统工作在 $8 \sim 14\mu\text{m}$, 其噪声等效辐照度 $NEFD$ 为 $2.0 \times 10^{-12} \text{W/}$

cm^2 . 计算得到系统所得到的目标与背景所产生的辐照度差与辐射传输距离的关系如图 1 所示, 得到采用本方法测距所得到的距离分辨率与目标到探测系统的距离关系如图 2 所示. 图 1(a)、图 2(a) 对应的天气状况为晴朗, 图 1(b)、图 2(b) 对应的天气状况为小雨, 图 2(a) 中, 大气消光系数小, 红外辐射的大气透过率较高, 红外探测系统探测距离较远, 在一定的距离范围内, 距离分辨率较高; 图 2(b) 中, 天气状况较差, 红外辐射的大气透过率低, 探测距离近, 距离分辨率低. 由图 2 可以看出, 距离分辨率与目标和背景特性密切相关, 对大气状况有较大的依赖, 在良好的天气情况下, 系统探测距离远, 且有良好的距离分辨率.

5 讨论

本文从理论上研究了红外系统单站对地面红外目标的被动测距, 并选择了 2 种典型的天气情况进行了计算, 从计算结果来看, 该方法是可行的, 且在较近距离时有较好的距离分辨率. 该方法的缺点是

测距受天气状况的影响较大,大气的消光系数随天气情况变化很大,在使用该方法测距时,必须获得精确的大气消光系数值,该值可以实际测得或由 LOWTRAN、HITRAN 等软件根据大气的实际参数计算而得. 本文为简化推导,在整个波段上使用了同一种消光系数,实际在不同的波长上,消光系数也有相当差别,在实际应用中,必须考虑这些因素. 具体应用时可将大波段细分成多个小波段以提高测距的精确度. 本方法在进行实际测距应用时有待进一步试验验证.

REFERENCES

- [1] Sheffer A D, *GTVISIT Analyst Manual*[R], Atlanta: Georgia Tech Research Institute, Electro-Optics Laboratory, (1991)
- [2] LI Run-Shun, YUAN Xiang-Yan, FAN Zhi-Gang, *et al.* Operating range prediction of infrared imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering* (李润顺,袁祥岩,范志刚,等. 红外成像系统作用距离的估算. 红外与激光工程), 2001, 30(1): 1—3
- [3] Van de Hulst H C. *Light Scattering by small Particles* [M]. New York: Dover, 1981
- [4] LU Yan-Qing, WANG Zhang-Ye, DONG Yan-Bing, *et al.* Study on infrared characteristics of city buildings with season changes and the IR images[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*. (陆艳青,王章野,董雁冰,城市建筑物红外特性四季变化及其成像研究. 红外与毫米波学报), 2002, 21(5): 377—381
- [5] ZHAO Zhen-Wei, WU Zhen-Sen, SHEN Guang-De, *et al.* Attenuation due to fog for 10.6 μm wavelength[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, (赵振维,吴振森,沈广德. 雾对 10.6 μm 红外辐射的衰减特性研究. 红外与毫米波学报), 2002, 21(4): 95—98
- [6] Jeffrey D J, Knuth D E. On the lambert W function[J]. *Advances in computational mathematics*, 1996, 5: 329—359