

文章编号 1004-924X(2012)12-2680-06

红外三色被动测距

路 远^{1,2*}, 冯云松^{1,2}, 凌永顺^{1,2}, 乔 亚^{1,2}

- (1. 电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;
2. 电子工程学院 安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 由于目标的红外辐射在大气中传输时其不同波长的辐射强度比值会随着传输距离的改变而发生变化, 故波长的辐射强度比包含了目标的距离信息。基于上述原理, 本文研究了利用比色方法依据空中目标的红外辐射对其进行测距的方法。推导了目标辐射强度色比与目标温度、辐射传输距离、大气消光系数之间的关系。在大气消光系数相对固定时, 通过测量不同波长的辐射强度比值对目标进行了测距, 推导出了红外三色比距离方程。根据大气辐射传输衰减计算模型, 选择 8.5、9.0、9.5 μm 3 个波长作为色比波长, 2 km 处 300 K 黑体作为被测目标, 画出了色比测距图。分析显示, 图上作业得到的目标距离和温度与实际目标的距离和温度基本相符。另外, 利用本方法通过一次测量即可获得目标的距离和温度。

关键词: 红外测距; 被动测距; 比色法; 大气衰减

中图分类号: TN976; TN219 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20122012.2680

Infrared three-color passive ranging by colorimetric method

LU Yuan^{1,2*}, FENG Yun-song^{1,2}, LING Yong-shun^{1,2}, QIAO Ya^{1,2}

- (1. *State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;* 2. *Key Laboratory of IR and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China*)

* *Corresponding author, E-mail: luyuanmail@163.com*

Abstract: As the color ratio of radiation intensity of a target at different wavelengths will change along with the change of transmission distance, the color ratio of radiation intensity contains distance information. According the principle mentioned above, this paper proposed a scheme based on colorimetric method to range the target using its own infrared radiation. The relationship between the color ratio of radiation intensity for the target and its temperature, radiation transmission distance, atmosphere attenuation coefficient was deduced. By measuring the color ratio of radiation intensity at different wavelengths, the target was ranged when the atmosphere attenuation was certain and the infrared ranging equations of three-color ratio were deduced. According to a calculation model of radiation atmosphere transmission attenuation, three wavelengths of 8.5, 9.0, 9.5 μm were selected as color-ratio wavelengths, a 300 K blackbody 2 km away was used as a ranging target, and a color-ratio ranging

收稿日期: 2012-09-10; 修订日期: 2012-10-21.

基金项目: 安徽省红外与低温等离子体重点实验室科研基金资助项目 (No. 2010a001004d)

figure was drawn. Analysis shows that the temperature and the distance of the target gotten from the figure are coincident with those of the target. Furthermore, it needs only once measurement to get the distance and temperature of the target by using this method.

Key words: infrared ranging; passive ranging; colorimetric method; atmosphere attenuation

1 引 言

红外被动探测系统本身不辐射电磁波,不容易获取目标的距离信息。但是,红外被动探测具有隐蔽性好,抗干扰能力强等优点,被各国广泛关注并展开相应研究。目前,红外被动测距多采用三角测量方法,如何有效地通过角度值计算出目标距离一直是该方法的焦点^[1-3]。在三角测距法的基础上,还发展出了计时法被动测距^[4]。文献^[5]基于大气衰减特性,研究了对地面目标的红外被动测距,文献^[6-8]研究了基于红外图像的被动测距方法。文献^[9]研究了利用双波段红外系统对空中目标的测距。M. R. Hawks 根据氧分子分布均匀性好的特点,提出利用氧分子吸收带(762 nm)的特征吸收被动测距的方法^[10],J. M. Douglas 对该方法进行了改进,选用 2 μm 附近的特征衰减进行测距^[11]。Piet B. W. Schvering 等人利用双波段红外搜索与跟踪传感器研究红外被动测距技术,研究中综合使用了大气传输模型、目标视表面以及目标运动分析等 3 种方法^[12]。付小宁等人提出了一种基于目标距离比和方向信息的空中小目标的被动测距方法^[13]。

本文讨论了利用目标红外三色信息对空中目标进行单站测距的方法。空中目标如飞机、导弹等在飞行时,会发出一定能量的红外辐射,红外辐射在不同的波长上的大气透过率不同,因而在不同的波长上所得到的目标的红外辐射强度比值也随距离而改变。也就是说红外辐射强度比值包含着目标的距离信息,通过测量目标在 3 个波段上的红外辐射,并施加一定的信号处理手段,可以提取其中的距离信息,从而实现空中目标的被动测距。在此基础上,还可以获得目标的温度、速度等信息,为目标识别提供依据。本方法通过单次测量即可获得目标的距离信息。

2 空中目标红外辐射的传输

当目标红外辐射在地球大气中传输时,与大气成分相互作用会使辐射强度衰减。衰减原因有两个,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。

在多数情况下,衰减是由散射和吸收共同造成的,消光系数与红外辐射波长有很大关系,此时可定义消光系数:

$$\mu(\lambda) = \mu_a(\lambda) + \mu_s(\lambda), \quad (1)$$

式中: $\mu_a(\lambda)$ 和 $\mu_s(\lambda)$ 分别为大气的吸收系数和散射系数。由吸收和散射造成的大气的透射比为:

$$\tau = e^{-\mu(\lambda)R}, \quad (2)$$

式中: R 为辐射通过的距离。大气的消光系数与大气的气象条件密切相关,天气的变化如阴、晴、雾、雨、雪、霾等都对消光系数有很大的影响。

为了便于研究,我们假设大气气象条件在短时间内恒定不变,即大气的消光系数不变,后面的研究以此假设为基础。

3 红外三色测距

设探测系统工作在 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 3个波长上,对应的大气消光系数为 μ_1 、 μ_2 和 μ_3 ,目标的红外辐射强度分别为 I_{λ_1} 、 I_{λ_2} 和 I_{λ_3} ,则探测系统在距目标 R 处在3个波长上接收到的空中目标的红外辐射通量分别为:

$$\phi_{\lambda_1} = \frac{A_d I_{\lambda_1}}{R^2} e^{-\mu_1 R}, \quad (3)$$

$$\phi_{\lambda_2} = \frac{A_d I_{\lambda_2}}{R^2} e^{-\mu_2 R}, \quad (4)$$

$$\phi_{\lambda_3} = \frac{A_d I_{\lambda_3}}{R^2} e^{-\mu_3 R}, \quad (5)$$

式中: A_d 为探测系统的光学接收面积。

式(3)除以式(4),得:

$$\frac{\phi_{\lambda_1}}{\phi_{\lambda_2}} = \frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} e^{-(\mu_1 - \mu_2)R}. \quad (6)$$

由式(6)看出,如果已知目标在两个波段上的辐射强度比,在天气无变化的情况下,通过测量目标在两个波段上的辐射通量比值可获得目标的距离信息。实际上,如果目标可以看作黑体,则当目标的温度一定时,目标在两个波段上的辐射出射度也就确定了,根据测得的双色比值和大气透过率就可以计算出目标的距离。图 1 给出了 600 K 的黑体在 3.5 和 3.8 μm 两个波长上双色比值的大气传输情况,计算中所取的条件为:大气温度 5 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 80%,气象视程 5 km,消光系数按文献[14]中的方法得到,在这两个波长上所取的消光系数分别为 0.139 和 0.173 km。图中可以看出,如果黑体目标的温度确定,红外系统通过测量目标的双色比值就可以得到目标的距离信息。

但在多数情况下,目标是非合作的,目标的温度也无法获得。为此,把系统从两色扩展到三色,式(3)除以式(5),得:

$$\frac{\phi_{\lambda_1}}{\phi_{\lambda_3}} = \frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_3}} e^{-(\mu_1 - \mu_3)R}. \quad (7)$$

综合式(6)和式(7),可以得到三色比信息,目标温度和发射率决定了目标的双色比信息。

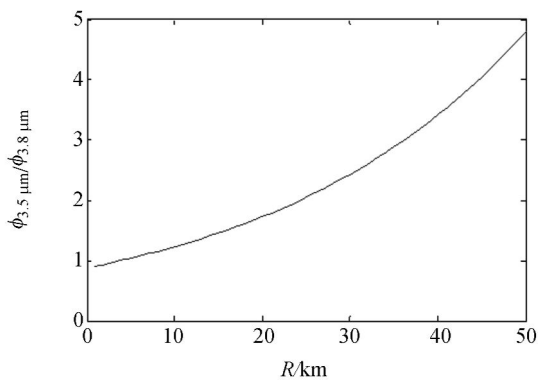


图 1 600 K 黑体双色比值的大气传输

Fig. 1 Atmospheric transmission of two-color infrared radiation ratio of a 600 K blackbody at 3.5 μm and 3.8 μm

为了便于研究,这里假设空中目标为黑体,可以得到目标在两个波段上的辐射强度比值:

$$\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} = \frac{L_{\lambda_1} \cdot A}{L_{\lambda_2} \cdot A} = \frac{M_{\lambda_1}}{M_{\lambda_2}}, \quad (8)$$

式中: L_{λ_1} 、 L_{λ_2} 为目标在波长 λ_1 和 λ_2 上的光谱辐射亮度,A为空中目标在观察方向上的投影面积, M_{λ_1} 、 M_{λ_2} 为目标在波长 λ_1 和 λ_2 上的光谱辐射出射度。黑体的辐射出射度可用普朗克公式计算:

$$M_{\text{bk}} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \quad (9)$$

式中: M_{bk} 为黑体的光谱辐射出射度($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$); λ 为波长(m); T 为物体的温度(K); c_1 为第一辐射常数, $c_1 = 3.741\ 832 \times 10^{-16}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^2$); c_2 为第二辐射常数, $c_2 = 1.438\ 786 \times 10^{-2}$ ($\text{m} \cdot \text{K}$)。

将式(8)和式(9)代入式(6),可得:

$$\frac{\phi_{\lambda_1}}{\phi_{\lambda_2}} = \frac{\lambda_2^5 (e^{c_2/\lambda_2 T} - 1)}{\lambda_1^5 (e^{c_2/\lambda_1 T} - 1)} e^{-(\mu_1 - \mu_2)R}, \quad (10)$$

同理,推广到波长 λ_3 ,则有:

$$\frac{\phi_{\lambda_1}}{\phi_{\lambda_3}} = \frac{\lambda_3^5 (e^{c_2/\lambda_3 T} - 1)}{\lambda_1^5 (e^{c_2/\lambda_1 T} - 1)} e^{-(\mu_1 - \mu_3)R}. \quad (11)$$

联立式(10)和式(11),可以得到一个关于目标温度 T 和目标距离 R 的方程组,解此方程组,即可以得到目标的距离和温度。式(10)和式(11)也说明,利用三色测距,除了距离之外,还可以得到目标温度等更多信息。

以上是把目标当作黑体来进行讨论的,如果目标是灰体,或者在测量的波段内是灰体,则目标的发射率是一个常数 ϵ ,式(9)变成:

$$M_{\text{bk}} = \epsilon \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}. \quad (12)$$

将式(12)和(8)代入式(6),依旧可以得到式(10)和式(11)。这里也可以精选波段,在这个波段内,目标可以看做是灰体,式(10)和式(11)完全适用。如果目标是一个选择性辐射体,则式(10)和式(11)的使用应该慎重。这时,可以根据目标的具体情况确定其在每个波长上的光谱发射率,利用光谱发射率参数修正后再使用。

4 测距实例计算

4.1 作图测距原理

式(10)和式(11)组成的方程组比较复杂,难以获取相应的解析解,这2个式子中除了温度 T 和距离 R ,其余的量都是确定的或者可以测量的。把这2个式子转化一下,把 R 写作是 T 的函数,由此式(10)和式(11)变为:

$$R = \frac{\ln \left[\frac{\phi_{\lambda_1}}{\phi_{\lambda_2}} \cdot \frac{\lambda_1^5 \cdot (e^{c_2/\lambda_1 T} - 1)}{\lambda_2^5 \cdot (e^{c_2/\lambda_2 T} - 1)} \right]}{\mu_2 - \mu_1}, \quad (13)$$

$$R = \frac{\ln \left[\frac{\phi_{\lambda_1}}{\phi_{\lambda_3}} \cdot \frac{\lambda_1^5 \cdot (e^{c_2/\lambda_1 T} - 1)}{\lambda_3^5 \cdot (e^{c_2/\lambda_3 T} - 1)} \right]}{\mu_3 - \mu_1}. \quad (14)$$

分别用式(13)和式(14)做一条距离 R 关于温度 T 的曲线,则两条曲线的交点能同时满足式(13)和式(14),曲线交点所对应的距离就是目标的实际距离,对应的温度就是目标的实际温度。

考虑到飞机、导弹等大气层中飞行器蒙皮的辐射多在远红外波段,下面取 8.5、9.0、9.5 μm 3 个波长进行三色被动测距研究。

4.2 大气衰减模型

红外辐射在地球大气中传输时,多数情况下, H_2O 和 CO_2 是造成红外辐射传输衰减的主要因素,由 H_2O 造成的吸收衰减主要与传输路程中含可凝结水的毫米数有关, CO_2 在空中的含量相对固定,因而其光谱吸收系数的值也相对固定,在此,使用简单的辐射传输衰减计算模型^[14],设大气温度为 5 $^\circ\text{C}$,相对湿度为 80%,根据文献[9]可以得到 H_2O 在 8.5、9.0 和 9.5 μm 3 个波长上的吸收系数分别为:0.155 6、0.089 2 和 0.073 4 km^{-1} , CO_2 在这 3 个波长上的吸收系数分别为:0、0 和 0.033 5 km^{-1} ,设气象视程为 5 km,则在这 3 个波长上的散射衰减系数分别为:0.022 3、0.020 7 和 0.019 3 km^{-1} ,各波段对应的衰减系数数值相加,得到在这 3 个波长上的消光系数分别为:0.1779、0.109 9 和 0.126 2 km^{-1} 。

4.3 实例计算

假设有一空中目标,该目标的温度为 300 K,目标在观察方向的投影面积为 50m^2 ,则根据黑体辐射理论及红外辐射大气传输规律,可以计算出目标在 8.5、9.0 和 9.5 μm 3 个波长上形成的辐射照度与辐射传输距离的关系如图 2 所示。图中,曲线 data1、data2 和 data3 分别对应着 8.5、9.0 和 9.5 μm 3 个波长上的光谱辐射照度。

在图 2 中 2 km 处取这 3 个波长的光谱辐射照度做算法验证,从图中可以得到红外系统在这 3 个波长上得到的光谱辐射通量的比值为 $\phi_{\lambda_1}/\phi_{\lambda_2} = 0.847 9$ 和 $\phi_{\lambda_1}/\phi_{\lambda_3} = 0.865 8$,利用式(13)和式(14)在同一张图上分别作出距离 R 随目标温度 T 变化的曲线,得到结果如图 3 所示。图中,line1 曲线根据式(13)作出,line2 曲线根据式(14)作出。两条曲线在图中相交,交点所对应的距离即是目标距离,所对应的温度则是目标的实际温度。从图中可以看出,目标距离约为 2 km,目标温度约为 299 K。

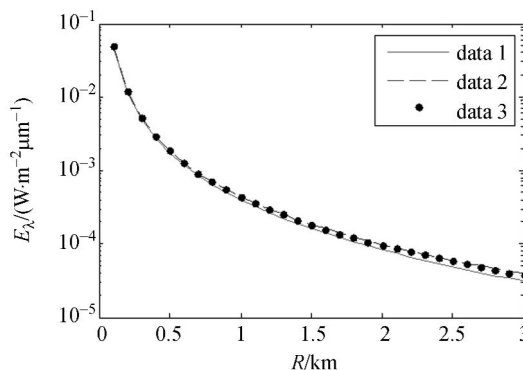


图 2 300 K 黑体光谱辐射照度与传输距离关系
Fig. 2 Relationship between blackbody spectral irradiance at 300 K and propagation distance

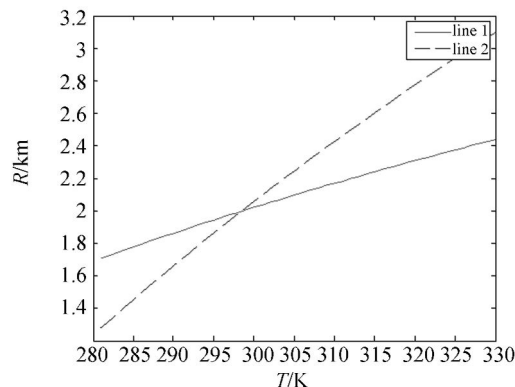


图 3 三色测距图
Fig. 3 Three-color ranging figure

5 结 论

根据前面的分析,通过测量目标在 3 个波长上的辐射光谱辐射通量,即可以获得目标的距离信息和温度信息。由于使用的测距方法是比色测量法,发射率、大气传输等因素的影响可以在很大程度上被降低。只要目标在测量的波长上可以看作是灰体,就可以使用本方法对目标进行测距。本系统测距精度主要受以下 3 个因素影响:辐射测量精度、大气消光系数的精度以及背景辐射。利用本文方法进行测距,光谱辐射通量的测量非常关键。可以使用窄带内的辐射通量代替光谱辐射通量。通过对背景辐射预先测量及后端的信号处理手段可以降低背景辐射对测距精度的影响。比色测量中,不同的波段通过相同的路程,大气的

消光系数的变化基本同步,因而大气透过率误差可以在很大程度上被降低。

如果测距对象是选择性辐射体,使用本方法进行测距时需要根据目标的具体情况进行修正。

参考文献:

- [1] GUERCI J R, GOETZ R A. A method for improving extended Kalman filter performance for angle-only passive ranging [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1994, 30(4): 1090-1093.
- [2] LIU X H. Passive tracking algorithm of single sensor based on multi-hypothesis unscented Kalman filter [C]. *IET International Radar Conference*, 2009, 551: 219-224.
- [3] ATCHESON P. Passive ranging metrology with range sensitivity exceeding one part in 10,000 [C]. *Proceedings of SPIE Conference on Optical System Alignment, Tolerancing, and Verification IV*, 2010, 7793: 77930H-1.
- [4] 赵勤杰. 光电被动测距技术[J]. *光学技术*, 2003(6): 652-656.
- ZHAO X J. Review of passive range sensing techniques [J]. *Optical Techniques*, 2003(6): 652-656.
- [5] 路远, 凌永顺, 吴汉平, 等. 地面目标的红外被动测距研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(1): 77-80.
- LU Y, LING Y SH, WU H P, *et al.*. Study on passive distance measurement of ground objects by infrared radiation [J]. *J. Infrared Millim. Wav.*, 2004, 23(1): 77-80. (in Chinese)
- [6] 黄士科, 夏涛, 张天序. 基于红外图像的被动测距方法[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 110-112, 126
- HUANG Sh K, XIA T, ZHANG T. Passive ranging method based on infrared images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 110-112, 126. (in Chinese)
- [7] 杨德贵, 肖顺平. 基于红外辐射特性的单波段红外图像被动测距[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(6): 946-950, 1013.
- YANG D G, XIAO SH P. Single-band IR passive ranging based on IR radiation characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 946-950, 1013. (in Chinese)
- [8] 杨德贵, 黎湘, 肖顺平. 基于单站双波段红外图像的面目标被动测距研究[J]. *信号处理* 2010, 26(5): 714-718.
- YANG D G, LI X, XIAO SH P. Research of the surface target ranging on single-tation dualband IR image [J]. *Signal Processing*, 2010, 26(5): 714-718. (in Chinese)
- [9] 路远, 凌永顺, 时家明. 用双波段红外成像系统对空中点目标测距[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(2): 161-164.
- LU Y, LING Y SH, SHI J M. Measurement of aerial point target distance using dual-band infrared imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 161-164. (in Chinese)
- [10] VINCENT R A, HAWKS M R. Passive ranging of dynamic rocket plumes using infrared and visible oxygen attenuation [C]. *Proc. of SPIE acquisition, Tracking, Pointing, and Laser Systems Technologies XXV*, 2010, 8052: 80520D-1.
- [11] DOUGLAS J M. Passive ranging using infrared atmospheric attenuation [C]. *Proc. of SPIE*, 2010, 7660: 766041-1.
- [12] MAARTEN V, PIET B W S, JOHANNES F G, *et al.*. Passive ranging using an infrared search and track sensor [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(2): 1-14.
- [13] 付小宁, 王浩, 任保文. 空中侦察系统中红外小目标的被动测距[J]. *应用科学学报*. 2012(03): 294-298.
- FU X N, WANG J, REN B W. Passive ranging of small infrared target in airborne reconnaissance

- [J]. *Journal of Applied Science*, 2012(03): 294-298. (in chinese)
- [14] 路远,凌永顺,樊祥. 目标红外辐射双色比值的大气传输研究[J]. *红外技术*, 2003, 25(1):40-43.

LU Y, LING Y SH, FAN X. Transimission of two wave bands infrared radiation of aerial object in the atmosphere [J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(1):40-43. (in chinese)

作者简介:



路 远(1971—),男,安徽萧县人,博士,副教授,1992年、1998年、2004年于电子工程学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事红外技术、信号处理、光电材料等方面的研究。E-mail: luyuanmail@163.com



凌永顺(1937—),男,安徽定远人,院士,1960年7月毕业于北京师范大学。电子工程学院教授,1997年当选为中国工程院院士。E-mail: lysheei@163.com



冯云松(1979—),男,安徽全椒人,博士研究生,讲师,2007年于电子工程学院获得硕士学位,主要从事目标红外辐射特性方面的研究。E-mail: fyseei@163.com



乔 亚(1979—),男,安徽桐城人,讲师,2003年、2007年于电子工程学院分别获得硕士、博士学位,主要研究方向为红外信号处理。E-mail: Dyqiaoya@163.com

(本栏目编辑:曹 金)

●下期预告

一种新型的复眼定位仪

郭 方¹,王克逸²

(1. 福建工程学院 机电系,福建 福州 350108;

2. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系,安徽 合肥 230027)

为解决大视场范围内目标定位装置的高可靠性、低功耗和便携性问题,研制了一种新型的目标定位仪器。对该系统所采用的光、机、电、定位数学模型、标定方案以及目标定位过程中根据像点识别对应通道等算法进行研究。首先,根据大视场的要求设计出透镜阵列曲面分布的结构,加工出用于透镜安放的球壳基底,并共同成像在同一个图像传感器上。其次,采用折射透镜对光路系统进一步优化,从而改善了成像质量。再次,编写相应的驱动程序完成图像的采集和数据高速传输,并在 PC 机上显示和存储等。然后,建立了所设计复眼系统的定位数学模型。随后设计了复眼成像系统的标定方案并完成了标定任务。最后,提出根据像点匹配通道的算法,实现了对目标的三维定位,并在此基础上进行了简单的三维零件轮廓测量应用。实验结果表明:系统对横向 66°、纵向 43°视场角的目标实际三维测量精度误差在 2%左右,本仪器能完成大视场范围内的目标三维定位任务。