

大气背景对红外目标探测的影响

田昌会, 杨百愚, 蔡明, 范琦, 王斌科, 王伟宇, 屈绍波

(空军工程大学理学院, 陕西西安 710051)

摘要: 针对大气背景是一个纵深背景而非一个平面, 无法使用现有对比度计算公式计算的实际, 基于红外焦平面探测器工作原理推导出了大气背景下探测器处辐射照度的对比度计算公式。通过对大气背景的红外辐射计算, 并与报道的飞机红外辐射数据比较, 应用对比度计算公式做分析可知: 大气背景对探测的影响是必须考虑的; 在 3~5 μm 大气窗口的大气背景辐射很小, 选择 3~5 μm 大气窗口探测更容易发现目标; 在 8~12 μm 大气窗口内 10 μm 附近的大气背景辐射较强, 目标不易被探测。随着探测距离增加, 探测器到无限远处的大气背景辐射亮度与探测器和目标之间的大气背景辐射亮度之差在减小, 它会增大对比度, 这是分析探测距离不可忽视的一个因素。

关键词: 红外辐射; 大气背景; 对比度; 目标探测

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0438-04

Effect of atmospheric background on infrared target detection

Tian Changhui, Yang Baiyu, Cai Ming, Fan Qi, Wang Binke, Wang Weiyu, Qu Shaobo

(College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: On account of the present situation that the contrast formula can't be used to calculate target and atmospheric background contrast, the irradiance contrast formula of target and atmospheric background was deduced based on the operating principle of focal plane detector. By calculating the atmospheric background infrared radiation, comparing it with the aircraft infrared radiation data report, and analyzing the contrast, results indicate that: the effect of atmospheric background on detection must be taken into consideration. The atmospheric infrared radiation between 3-5 μm is very low, target in 3-5 μm is easier to be detected. The atmospheric infrared radiation near 10 μm is higher, and the target detection is more difficult. As the detection distance increases, the difference of radiance between the atmospheric path from detector to space and from detector to target decreases, and the contrast increases, which is an unneglectable factor to detection distance analysis.

Key words: infrared radiation; atmospheric background; contrast; target detection

收稿日期: 2013-06-14; 修订日期: 2013-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(11274389); 陕西省自然科学基金计划研究项目(2010JM8012)

作者简介: 田昌会(1963-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为目标红外辐射特性与探测技术。Email: tchtyb001@163.com

0 引言

随着红外探测技术和红外信息处理技术的飞跃发展,红外传感器因具有全天候、作用距离远等诸多优点,现已被广泛应用于红外制导等武器装备^[1-2]。红外制导武器在发现、识别和跟踪目标的过程中不是利用目标的红外辐射特征本身,而是通过对目标与周围环境的红外辐射对比度特征进行分析,将目标与背景区分开来,从而实现对目标的发现、识别和跟踪^[3]。随着红外对抗技术的发展,目前世界各国均在军用目标上采用了大量隐身措施,如伪装网、红外涂料以及其他一些红外抑制措施,其目的都是为了减小目标与背景的红外辐射对比度,甚至使目标完全隐没在背景之中^[4]。参考文献[5]通过计算表明,对比度和作用距离随目标表面温度、发射率及飞行速度的下降趋势基本一致,在一定条件下,对比度可代替作用距离作为评价目标红外隐身效果的简单、快速的参数,对比度越小,目标的红外隐身效果越好。可以看出,目标与背景的红外辐射对比度是红外探测与红外信息处理中的一个非常重要的参量^[6]。然而,对探测的空中目标而言,目标的背景为大气,它不是一个可以用面表示的纵深背景,且具有红外辐射和红外吸收衰减两方面作用,对于这样的背景显然不能用通常的对比度计算方法计算。针对这种情况,文中通过分析红外焦平面探测器工作原理、大气的辐射和传输特性,推导出像飞机这样的空中目标的对比度计算方法,通过分析影响对比度的大气因素,进一步阐明大气背景对探测技术的影响。

1 对比度计算公式推导

红外探测是利用探测器将接收到的不可见的红外辐射能转换成便于测量和观察的电能、热能等形式的能量,进一步确定红外信号强度等信息,因此,红外目标探测取决于探测器处目标的红外信号强度,衡量的标准应该为在探测器处的红外辐射照度。为了便于分析空中目标与大气辐射对探测器处辐射照度的影响,绘制了空中目标与大气辐射传输及焦平面探测器位置示意图,如图1所示。图中 R 为目标与探测器之间的距离, f 为透镜焦距。

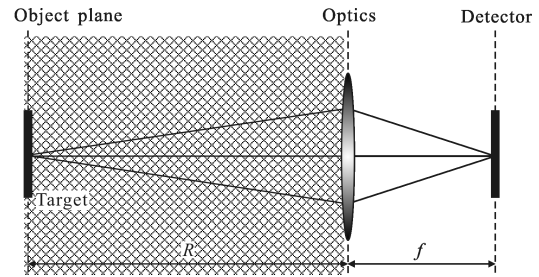


图1 红外目标大气辐射传输及焦平面探测示意图

Fig.1 Illustration of IR target radiation propagation in the atmosphere and its detection with focal plane detector

假设目标热辐射发出的辐射亮度为 L_t ,目标到探测器之间路径大气产生的路径辐射亮度为 $L_a(R)$,探测器到无限远处之间路径大气的背景辐射亮度为 $L_a(\infty)$ 。在光学成像系统入瞳处的目标成像区,总辐射照度由两部分构成。第一,目标在观察视线方向单位投影面积的红外辐射经大气透射衰减后的辐射照度:

$$E_1 = \frac{1}{R^2} \tau_a(R) L_t \quad (1)$$

式中: $\tau_a(R)$ 为距离为 R 的大气路径传输系数。第二,目标与探测器间的大气在观察视线方向单位投影面积的路径辐射照度:

$$E_2 = \frac{1}{R^2} L_a(R) \quad (2)$$

因此,在观察视线方向上,单位投影面积在探测器处成为目标信息的总辐射照度为:

$$E_r = E_1 + E_2 \quad (3)$$

背景辐射照度为探测器到无限远处之间路径大气的辐射照度:

$$E_b = \frac{1}{R^2} L_a(\infty) \quad (4)$$

依据对比度定义^[7-9],目标与大气背景的对比度可以表示成绝对对比度:

$$C = |E_r - E_b| = \frac{1}{R^2} |L_t \tau_a(R) - [L_a(\infty) - L_a(R)]| \quad (5)$$

相对对比度:

$$C_R = \frac{|E_r - E_b|}{E_b} \quad (6)$$

由公式(1)~(4)可以推导出

$$C_R = \frac{L_t \tau_a(R) - [L_a(\infty) - L_a(R)]}{L_a(\infty)} \quad (7)$$

从对比度公式的推导过程可以看出, L_t 与 $L_a(R)$ 、 $L_a(\infty)$ 的区别在于 L_t 未考虑大气衰减,而 $L_a(R)$ 、 $L_a(\infty)$ 已考虑了大气衰减。目标的红外辐射亮度 L_t 不含大

气衰减,大气的红外辐射亮度 $L_a(R)$ 、 $L_a(\infty)$ 包含大气衰减的表示方法与人们通常的表述习惯是一致的,大气辐射传输软件可以计算 $L_a(R)$ 、 $L_a(\infty)$ 和大气传输系数 $\tau_a(R)$,只要知道目标的红外辐射亮度及目标与探测器距离,就可以用以上推导的公式计算出目标与大气背景的红外辐射照度对比度。

2 大气背景对探测的影响

从公式(5)、(7)可以看出,大气在远距离焦平面成像探测器中对红外辐射照度影响的因素有两方面:第一,大气对目标的红外辐射信号衰减,用距离为 R 的传输路径大气传输系数 $\tau_a(R)$ 表示;第二,大气形成目标的背景,计算所用的量就是 $L_a(\infty) - L_a(R)$ 。为了分析大气对探测的影响,用 MODTRAN 计算大气的红外辐射和红外传输系数,对于像飞机这样的空中目标的探测,目前主要用 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 两个大气窗口,为了能同时分析两个大气窗口,计算选择的波段范围为 $2\sim 14\ \mu\text{m}$ 。用 MODTRAN 计算时,选用的大气模型为中纬度夏季模型(无气溶胶、无云雨),边界层温度由大气模型确定。在计算模式选择上,用热辐射亮度(Thermal Radiance)模式和带散射的热辐射亮度(Radiance with Scattering)模式做了同条件下的对比计算,从计算结果可知太阳对大气辐射的影响主要在可见光和红外短波,对 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 两个大气窗口影响很小,因此后面所给结果都是用不考虑太阳方位的热辐射亮度(Thermal Radiance)模式计算的。考虑到单色红外辐射亮度相比红外辐射亮度更能详细地反映大气特性,用单色红外辐射亮度替代红外辐射亮度在公式(5)、(7)中的表达形式是相同的,下面给出的计算结果用单色红外辐射亮度表示。假定探测器在 10 km 高度水平观察,计算目标与探测器距离分别为 5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60、65、70、75、80、85、90、95、100 km 的大气单色红外辐射亮度和大气传输系数以及目标与探测器距离分别为无限远的大气单色红外辐射亮度,用 Matlab 提取 MODTRAN 计算的相关数据,完成计算和绘图工作。

图 2、图 3 给出 10 km 和 80 km 的大气辐射计算结果,从图中可以看出与目标和探测器间的距离无关,随目标和探测器间的距离增大而增大,随目标和探测器间的距离增大而减小。在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 大气窗口的背景辐

射是很小的,从这个角度看,选择 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 大气窗口探测更容易发现目标。在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 大气窗口内 $10\ \mu\text{m}$ 附近的大气背景辐射较强,不易探测,应该尽量避免。

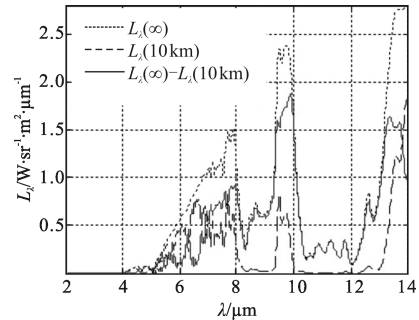


图 2 10 km 大气单色辐射亮度

Fig.2 Atmospheric background infrared spectrum radiation of 10 km

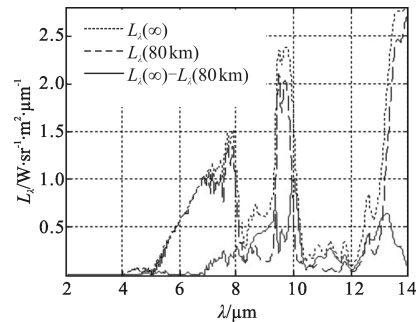


图 3 80 km 大气单色辐射亮度

Fig.3 Atmospheric background infrared spectrum radiation of 80 km

由于在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 大气窗口的大气背景辐射很小,下面只分析在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 大气窗口的大气背景影响。为了进一步分析大气背景对空中目标探测的影响,计算在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 大气窗口的大气平均传输系数、平均单色辐射亮度 $\overline{L_a(\infty) - L_a(R)}$ 随目标与探测器距离 R 之间的关系,如图 4、图 5 所示。对于飞机的红外辐射,参考文献[10]对飞机涡扇排气系统通过 1/5 缩比模型进行了测试,在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 大气窗口内其单色红外辐射亮度小于 $5\ \text{W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2\cdot\mu\text{m})$,平均值约为 $1.5\ \text{W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2\cdot\mu\text{m})$,对与飞机蒙皮的红外辐射通常情况下会小于排气系统,且在计算对比度时需要乘以小于 1 的大气传输系数。可以看出,对于空中像飞机这样的红外目标,大气背景对探测器是必须考虑的。从公式(5)、(7)可以看出,大气背景影响对比度的决定量为 $L_a(\infty) - L_a(R)$,对通常像飞机这样的空中目标, L_a 大于 $L_a(\infty) - L_a(R)$, $L_a(\infty) - L_a(R)$ 越大,对应波段内的 $L_a(\infty) - L_a(R)$ 越大,对比度越小,从这个角度来讲,用对比度分析目标可探测距离时不仅要考虑目标在探测器处的辐射照度与 R^2 成反比,大气传输系数,也

要考虑探测距离增加时大气背景的辐射值 $L_{\lambda}(\infty)-L_{\lambda}(R)$ 在减小,它会增大对比度。这是分析探测距离不可忽视的一个因素。

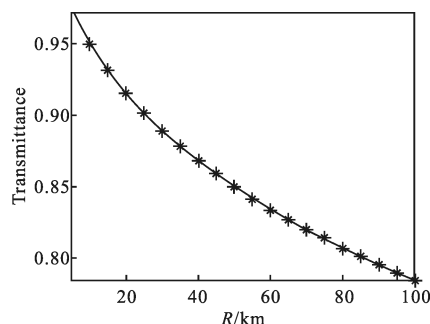


图4 8~12 μm 波段的平均传输系数与距离 R 的关系

Fig.4 Mean transmittance changes with distance in 8-12 μm wave band

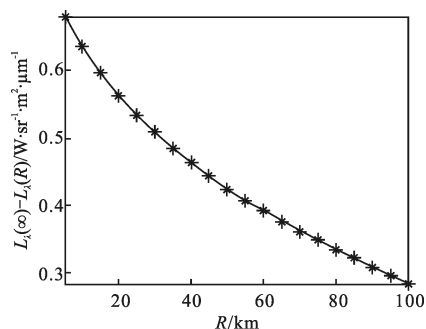


图5 8~12 μm 波段 $L_{\lambda}(\infty)-L_{\lambda}(R)$ 与距离 R 的关系

Fig.5 $L_{\lambda}(\infty)-L_{\lambda}(R)$ changes with distance in 8-12 μm wave band

3 结果与讨论

基于红外焦平面探测器工作原理推导出了大气背景下探测器处辐射照度的对比度计算公式,若要计算探测器响应对比度,绝对对比度还需要乘以探测器的响应度和光学系统的透过率,但对相对对比度的计算是一样的。

通过对大气背景的热辐射计算,并与报道的飞机红外辐射数据比较,应用对比度计算公式做分析可知:大气背景对探测的影响是必须考虑的;在3~5 μm 大气窗口的大气背景辐射很小,选择3~5 μm 大气窗口探测更容易发现目标;在8~12 μm 大气窗口内10 μm 附近的大气背景辐射较强,目标不易被探测,应该尽量避开在10 μm 附近探测;随着探测距离增加,大气背景辐射亮度在减小,它会增大对比度,这是分析探测距离不可忽视的一个因素。

MODTRAN 软件计算的是大气辐射亮度,用之推算辐射照度时,对于近距离,由于大气不为一个平面可

能会有些影响,但对文中的计算距离较远,且在计算对比度时被消掉了,因此对计算结果不会产生影响。

文中按照红外探测的典型军事使用条件(10 km 高度水平观察)作了计算分析,如果下上或倾斜探测,由于大气密度不同,同样距离的大气传输系数和大气路径辐射亮度会有变化,同样距离的对比度计算数值会不同,但计算方法仍然适用。

参考文献:

- [1] Shi Deqin, Li Junshan, Geng Zhi, et al. Object tracking based on particle filter with feature fusion in multi-mode image sequences [J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2011, 12(5): 61-66. (in Chinese)
- [2] Wu Jianfeng, He Guangjun, Zhao Yuqin. The calculation for strength of infrared radiation in the opposite direction of the airplane [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2006, 7(6): 26-28. (in Chinese)
- [3] Sonawane H R, Mahulikar S P. Tactical air warfare: Generic model for aircraft susceptibility to infrared guided missiles [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2011, 15: 249-260.
- [4] Lou Heli, Lv Xiangyin. Influential factors of infrared contrast features of object and background [J]. *Infrared*, 2011, 32(11): 1-4. (in Chinese)
- [5] Wei Disheng, Wang Xiaoqun, Du Shanyi. Engineering evaluation method for infrared camouflage efficiency of aircraft [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(6): 1592-1597. (in Chinese)
- [6] Mahulikar S P, Sonawane H R, ArvindRao G. Infrared signature studies of aerospace vehicles [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2007, 43: 218-245.
- [7] Ye Qing, Sun Xiaoqun, Shao Li. Analysis of optimum detective wavebands for infrared early-warning satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 389-393. (in Chinese)
- [8] Zhong Wu, Zhang Yufa, Yu Dabin, et al. Effect of target temperature on the camouflage efficiency of infrared pattern painting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1841-1845. (in Chinese)
- [9] Lin Suzhen, Yang Fengbao, Zhou Xiao, et al. Point target imaging characteristic differences of dual-color mid-wave infrared[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(10): 580-584. (in Chinese)
- [10] Shan Yong, Zhang Jingzhou, Shao Wanren, et al. Experiments on infrared radiation characteristics of exhaust system for a turbofan engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(10): 2228-2234. (in Chinese)