

影响红外目标探测亮度的因素

易亚星^{1,2}, 姚梅¹, 吴军辉¹, 乐开端³

(1. 中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003; 2. 第二炮兵工程大学 四系, 陕西 西安 710025;
3. 西安交通大学 机械制造系统国家重点实验室, 陕西 西安 710025)

摘要:文中就红外目标探测实验中, 目标辐射亮度随作用距离增加而增强的现象提出问题。以红外探测亮度方程为理论基础, 利用大气辐射传输软件 LOWTRAN, 对目标与背景的红外辐射亮度、路径辐射亮度、路径透过率、距离和有效作用面积等影响红外目标探测亮度的各项因素进行了深入的分析。结果表明, 随着作用距离的增加, 背景辐射亮度增加在所有影响探测亮度的因素中占据主导地位, 最终使得目标辐射亮度增加。通过文中的分析, 合理解释了实验现象, 对于设计红外探测系统、跟踪系统的目标提取算法具有十分重要的意义。

关键词: 红外告警; 大气辐射; 大气传输

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0013-06

Factors of the detected luminance of an infrared target

Yi Yaxing^{1,2}, Yao Mei¹, Wu Junhui¹, Yue Kaiduan³

(1. No 63892 Unit of PLA, Luoyang 471003, China;
2. The 4th Department of the Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;
3. The State Key Laboratory for Manufacturing, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710025, China)

Abstract: In recent infrared warning experiments, an abnormal phenomena was discovered in which the target radiance increased with the active range. In this paper, how to solve the problem was discussed. Based on the theory of radiance detection equation and by the atmospheric radiance software LOWTRAN, a particular analysis was given about the factors affecting the infrared warning such as the infrared radiant characteristics of the target, the atmospheric irradiance of the sky background, the irradiance and the transmittance of the atmospheric path, the detection range, the effective area of the target facing the detector, and the principle. As a result, with the active range increased, the increment of the background radiance was dominant in all influenced factors, so the target radiance was larger and larger. Through the discussion, the abnormal phenomena were interpreted reasonably, and the conclusion was of great significance to develop the algorithm of target extraction for the infrared detective and tracking systems.

Key words: infrared warning; atmospheric radiation; atmospheric transmittance

收稿日期: 2013-05-22; 修订日期: 2013-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(50775172)

作者简介: 易亚星(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电对抗方面的研究。Email: yi_yaxing@sina.com

0 引言

红外热成像技术的应用十分广泛^[1],在军事领域的应用除了红外夜视,主要集中在精确制导武器中的导引头红外寻的^[2]和光电对抗中的红外预警。红外预警中最重要的指标是探测距离,也就是对微弱信号的检测能力。对于红外小目标检测算法^[3-6]及其实现方法^[7-8]已有较多的研究。目标亮度是目标检测中的一个关键因素。一般来说目标越近,其亮度应该越高,但笔者在实验中观察到完全相反的情况。基于目标亮度对于目标检测的重要性,文中试图探究这种现象形成的机理,期望对于目标检测算法的研究有所助益。

在红外搜索告警实验中,飞机按一定的高度水平匀速飞行,红外探测器在地面对天空进行搜索。探测器位于飞机航线的正下方,飞机对探测器迎头飞行时,得到如图 1 所示的一组实验数据。一般来说,对于一个红外辐射特性不变的目标,距离越近,探测到的目标的亮度应该越高。也就是说目标亮度与距离之间应该是负相关的。然而实验数据却表明,距离越远目标亮度反而越大,文中就这一问题进行了初步的研究和探讨。

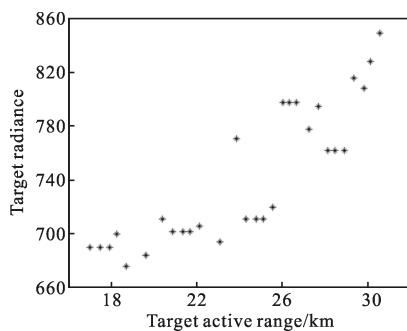


图 1 同一目标在不同距离时的亮度

Fig.1 Radiance versus range of target

1 红外探测亮度方程

根据目标对红外探测系统的张角和探测器单个像元的视场大小,可将目标分为点目标和面目标。点目标的传统定义为^[9]:小于传感器的一个(几何)分辨单元的像目标称为点目标。否则视为面目标。

设目标的有效面积为 A , 目标与探测器的距离为 R , 探测器单个像元的视场为 $\omega(\omega=\alpha\beta)$, 目标对探

测器的张角为 $\alpha'\beta'$, 对于点目标($\alpha\beta>\alpha'\beta'$)来说,目标在探测器上的成像为一个点,但由于目标未能充满整个像元,该像元的部分面积仍被背景所辐照,目标与背景在探测器上的光谱辐照度 $H(\lambda)$ 为:

$$H(\lambda)=[N_t(\lambda)\cdot\alpha'\beta'+N_b(\lambda)\cdot(\alpha\beta-\alpha'\beta')]\cdot\tau_a(\lambda)+N_d(\lambda)\cdot\alpha\beta(1)$$

式中: $N_t(\lambda)$ 为目标光谱辐射亮度; $N_b(\lambda)$ 为背景光谱辐射亮度; $N_d(\lambda)$ 为路径光谱辐射亮度; $\tau_a(\lambda)$ 为大气光谱透过率。

经探测器光学系统聚焦,会聚到探测器光敏面上光谱辐照功率 $P(\lambda)$ 为:

$$P(\lambda)=H(\lambda)A_0\cdot\tau_0(\lambda)=[\{N_t(\lambda)\cdot\alpha'\beta'+N_b(\lambda)\cdot(\alpha\beta-\alpha'\beta')\}\cdot\tau_a(\lambda)+N_d(\lambda)\cdot\alpha\beta]\cdot A_0\cdot\tau_0(2)$$

式中: A_0 为光学系统的有效通光面积; $\tau_0(\lambda)$ 为光学系统的光谱透过率。

探测器对应像元产生的信号电压为:

$$V=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda)R(\lambda)d\lambda=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{[N_t(\lambda)\cdot\alpha'\beta'+N_b(\lambda)\cdot(\alpha\beta-\alpha'\beta')]\cdot\tau_a(\lambda)+N_d(\lambda)\cdot\alpha\beta\}\cdot A_0\cdot\tau_0(\lambda)\cdot R(\lambda)d\lambda(3)$$

式中: $R(\lambda)$ 为探测器的电压响应率。

目标在监视器上显示的亮度为:

$$L=c\cdot V+B_0=c\cdot\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{[N_t(\lambda)\cdot\alpha'\beta'+N_b(\lambda)\cdot(\alpha\beta-\alpha'\beta')]\cdot\tau_a(\lambda)+N_d(\lambda)\cdot\alpha\beta\}\cdot A_0\cdot\tau_0(\lambda)\cdot R(\lambda)d\lambda+B_0(4)$$

式中: c 为显示增益系数; B_0 为显示白平衡基数。

由于目标形状不规则,用 A/R^2 代替 $\alpha'\beta'$ 得到:

$$L=c\cdot\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{[N_t(\lambda)\cdot A/R^2+N_b(\lambda)\cdot(\alpha\beta-A/R^2)]\cdot\tau_a(\lambda)+N_d(\lambda)\cdot\alpha\beta\}\cdot A_0\cdot\tau_0(\lambda)\cdot R(\lambda)d\lambda+B_0(5)$$

以上是点目标的亮度方程,相应地,面目标的亮度方程为:

$$L=c\cdot\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [N_t(\lambda)\cdot\tau_a(\lambda)+N_d(\lambda)]\cdot\alpha\beta\cdot A_0\cdot\tau_0(\lambda)\cdot R(\lambda)d\lambda+B_0(6)$$

2 影响红外目标探测亮度的因素

比较公式(5)和公式(6)可以看出,点目标和面目标的亮度方程有较大的差异。对于面目标来说,除了红外探测系统本身的因素外,目标的亮度取决于目标本身的红外辐射亮度、路径的辐射亮度和大气透过率。对于点目标来说,除了上述因素外,目标的有

效探测面积、目标与探测器之间的距离、背景辐射亮度都直接影响目标的亮度。文中主要分析点目标的情形。

由公式(5)可知,影响点目标红外探测亮度的因素有:目标的红外辐射亮度、目标的有效探测面积、背景红外辐射亮度、目标与探测器间的距离、路径的红外辐射亮度、路径红外波段透过率、探测器单个像元的瞬时视场、探测器光学系统的有效通光面积和透过率、探测器的电压响应率、显示器的显示增益系数和白平衡基数。其中与探测器和显示器有关的几个因素在实验中保持不变,不是该实验中影响目标显示亮度的因素,因而文中主要分析前几项因素。

2.1 目标的红外辐射亮度

由于飞机对探测器迎头飞行,尾喷管和排出的气流对探测器来说是不可见的,目标的红外辐射完全取决于飞机蒙皮的热辐射,其辐射亮度可按下式计算:

$$N_i(\lambda) = \sigma \varepsilon_i T_i^4 \eta(\lambda) / \pi \quad (7)$$

式中: σ 为 Stefan-Boltzmann 系数, ($5.669\ 6 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); ε_i 为目标的辐射发射率; T_i 为目标表面温度; $\eta(\lambda)$ 为光谱辐射率。

目标表面温度可按下式计算:

$$T_i = T_b \left(1 + r \cdot \frac{r' - 1}{2} \cdot M^2 \right) \quad (8)$$

式中: T_b 为环境温度; r 为恢复因子; r' 为空气的比热比; M 为目标速度(马赫数)。

对于低空飞行的飞机,一般可用下面的经验公式计算:

$$T_i = T_b (1 + 0.164 M^2) \quad (9)$$

从以上分析可以看出,匀速水平飞行的飞机,其红外辐射是基本稳定的。为了定量分析各种因素的综合作用效果,必须计算出目标在红外探测波段内的辐射亮度。

将目标视为灰体,其辐射发射率与波长无关,因而可以黑体函数进行计算^[10]。

根据维恩位移定律,黑体光谱辐射峰值波长与温度之间的关系为:

$$\lambda_m \cdot T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (10)$$

令 $x_1 = \lambda_1 / \lambda_m$ 、 $x_2 = \lambda_2 / \lambda_m$, 利用黑体函数 $z = f(x)$ 进行计算,从黑体函数表中查得 $z(x_1)$ 和 $z(x_2)$, 根据下式计算:

$$N_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_i(\lambda) d\lambda = [z(x_2) - z(x_1)] \sigma \varepsilon_i T_i^4 / \pi \quad (11)$$

具体计算过程如下:

首先根据目标速度和环境温度由公式(9)计算出目标表面温度 T_i ; 参考有关文献[11], 取目标的辐射发射率为 0.8, 由公式(10)计算出目标的峰值波长 λ_m ; 根据探测器的截止波长($\lambda_1 \sim \lambda_2$)计算出 $x_1 = \lambda_1 / \lambda_m$ 、 $x_2 = \lambda_2 / \lambda_m$ 后, 查黑体函数表^[2], 得到 $z(x_1)$ 和 $z(x_2)$, 并根据公式(11)计算出结果 N_i 。

2.2 目标的有效探测面积、目标与探测器间的距离

一般情况下,点目标在探测器上成像为一个点,面目标的成像是多个像元组成的图像。要注意的是,由于形状不规则,有时目标在探测器上成像超过一个像素,但目标并未充满其中任何一个像素,此时仍应视为点目标。点目标的有效探测面积比较复杂。首先,由于距离变化,探测器对目标的观察角度会发生变化,目标的有效探测面积 A 会缓慢地改变;其次,因为红外探测器是由多像元组成的,每个探测器单元的瞬时视场为 $\alpha\beta$, 而目标的形状是不规则的。当目标能全部容纳在一个探测器单元视场内时,目标的有效探测面积为 A ; 当目标跨几个探测器单元视场时,作用到某一个探测器单元的有效面积实际上只是整个目标有效探测面积的一部分(如图2所示),并且随着目标的运动,这个部分占整个面积的比例也在不断地发生变化。考虑到这种情况,应对公式(5)做适当的修正,用目标对探测器单个像元的有效探测面积 a 来代替目标的有效探测面积 A , 得公式(12)。

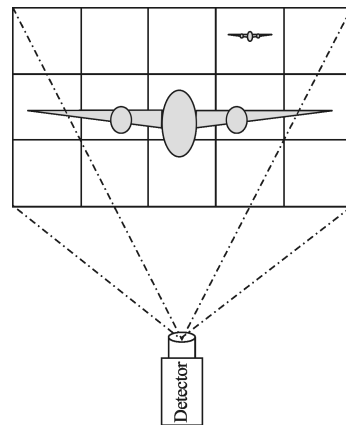


图2 红外探测系统中的点目标

Fig.2 Point object in infrared detective system

$$L = c \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ [N_i(\lambda) \cdot a / R^2 + N_b(\lambda) \cdot (\alpha\beta - a / R^2)] \cdot \tau_a(\lambda) + N_a(\lambda) \cdot \alpha\beta \} \cdot A_0 \cdot \tau_0(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda + B_0 \quad (12)$$

根据飞机迎头飞行的特点, a 的值应该是不断起伏波动的, 而总的趋势是逐渐减小; 相应地, 公式(12)中的 a/R^2 的值也是不断起伏波动的, 但其总的趋势是逐渐增大。因此, a/R^2 这一项综合因素对探测到的目标亮度的影响有两个特点, 一是起伏变化; 二是随着距离 R 的减小而使亮度增大。

2.3 路径红外波段透过率

对于大气的透过率, 采用 LOWTRAN 软件包^[12] 进行计算。计算条件分述如下:

由于没有气象探空数据, 各项气象因素均根据地面数据按经验公式进行修正。

温度: 根据实验条件, 对流层内, 随高度增加温度递减率按 $6.5\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 计算。

水汽分布: 利用对流层大气湿度随地高度分布函数求解:

$$\frac{T(H_2)e(H_1)}{T(H_1)e(H_2)} = \exp[-\beta(H_1-H_2)] \quad (13)$$

式中: $\beta=0.45/\text{km}$, H_1 、 H_2 分别为海拔高度, 单位为 km ; $T(H_1)$ 、 $T(H_2)$ 分别为 H_1 、 H_2 处的大气绝对温度, 单位为 K ; $e(H_1)$ 、 $e(H_2)$ 分别为 H_1 、 H_2 处的水汽分压, 单位为 hPa (毫巴或百帕)。

水汽分压 e (hPa) 和相对湿度 RH (百分比), 它们的关系为(T 为绝对温度, 单位为 K):

$$e = RM \cdot 0.061078 \exp[a(T-273.16)/(T-b)] \quad (14)$$

当 $T > 273.16\text{ K}$ 时, $a=17.269$, $b=35.86$; 当 $T < 273.16\text{ K}$ 时, $a=21.87$, $b=7.66$ 。

大气压强: 大气压强随着高度递减, 利用对流层大气压强随地高度分布函数求解:

$$\frac{P(H_1)}{P(H_2)} = \exp[-0.1275668(H_1-H_2)] \quad (15)$$

式中: H_1 、 H_2 同前; $P(H_1)$ 、 $P(H_2)$ 分别为 H_1 、 H_2 处的大气压强, 单位为 hPa 。

汽溶胶: 采用与实验地区相对应的汽溶胶模式, 能见度按实测数据输入。

在 LOWTRAN 的汽溶胶模式中, 粒子谱分布函数分为两个部分, 即:

$$\frac{dN_r}{dr} = N(z, \text{Vis})n(r) \quad (16)$$

式中: N_r 是粒子总密度; $N(z, \text{Vis})$ 为与高度 z 和能见度 Vis 有关的密度系数; r 为粒子半径(假设汽溶胶粒子为球形); $n(r)$ 是控制粒子尺度谱分布形状的谱型函数。LOWTRAN 计算程序规定, 在某个指定高度区内, 谱型函数 $n(r)$ 不随高度发生变化, 仅仅密度系

数 $N(z, \text{Vis})$ 有改变。

谱型函数 $n(r)$ 满足归一化条件, 即:

$$\int_0^{\infty} n(r) dr = 1 \quad (17)$$

汽溶胶消光系数 $k_e(\lambda)$ 表达式为:

$$k_e(\lambda) = N(z, \text{Vis}) \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_e(m, \lambda, r) n(r) dr = N(z, \text{Vis}) \text{EXT}(\lambda) \quad (18)$$

式中: Q_e 为 Mie 消光效率因子; m 为折射指数; $\text{EXT}(\lambda)$ 为消光系数。

在光程(z_1, z_2)内, 由于汽溶胶存在引起的透过率 τ_a 为:

$$\tau_a = \exp \left[- \int_{z_1}^{z_2} N(z, \text{Vis}) \cdot \text{EXT}(\lambda) m_a(z) dz \right] \quad (19)$$

式中: $m_a(z)$ 为大气质量。

计算结果如图 3 所示, 计算结果表明, 距离越远, 透过率越小。显然路径透过率使得目标的亮度随距离的增加而减小。

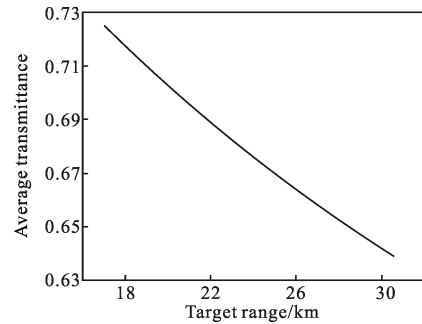


图 3 路径波段平均透过率

Fig.3 Average spectral transmittance versus range of target for the slant path

2.4 背景的红外辐射亮度

对于天空背景的红外辐射亮度, 用 LOWTRAN 软件包对当时条件下的大气辐射进行计算, 并与其他时间的实际测量数据进行比对, 计算结果如图 4 所示。显然随着距离越来越大, 由于天顶角变大, 大气的红外辐射亮度变大。

实际测量数据亦支持这一结论: 观测天顶角愈大, 大气的红外辐射亮度也愈大。图 5 是一幅实际拍摄的红外图象, 可以很清楚地看出, 随着观测天顶角的减小, 背景亮度越来越暗。随着距离的增大, 背景的红外辐射亮度 $N_b(\lambda)$ 增大, 由公式(12)可知, 背景的红外辐射亮度是使目标的表现亮度增大的一个因素。

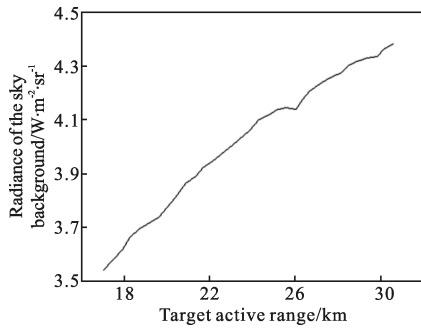


图 4 目标距离与背景辐射亮度关系

Fig.4 Radiance of the sky background versus range of target

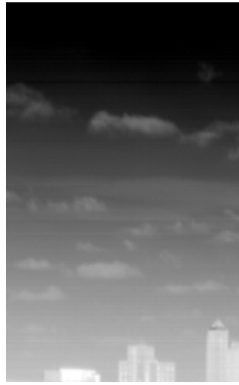


图 5 实际拍摄的红外图象

Fig.5 Infrared image in experiment

2.5 路径的红外辐射亮度

路径的红外辐射亮度也采用 LOWTRAN 软件包计算, 计算条件与前面计算路径的大气透过率和天空背景的辐射亮度相同, 计算结果如图 6 所示。

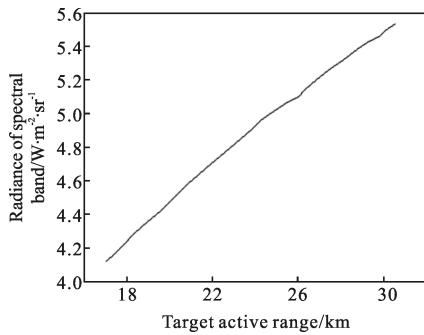


图 6 路径的红外波段辐射亮度

Fig.6 Relation between radiance of spectral band and target range along the slant path

计算结果表明, 随着距离增大, 路径上大气的红外辐射亮度不断增大, 即公式(12)中的 $N_a(\lambda)$ 增大, 使得目标的亮度增大。

2.6 综合作用效果

公式(12)表示的是目标在监视器上显示出来的

亮度, 而实验中记录的是经 A/D 变换后得到的一个数字量, 是与显示器无关的, 这里用 L' 来表示:

$$L' = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ [N_i(\lambda) \cdot a/R^2 + N_b(\lambda) \cdot (\alpha\beta - a/R^2)] \cdot \tau_a(\lambda) + N_a(\lambda) \cdot \alpha\beta \} \cdot A_0 \cdot \tau_0(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda \quad (20)$$

为了便于计算, 对上式进行如下简化: 用波段总辐射亮度 $N_i(\lambda)$ 、 $N_b(\lambda)$ 、 $N_a(\lambda)$ 代替光谱辐射亮度 $N_i(\lambda)$ 、 $N_b(\lambda)$ 、 $N_a(\lambda)$; 用波段平均透过率 τ_a 代替光谱透过率 $\tau_a(\lambda)$; 去掉积分号; 认为探测器特性不变, 用常数 u 代替 $A_0 \cdot \tau_0(\lambda) \cdot R(\lambda)$; 得到亮度方程:

$$L'' = \{ [N_i \cdot a/R^2 + N_b \cdot (\alpha\beta - a/R^2)] \cdot \tau_a + N_a \cdot \alpha\beta \} \cdot u \quad (21)$$

对于有效探测面积 a 的变化, 作如下假设: (1) a 为单个像元可能的最大有效探测面积, 即不考虑有效探测面积的起伏波动; (2) 飞机的头体部分占总面积 A 的 $2/3$, 且始终在探测器视场中; 机翼部分占 $1/3$, 且随距离的不同出现在视场中的面积不同, 假定为 $\frac{A}{3} \cdot \frac{R}{R_0}$, R_0 为飞机刚好全部进入单个像元视场时的距离。根据以上假设, 有: $a = \frac{2A}{3} + \frac{A}{3} \cdot \frac{R}{R_0}$ (22)

由公式(21)、(22)可得:

$$L'' = \left\{ N_i \cdot \left(\frac{2A}{3R^2} + \frac{2A}{3R \cdot R_0} \right) + N_b \cdot \left(\alpha\beta - \frac{2A}{3R^2} - \frac{A}{3R \cdot R_0} \right) \right\} \cdot \tau_a + N_a \cdot \alpha\beta \cdot u \quad (23)$$

式中: L'' 、 R 、 R_0 、 N_i 、 A 、 $\alpha\beta$ 为已知量; N_b 、 N_a 、 τ_a 由软件包计算得到; u 为未知的常量。为了便于比较, 利用方程(23)解算出未知常量 u (取平均值), 再利用方程(23)计算目标亮度。由于 u 是一个正的常数, u 的取值不影响计算结果的变化趋势。计算结果如图 7 所示。计算结果表明, 红外探测器探测到的目标亮度确实随着距离的增加而增大。文中对于影响红外目标探测亮度因素的分析与实验结果是基本吻合的。

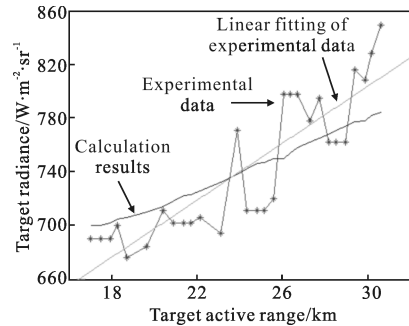


图 7 目标亮度计算结果与实验结果的比较

Fig.7 Comparison of target radiance between numerical calculation and experimental data

3 结 论

综合考虑各种因素,在实验中,目标本身的红外辐射特性可以认为是不变的;随着距离的增大,路径透过率、距离与有效探测面积等因素使探测到的目标的亮度减小;作用到单个探测器单元的有效面积的变化,使得目标亮度发生起伏波动;天空背景的红外辐射亮度和路径的大气红外辐射亮度随天顶角的增大而增大,使得探测到的目标的亮度增大。当增大的因素占主导地位时,便表现出目标随距离的增大而增亮这一看似反常的现象。文中深入探究影响红外目标探测亮度的各项因素,不仅合理地解释了实验现象,更重要的是,对影响红外目标探测亮度诸因素的透彻认识,能为设计更有效的目标提取算法。当一个点目标同时分布在几个探测器单元上时,可能每个单元探测到的信号都淹没在噪声中,但采用合适的目标提取算法,使几个单元的信号累积起来,目标就可能从噪声中凸现出来。显然这对于红外目标的搜索、跟踪系统具有十分重要的意义。

参 考 文 献:

- [1] Li Guohua, Wu Lixin, Wu Miao, et al. Current status and application of infrared thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 227-230. (in Chinese)
李国华, 吴立新, 吴森, 等. 红外热像技术及其应用的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 227-230.
- [2] Cai Yi, Hu Xu. State of the art and future trend of detectors for infrared imaging seekers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 7-11. (in Chinese)
蔡毅, 胡旭. 红外成像寻的用红外探测器的现状和发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 7-11.
- [3] Gao Chenqiang, Tian Jinwen, Wang Peng. Detection algorithm for infrared moving small target based on temporal domain characteristics analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 907-910. (in Chinese)
高陈强, 田金文, 王鹏. 基于时域特性分析的红外运动小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 907-910.
- [4] Wang Jiang'an, Min Xianglong, Cao Lihui. Research on algorithm of infrared background suppression for segmenting and detecting point target [J]. *Laser and Infrared*, 2008, 38(11): 1144-1148. (in Chinese)
王江安, 闵祥龙, 曹立辉. 红外背景抑制与点目标分割检测算法研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(11): 1144-1148.
- [5] Zhang Rong, Chen Xingwu, Zhuo Hongyan, et al. Detection algorithm for moving infrared point target in the sky [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(5): 472-475. (in Chinese)
张蓉, 陈兴无, 卓红艳, 等. 空中红外运动点目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(5): 472-475.
- [6] Zhang Hong, Ma Caiwen. A detecting algorithm for IR moving point-source target based on image flow analysis [J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2006, 26(4): 269-271. (in Chinese)
张红, 马彩文. 基于图像流分析的红外运动点目标检测算法[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(4): 269-271.
- [7] Liu Yang, Jiao Shuhong, Liu Yunhe. The study of fast detecting method for small infrared moving target [J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2008, 28(3): 228-232. (in Chinese)
刘洋, 焦淑红, 刘云鹤. 红外运动小目标快速检测算法的实现研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(3): 228-232.
- [8] Jiang Junwei, Zhao Yiqiang, Meng Fanzhong, et al. High performance readout integrated circuit for IR detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38 (5): 787-791. (in Chinese)
姜俊伟, 赵毅强, 孟范忠, 等. 红外探测器高性能读出电路研究[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 787-791.
- [9] Xuan Yimin, Han Yuge. Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Background [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
宣益民, 韩玉阁. 地面目标和背景的热红外特性 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [10] Zhang Jingxian, Li Yudan, Jing Weiqi, et al. Light and Infrared Imaging Technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. (in Chinese)
张敬贤, 李玉丹, 金伟其, 等. 微光与红外成像技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [11] Liao Mengjiao. Creation, simulation and transmittal of infrared radiation image [D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2001. (in Chinese)
廖猛蛟. 飞机红外辐射图像生成、仿真与传输研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
- [12] Wu Beiyong, Li Wei, Chen Hongbin, et al. Atmospheric Radiation Transmission Practical Algorithm [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1998. (in Chinese)
吴北婴, 李卫, 陈洪滨, 等. 大气辐射传输实用算法 [M]. 北京: 气象出版社, 1998.