

红外成像系统的作用距离计算与软件实现

柴松均

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 130033)

摘要: 阐述计算红外成像系统对点目标作用距离的方法, 以及各自计算模型的特点和局限性。从能量角度编写基于小哈德逊公式的计算软件, 包括计算目标辐射强度、计算作用距离, 并给出计算实例。

关键词: 红外成像系统, 作用距离, 计算软件。

中图分类号: TN219, TP391.41

文章编号: 1000-0755(2024)05-0192-02

文献引用格式: 柴松均. 红外成像系统的作用距离计算与软件实现[J]. 电子技术, 2024, 53(05): 192-193.

Analysis of Calculation and Software Realization of the Operating Range of Infrared Imaging System

CHAI Songjun

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Jilin 130033, China.)

Abstract — This paper expounds the different methods for calculating the operating range of infrared imaging system on point targets, as well as the characteristics and limitations of their respective calculation models, develops a calculation software based on the Hudson formula from an energy perspective, and provides a calculation example.

Index Terms — infrared imaging system, operating range, calculation software.

0 引言

作用距离是评价红外成像系统探测性能的重要指标之一, 它指的是特定目标辐射的能量在大气等介质中传播一段距离后被红外成像系统接收, 若此时的目标能量大于探测阈值, 则称此传播距离为系统对目标的作用距离。在设计红外系统之前, 通常会根据作用距离对系统各参数指标进行相应的分析和调整, 因此对于红外成像系统作用距离计算方法的研究具有重要的理论和实践意义。

红外成像系统的作用距离除了受自身光学系统和探测器性能的影响, 还与观测目标及大气传输特性有关。因此, 根据各个影响因素建立合理准确的数学模型是估算作用距离的关键。

1 红外成像系统作用距离计算方法

当目标距离较远, 其对系统的张角远小于光学系统视场时, 理想成像像点尺寸仅占一个像元, 可认为目标为点目标^[1]。但由于受光学系统像差、衍射及大气扰动的影响, 目标实际成像时会占据多个像元^[2]。工程上把占据81个像元以下的目标定义为点目标。目前, 针对点目标的作用距离计算方法主要有三种: 基于能量的方法、基于噪声等效温差的方法和基于成像对比度的方法。

1.1 基于能量的方法

目标在红外波段的辐射能量通过大气等介质传输, 会产生衰减, 再经过光学系统最终入射到红外

探测器上, 探测器在完成光电转换和信号处理后输出红外图像。首先假设目标与光学系统的距离为R, 其辐射强度为I, 传播路径内的大气平均透过率为 τ_a , 到达接收端的光谱辐射照度E为式(1)。

$$E = \frac{I\tau_a}{R^2} \quad (1)$$

光学系统的有效接收面积为 A_0 , 光学透过率为 τ_0 , 目标的能量产生弥散, 平均分布在N个像元上, 则探测器能接收到的功率为式(2)。

$$P = \frac{EA_0\tau_0}{N} \quad (2)$$

红外成像系统的信噪比定义为信号电压均方根 V_s 与噪声电压均方根 V_n 的比值, 如式(3)。

$$SNR = \frac{V_s}{V_n} \quad (3)$$

探测器的光谱响应率为式(4)。

$$R_\lambda = \frac{V_s}{P} \quad (4)$$

则信号电压均方根值为式(5)。

$$V_s = R_\lambda P = R_\lambda \frac{EA_0\tau_0}{N} = \frac{R_\lambda I\tau_a A_0\tau_0}{NR^2} \quad (5)$$

探测器的探测率D为式(6)。

$$D = \frac{R_\lambda}{V_n} \quad (6)$$

比探测率 D^* 表示为式(7)。

作者简介: 柴松均, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所; 研究方向: 光学设计。

收稿日期: 2024-03-22; 修回日期: 2024-05-12。

$$D^* = D\sqrt{A_d\Delta f} = \frac{R_i}{V_n}\sqrt{A_d\Delta f} \quad (7)$$

其中, A_d 为探测器单个像元面积, Δf 为系统噪声等效带宽, 其与探测器积分时间直接相关。

因此系统信噪比可以表示为式(8)。

$$SNR = \frac{V_i}{V_n} = \frac{D^* I_{a_0} \tau_a \tau_o}{NR^2 \sqrt{A_d \Delta f}} \quad (8)$$

可得到作用距离, 如式(9)。

$$R^2 = \frac{I_{a_0} D^* \tau_a \tau_o}{N \cdot SNR \sqrt{A_d \Delta f}} \quad (9)$$

该计算方法的原理是基于目标辐射能量的传播与接收, 从计算方程可以看出, 其较为全面的考虑了影响作用距离的多个因素, 包括目标辐射强度大小、光学系统和红外探测器的性能、传播路径的损耗等。但其忽略了目标与背景的温差及背景辐射对目标的影响, 因此其计算结果与实际相比往往偏大。在目标温度较高, 与背景温差较大时, 此方法的计算值与实际观测结果最接近。

1.2 基于噪声等效温差的方法

噪声等效温差(NETD)是评价红外成像系统性能的一个重要指标, 是表征系统受信噪比限制时对温度分辨率的一种度量, 其定义为: 将温度均匀的物体置于温度均匀的背景中, 当被观察物体的峰值电压 V_s 和噪声的均方根 V_n 相等, 即信噪比为1时, 物体与背景的温差, 表示为式(10)。

$$NETD = \frac{\Delta T}{V_i / V_n} \quad (10)$$

红外探测器通常会给出NETD值, 在计算成像系统整体NETD时还要考虑光学系统传递函数的影响, 系统对某一目标的最大探测距离要求探测到的温差要大于或等于噪声等效温差, 作用距离为式(11)。

$$R = \sqrt{\frac{\Delta T \tau_a \tau_o A_d f^2}{NETD \cdot SNR \cdot A_d}} \quad (11)$$

其中, f 为光学系统焦距, A_t 为目标的面积。

多数红外探测器会给出NETD值而不是 D^* , 因此利用NETD的计算方法可以避免估算 D^* 所带来的误差; NETD的计算公式在推导过程中假定了目标与背景的温差较小, 当探测目标是导弹尾焰等高温目标时计算误差会显著增大, 所以该计算方法在实际应用中具有一定的局限性。

1.3 基于成像对比度的方法

目标在红外探测器中所成像的某一像元内接收到的辐射包括三个部分: 目标辐射 L_t 、背景辐射 L_a 及目标范围内的程辐射 L_p 。

通过探测器相关像元接收到的辐射功率及表观对比度关系导出作用距离方程为式(12)。

$$R = \sqrt{\frac{(L_t - L_a) A_d f^2 \tau_a}{L_a A_d K}} \quad (12)$$

其中, K 为系统最小可分辨的对比度。

基于成像对比度的计算方法考虑了背景辐射和程辐射的影响, 但由于目标像的弥散, 造成对比度偏离实际情况, 给作用距离的计算带来较大误差。

2 作用距离计算软件的编写

在工程实践中, 红外成像系统观测的目标多数是飞行器发动机喷口或导弹尾焰等高温目标, 基于目标辐射能量的计算方法更加准确, 最为常用。为了计算方便, 编写的基于对话框的Windows计算程序如图1。现对软件功能和各计算参数做如下介绍。



图1 作用距离计算软件

(1) 计算目标辐射强度。在计算作用距离之前, 需掌握目标的尺寸、温度、材料等信息, 软件根据输入的目标辐射投影面积、温度、表面平均发射率及起止波段, 利用普朗克辐射公式计算其辐射强度。

(2) 计算作用距离。除了目标的辐射强度, 还要通过分析计算得到大气透过率以及若干参数值: 包括光学系统入瞳面积和透过率值, 探测器的像元尺寸、比探测器率和积分时间; 根据物像关系及预估的距离推算目标所占像元数; 最后给出系统的信噪比限定。

(3) 计算实例。现计算某200mm口径透射式中波红外成像系统对典型飞行器的作用距离: 该飞行器的尾喷口直径约0.5m, 尾焰温度600K; 探测器为像元尺寸 $15\mu\text{m}$ 的HgCdTe中波红外焦平面阵列; 在海拔高度300m的内陆地区, 水平能见度大于23km, 系统工作仰角为 15° 。如图1所示, 根据目标特性计算其中波辐射强度为 38.9W/sr , 输入左侧对话框; 给定大气条件下的大气平均透过率为0.23; 光学系统透过率为0.65; 根据探测器材料推算出比探测率为 $3.5 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$; 依据目标尺寸及物像关系, 估算目标所占像元数 N 为9; 探测器积分时间取2ms, 系统信噪比限定为6; 输入以上计算参数, 计算作用距离结果为63km, 与工程实践经验值相对, 误差在合理范围内。

3 结语

本文介绍了计算红外成像系统对点目标作用距离的三种方法, 根据计算模型的特点分析了不同方法的优劣势和局限性; 基于目标能量的模型编写了计算程序并给出计算实例。

参考文献

- [1] 杨宜禾, 岳敏, 周维真. 红外系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [2] 赵丽, 杨国庆, 李周, 等. 红外系统点目标作用距离计算方法分析与实例[J]. 红外技术, 2022, 44(12): 1273-1277.