

文章编号: 1672-8785(2012)11-0008-06

论红外探测系统的作用距离(上)

王忆锋 史衍丽 马 钰

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘 要: 红外探测系统包括用于点源目标的探索系统和用于扩展源目标的热成像系统。作为一个系统级的性能描述参数, 作用距离可用于表征探测过程的质量。探测器作用距离方程取决于目标是点源还是扩展源, 同时还取决于所期望的是辐射能量形式还是光子形式。介绍了不同条件下的作用距离方程。讨论了系统参数(比如光学系统的 $F/\#$ 、直径和探测器张角等)对搜索系统和热成像系统作用距离的影响。介绍了对红外探测系统作用距离的理解和体会。

关键词: 红外探测系统; 红外探测器; 作用距离; 性能分析

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.11.002

On the Operating Range of Infrared Detection Systems (I)

WANG Yi-feng, SHI Yan-li, MA Yu

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Infrared detection systems include the systems for detecting point targets and the thermal imaging systems for detecting extended source targets. As a system-level performance description parameter, the operating range can be used to characterize the quality of a detection process. The equation of the operating range for a detector depends on whether the source is a point one or an extended one. Besides, it also depends on whether the desired energy is a radiation energy form or a photon form. The operating range equations under different conditions are presented. The influence of system parameters, such as the $F/\#$ and diameter of optics and the field angle of a detector, on the operating range of both a search system and a thermal imaging system is discussed. Finally, the understanding and comprehension for the operating range of infrared detection systems are given.

Key words: infrared detection system; infrared detector; operating range; performance analysis

0 引言

作用距离是军用红外探测系统最重要的一个性能指标, 它涉及到从光学系统、探测器到信号处理等过程中的一系列参数。红外探测系统的观察对象有点源目标与扩展源目标之分。根据不同的观察任务, 对于扩展源目标, 作用距离可以分为探测 (detection) 距离、识别 (classification) 距

离和确认 (identification) 距离; 对于点源目标, 作用距离只有一种, 即探测距离。本文从基本概念入手, 对红外探测系统的作用距离进行深入分析和探讨, 并介绍我们对有关问题的理解和体会。

1 关于辐射量差值的计算

本文所说的辐射量, 包括以能量表示的辐

收稿日期: 2012-07-08

作者简介: 王忆锋 (1963-), 男, 湖南零陵人, 工学士, 高级工程师, 主要从事器件仿真研究。

E-mail: wangyifeng63@sina.com

射量值和以光子数表示的辐射量值。根据普朗克定律, 温度为 T 的黑体在波长 λ 处的光谱辐射度为

$$M_b(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/k_B \lambda T) - 1} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (1)$$

式中, h ($=6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) 为普朗克常数, c ($=2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 为真空光速, k_B ($=1.381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$) 为玻耳兹曼常数。

光谱辐射度与(光谱)光子辐射度(即光子个数)之间存在以下关系:

$$Q_b(\lambda, T) = \frac{\lambda}{hc} M_b(\lambda, T) \\ = \frac{2\pi c}{\lambda^4 [\exp(hc/k_B \lambda T) - 1]} \quad (\text{个光子} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2)$$

这里的“个光子”只是为了叙述方便而引入的(文献[1]中与此相对应的表述是 photon), 并没有量纲上的意义。

设目标温度为 T_T , 背景温度为 T_B , 当目标与均匀背景之间的温差 $\Delta T = T_T - T_B$ 较小时, 有以下近似公式^[2]:

$$Q_b(\lambda, T_T) - Q_b(\lambda, T_B) \approx \frac{Q_b(\lambda, T_T) - Q_b(\lambda, T_B)}{\Delta T} \Delta T \\ = \left. \frac{\partial Q_b(\lambda, T)}{\partial T} \right|_{T=T_B} \Delta T \quad (3)$$

利用 MATLAB 的求导数函数 diff() 可以求出:

$$\frac{\partial Q_b(\lambda, T)}{\partial T} = \frac{2\pi hc^2}{k_B} \frac{\exp(hc/k_B \lambda T)}{T^2 \lambda^5 [\exp(hc/k_B \lambda T) - 1]} \quad (4)$$

式(4)是对温度 T 的微分, 我们不妨将其称为光子热导数。

文献中一般都没有提及 ΔT 如何取值才算温差较小。为了观察按式(3)计算时与基于式(2)计算时之间的误差, 设 $\lambda=10 \mu\text{m}$, $T_B=300 \text{ K}$, 计算结果见表 1。可见对于此例, 它们的结果是一致的。由此或可推测, 即使对于较大的温差 ΔT , 式(3)也是成立的。

事实上, 单独使用式(4)的时候很少, 通常会在一个波段积分中出现。例如:

$$\tilde{Q}_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [Q_b(\lambda, T_A) - Q_b(\lambda, T_B)] d\lambda \quad (5)$$

$$\tilde{Q}_2 = \Delta T \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left. \frac{\partial Q_b(\lambda, T)}{\partial T} \right|_{T=T_B} d\lambda \quad (6)$$

作为一个算例, $\tilde{Q}_1$ 和 $\tilde{Q}_2$ 的计算结果见表 2。可见两者之间的差值随着 ΔT 的上升而增大。对于编写程序而言, 按照式(5)和式(6)来计算并无多大区别, 但两者之间存在计算误差的问题。

2 作用距离计算中的若干基本关系

设黑体辐射面积为 A_b 。以目标辐射源为球心、以 R 为半径作一球面, 并在 R 处垂直设立一个面积为 A_R 的接收平面。设黑体辐射光子在整个球面上均匀分布, 则 A_R 上接收到的光子数为

$$Q_d(\lambda, T) = A_R \cdot \frac{A_b Q_b(\lambda, T)}{4\pi R^2} \quad (\text{个光子} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (7)$$

表 1 按式(3)计算时与基于式(2)计算时之间的结果比较 (个光子 $\cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)

$\lambda=10 \mu\text{m}$, $T_B=300 \text{ K}$	$T_T=303 \text{ K}$	$T_T=600 \text{ K}$	$T_T=1500 \text{ K}$
$Q_b(\lambda, T_A) - Q_b(\lambda, T_B)$	3.9322×10^8	3.9322×10^{10}	1.5729×10^{11}
按式(4)计算的结果	3.9322×10^8	3.9322×10^{10}	1.5729×10^{11}

表 2 $\tilde{Q}_1$ 和 $\tilde{Q}_2$ 计算结果的比较 (个光子 $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

$\lambda_1=8 \mu\text{m}$, $\lambda_2=12 \mu\text{m}$, $T_B=300 \text{ K}$	$T_T=303 \text{ K}$	$T_T=600 \text{ K}$	$T_T=1500 \text{ K}$
$\tilde{Q}_1$, 按定义公式(2)计算	3.0036×10^{20}	7.0001×10^{22}	4.8809×10^{23}
$\tilde{Q}_2$, 按近似公式(4)计算	1.5136×10^{20}	1.5136×10^{22}	6.0545×10^{22}

A_R 在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内接收到的光子数为

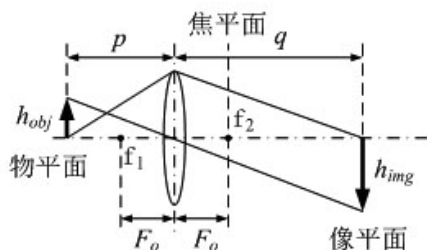
$$Q_d(\Delta\lambda, T) = A_R \cdot \frac{A_b}{4\pi R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_b(\lambda, T) d\lambda \quad (\text{个光子} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (8)$$

红外光电探测器是一种光(子)电(子)信号转换装置。设可检测电流阈值为 $I_{threshold}(A)$ 。假定一个光子可以产生并且只能产生一个电荷,即电子数与光子数一一对应,通过将 $I_{threshold}$ 除以电子的电荷量 $e (=1.6 \times 10^{-19} \text{A} \cdot \text{s})$ 就可以得到电流阈值所对应的光子数,即

$$Q_{d,threshold}(\Delta\lambda, T) = \frac{I_{threshold}}{e} \quad (9)$$

则由式(8)和式(9)可以写出:

$$R = \zeta \cdot \sqrt{Q_d(\Delta\lambda, T)} \quad (10)$$



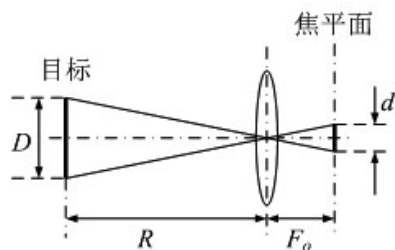
(a) 薄透镜的成像方程

式中, ζ 为一个比例因子, 其定义为

$$\zeta = \sqrt{\frac{1.6 \times 10^{-19} A_R A_b}{4\pi I_{threshold}}} = 1.284 \times 10^{-10} \sqrt{\frac{A_R A_b}{I_{threshold}}} \quad (11)$$

上述各式中的量纲均为米制单位。式(10)即为在给定可检测电流阈值的条件下, 红外探测系统的作用距离的计算公式, 其中没有引入任何衰减因素。

从式(7)和式(8)中可以看出, 接收面 A_R 越大, 接收到的光子数越多。若直接用 μm^2 量级的红外探测器光敏面(光敏面又称为像元, 以下简称探测器) A_d 去接收光子, 显然利用率太低。一般可通过一个光学透镜 A_o (mm^2 量级) 接收光子(即 $A_R = A_o$), 再将光子投射到 A_d 上。



(b) 目标足够远时, 成像在焦平面上

图 1 透镜成像的示意图

引入透镜 A_o 后就构成了一个成像系统, 如图 1(a) 所示。根据几何光学原理, 有以下成像关系^[1]:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{F_o} \quad (12)$$

式中, p 为物体距透镜的距离(对透镜的左侧定义为正值), q 为透镜距像的距离(对透镜右侧定义为正值)。 F_o 称为焦距, f_1 称为(前)焦点, f_2 称为(后)焦点, 焦点所在的平面称为焦平面。

另外还有

$$\widetilde{M} \cong \frac{h_{img}}{h_{obj}} = -\frac{q}{p} \quad (13)$$

式中, $\widetilde{M}$ 为放大率, 它是目标像高度 h_{img} 与目标实际高度 h_{obj} 之比(两个高度均定义为光轴上

的正值)。因为这些量值定义中包括符号, 而且单透镜会产生倒像, 所以在式(13)中有一个负号。

设透镜为圆形, 直径为 D_o , F_o 与 D_o 之比称为光学系统的 F 数, 记为 $F/\#$, 并有

$$F/\# = \frac{F_o}{D_o} \quad (14)$$

因为 D_o 越大, 落到探测器光敏面上的光子数越多, 所以光学系统的 $F/\#$ 通常应尽可能得低^[1]。在透镜的实际制造过程中, 考虑到像差控制及成本等因素, 一般希望 $F/\#$ 至少等于 2^[3]。

对于式(12), 通常考虑的一种极限情况是, 当 $p \rightarrow \infty$ 时, 有 $q \rightarrow F_o$, 即无穷远的目标成像

在焦点处。若把一个探测器摆在焦点上, 即可构成所谓的焦平面探测器。在实际应用中, 人们将“无穷远”这一条件演变为“足够远”, 这时取 $q \approx F_o$, 即目标成像在焦平面上, 如图 1(b) 所示。

从式 (13) 中可以写出以下关系:

$$\left| \frac{h_{img}}{q} \right| = \left| -\frac{h_{obj}}{p} \right| \quad (15)$$

据此, 对于图 1(b) 所示的成像关系, 从数值计算的角度可以写出:

$$\frac{D}{R} = \frac{d}{F_o} \quad (16)$$

式中, D 为目标尺度, d 为探测器尺度。在理想情况下, 式 (16) 给出了系统空间分辨率所对应的最大作用距离。式 (16) 基于面积可以写为^[1]:

$$\frac{A_d}{A_b} = \left(\frac{F_o}{R} \right)^2 \quad (17)$$

式 (16) 等号左边是目标张角, 右边是探测器张角。假设焦距固定, 则探测器张角 d/F_o 是不变的。设想用一个红外探测系统观察一个由远而近运动的目标。由于目标尺度 D 不变而距离 R 逐渐变小, 所以 D/R 即目标张角处于一个由小变大的过程, 具体可以分为三种情况:

(1) $D/R < d/F_o$, 这时目标张角小于探测器张角, 目标为点源, 所成的像不能覆盖探测器。有一种观点认为, 只要在比源本身尺度大 30 倍的距离上进行观测, 即可把辐射源视为点源^[4]。点源的细节信息是不可分辨的^[1]。

(2) $D/R = d/F_o$, 这时目标张角与探测器张角相等, 目标成像面积恰好覆盖探测器, 来自目标的辐射全部被探测器接收。

(3) $D/R > d/F_o$, 这时目标张角大于探测器张角, 目标为扩展源, 目标成像面积大于探测器面积, 探测器接收到的辐射量不变, 测试结果与距离无关。

张角有水平方向和垂直方向之分。设探测器为矩形, 尺寸大小为 a (水平方向) 和 b (垂直方向), 面积 $A_d = ab$ 。于是探测器的水平方向张角 α 和垂直方向张角 β 可由式 (18) 求出:

$$\alpha = \frac{a}{F_o}, \quad \beta = \frac{b}{F_o} \quad (18)$$

α 和 β 的大小反映了红外成像系统空间分辨率的高低, 而空间分辨率则刻划出了系统分辨目标纹理细节的能力大小^[5]。 α 与 β 之积就是瞬时视场 (Instantaneous Field of View, IFOV), 即

$$\alpha\beta = \frac{ab}{F_o^2} = IFOV \quad (19)$$

实际器件一般不提 a 和 b 这两个参数, 取而代之的参数是像元中心 (间) 距 (pitch)。假定各像元等间距分布, 在填充系数为 1 的理想条件下, 中心距限定了探测器边长可能选取的最大值。但反过来, 由边长不易确定中心距。中心距小意味着边长小, 相应地可以减小光学系统直径和杜瓦体积, 减轻重量, 降低功率, 提高可靠性。法国 Sofradir 公司于 2012 年 4 月推出了中心距为 10 μm 的碲镉汞探测器样品。

[算例 1] 在红外系统的设计计算中, 飞机的典型尺寸一般取 6 ~ 8 m 宽和 3 m 高。当要求系统对飞机的迎头测量距离 $R \geq 30$ km 时, 若取 $R=30$ km, 飞机尺寸为 8 m $\times$ 3 m, 则飞机水平方向的张角 $\alpha=8$ m/30 km $=2.7 \times 10^{-4}$ rad, 垂直方向的张角 $\beta=3$ m/30 km $=1 \times 10^{-4}$ rad。若取焦距 $F_o=500$ mm, 则根据式 (18) 可算出 $a=135$ μm , $b=50$ μm 。反之, 若 $a=10$ μm , $F_o=500$ mm, 则有 $R=400$ km; 可见探测器越小, 空间分辨率越高, 作用距离越远。若 $a=10$ μm , $F_o=50$ mm, 则有 $R=40$ km。

3 作用距离与视场

光学系统的视场是指其角覆盖范围, 如图 2 所示。通常观察视场较大, IFOV 较小。用 IFOV 去划分观察视场, 对应的分辨单元数为

$$n = \frac{AB}{\alpha\beta} = \frac{AB}{ab} F_o^2 \quad (20)$$

式 (20) 表明, 红外系统的空间分辨率主要由 IFOV 决定, 另外还与系统的传递函数有关。

如图 3 所示, 若观察视场为 $A \times B$, 则 $A \times B$ 可划分为 $M \times N$ 个 IFOV, 其中 $M=A/\alpha$ 为行数, $N=B/\beta$ 为列数。一个探测器对应一个 IFOV。如果探测器数量 $< M \times N$, 那么要看完一遍观察视场, 就需要进行适当的扫描, 这就是所谓的扫描器件; 如果探测器数量 $= M \times N$, 那么“眨

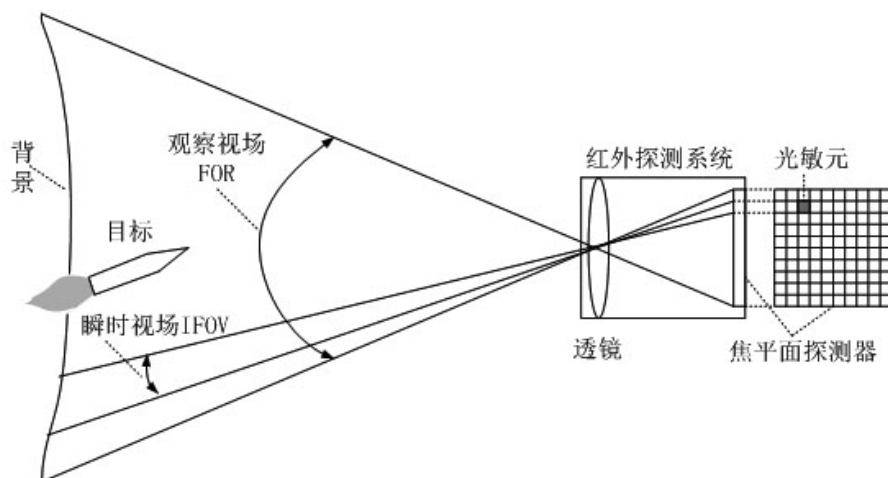


图 2 红外探测系统的观察视场与瞬时视场

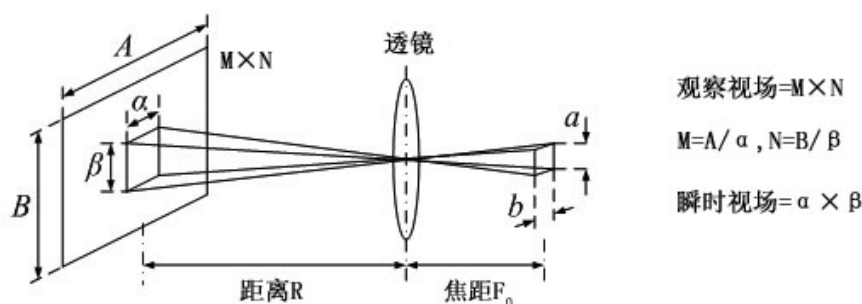


图 3 观察视场与瞬时视场的关系

眼”一次就可以看一遍观察视场，这就是所谓的凝视器件。

辐射量的分布是空间的函数。空间函数可以用空间频率来描述。空间频率既可以在线度内进行定义，也可以在角度内进行定义。单位空间线度内辐亮度的周期性变化的次数称为线空间频率，其单位为周·mm⁻¹；单位空间角度内辐亮度周期性变化的次数称为角空间频率，其单位为周·mrad⁻¹。以下简称为空间频率。考虑混迭影响时，探测器所对应的最大空间频率为^[3]

$$f_{T,max} = \frac{1}{2\alpha} \quad (21)$$

式中， $f_{T,max}$ 可能是一个非整数，一般将其整数部分设为目标的空间频率 f_T 。空间频率 f_T 是可实现的，因为它小于混迭分析下所允许的空间频率最大值 $f_{T,max}$ 。

式(19)是基于几何光学原理得到的定义。如果仅仅从该式出发，那么 IFOV 可以任意取值，

或者说，可以取得任意小的值。但实际上成像过程还受制于物理光学原理，即使是位于轴上的几何点光源，所成的像也不是一个几何点，而是一个有明亮中心的圆斑，外面环绕着若干明暗相间的环，通常称为弥散圆。弥散圆的中心圆斑称为艾利(Airy)圆。根据物理光学中的圆孔衍射原理，可以算出艾利圆占全部能量的83.78%，其直径为

$$d_{diffraction} = 2.44\lambda(F/\#) \quad (22)$$

艾利圆直径 $d_{diffraction}$ 所对应的张角 δ 为

$$\delta = \frac{d_{diffraction}}{F_o} = \frac{2.44\lambda(F/\#)}{F_o} = 2.44 \frac{\lambda}{D_o} \quad (\text{rad}) \quad (23)$$

弥散圆的大小对成像清晰度的影响相当大。影响弥散圆大小的因素有两类：一类是衍射；另一类是像差。光电成像系统一般使用像差较小的高质量光学组件，因此影响成像质量的主要因素通常是衍射效应。

通常把艾利圆作为物点通过理想光学系统的衍射像。由于衍射像有一定的大小, 若两个像点之间的距离太近, 则无法对其进行分辨。两个衍射像间所能分辨的最小间隔称为理想光学系统的衍射分辨率。一个光学系统可以得到的最佳性能称为衍射限性能。实验证明, 两个像点间能够分辨的最小间隔大约等于艾利圆的半径。因此由式 (23) 定义的 δ 又称为衍射限角分辨率, 它给出了分辨率的物理极限。由式 (18) 定义的探测器张角无论怎么变化取值, 均不能也不应该小于衍射限角分辨率。

δ 定义了系统的截止空间频率 f_{cutoff} , 即

$$f_{cutoff} = \frac{2.44}{\delta} \text{ (cyc} \cdot \text{rad}^{-1}) \quad (24)$$

类似地, 由式 (21) 定义的探测器的最大空间频率 $f_{T,max}$ 不应大于由式 (24) 定义的截止空间频率 f_{cutoff} 。

[算例 2] 在前面讨论的算例 1 中, 探测器工作波段未定, 因此只是基于几何光学原理进行分析, 这是一种最理想的情况。波段确定后就要考虑衍射的影响。

(1) 令探测器张角 $\alpha=\delta$, 则由式 (14)、式 (18) 和式 (23) 可以写出:

$$a = \alpha F_o = \delta D_o (F/\#) = 2.44\lambda (F/\#) \quad (25)$$

(2) 从式 (25) 中可以看出, 对于衍射限系统, 一旦探测器边长确定, $F/\#$ 和焦距 F_o 等参数也就随之确定了。

(3) 以垂直张角为例, 设定作用距离 R , 根据式 (16) 算出目标张角。

(4) 令目标张角等于探测器张角 α , 并令 $\alpha=\delta$, 根据式 (25) 求出 $F/\#$ 、焦距 F_o 和透镜直径 D_o 等参数 (结果见表 3 和表 4)。

表 3 计算结果 (观察 8 m×3 m 大小的飞机, $\Delta\lambda=8 \sim 12 \mu\text{m}$, 探测器边长 $a=10 \mu\text{m}$)

R (m)	50 km	100 km	200 km	300 km	400 km
目标张角 (rad)	6.0000×10^{-5}	3.0000×10^{-5}	1.5000×10^{-5}	1.0000×10^{-5}	7.5000×10^{-6}
$F/\#$	0.3415	0.3415	0.3415	0.3415	0.3415
焦距 F_o (m)	0.1667	0.3333	0.6667	1	1.3333
透镜 D_o (m)	0.4880	0.9760	1.9520	2.9280	3.9040

表 4 计算结果 (观察 8 m×3 m 大小的飞机, $\Delta\lambda=3 \sim 5 \mu\text{m}$, 探测器边长 $a=10 \mu\text{m}$)

R (m)	50 km	100 km	200 km	300 km	400 km
目标张角 (rad)	6.0000×10^{-5}	3.0000×10^{-5}	1.5000×10^{-5}	1.0000×10^{-5}	7.5000×10^{-6}
$F/\#$	0.8197	0.8197	0.8197	0.8197	0.8197
焦距 F_o (m)	0.1667	0.3333	0.6667	1	1.3333
透镜 D_o (m)	0.2033	0.4067	0.8133	1.2200	1.6267

(未完待续)

文章编号: 1672-8785(2012)12-0008-05

论红外探测系统的作用距离(下)

王忆锋 史衍丽 马 钰

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘 要: 红外探测系统包括用于点源目标的探索系统和用于扩展源目标的热成像系统。作为一个系统级的性能描述参数, 作用距离可用于表征探测过程的质量。探测器作用距离方程取决于目标是点源还是扩展源, 同时还取决于所期望的是辐射能量形式还是光子形式。介绍了不同条件下的作用距离方程。讨论了系统参数(比如光学系统的 $F/\#$ 、直径和探测器张角等)对搜索系统和热成像系统作用距离的影响。介绍了对红外探测系统作用距离的理解和体会。

关键词: 红外探测系统; 红外探测器; 作用距离; 性能分析

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.12.002

On the Operating Range of Infrared Detection Systems (II)

WANG Yi-feng, SHI Yan-li, MA Yu

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Infrared detection systems include the systems for detecting point targets and the thermal imaging systems for detecting extended source targets. As a system-level performance description parameter, the operating range can be used to characterize the quality of a detection process. The equation of the operating range for a detector depends on whether the source is a point one or an extended one. Besides, it also depends on whether the desired energy is a radiation energy form or a photon form. The operating range equations under different conditions are presented. The influence of system parameters, such as the $F/\#$ and diameter of optics and the field angle of a detector, on the operating range of both a search system and a thermal imaging system is discussed. Finally, the understanding and comprehension for the operating range of infrared detection systems are given.

Key words: infrared detection system; infrared detector; operating range; performance analysis

4 信噪比的导出

首先讨论点源目标的情况。从探测器的角度来看, 能量相同的光子之间是不可区分的^[1]。也就是说, 人们无法分辨出探测器接收到的光子到底是出自目标还是出自背景, 而且也很难判定某个光子发出点所在位置的空间坐标。换言之, 探测器接收到的总的光子数只是目标光子数和背景光子数两者的算术和。

背景光子数的平均值相当于基底信号或者参考信号。由于光子发射的随机性质, 光子数在某个值附近波动, 并呈现出某种变化或不确定性, 其方差值称为光子噪声, 记为 σ_{T_B} 。黑体辐射的光子噪声服从玻色-爱因斯坦统计分布。 σ_{T_B} 可以写为

$$\sigma_{T_B}^2 = \overline{Q}_{T_B}(\Delta\lambda, T_B) \left[\frac{\exp(hc/k_B \lambda T_B)}{\exp(hc/k_B \lambda T_B) - 1} \right]$$

收稿日期: 2012-07-08

作者简介: 王忆锋(1963-), 男, 湖南零陵人, 工学士, 高级工程师, 主要从事器件仿真研究。

E-mail: wangyifeng63@sina.com

$$\approx \bar{Q}_{T_B}(\Delta\lambda, T_B) \quad (26)$$

背景为扩展源, 引入积分时间 τ_i 后, 其光子数平均值为

$$\bar{Q}_{T_B}(\Delta\lambda, T_B) = \tau_i \alpha \beta A_o \tilde{Q}_3 \quad (27)$$

式中

$$\tilde{Q}_3 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_b(\lambda, T_B) d\lambda \quad (28)$$

目标光子数与背景光子数之差的平均值即为光子信号。点源目标经过透镜成像后仍然是一个点, 因此落在探测器上的光子数等于球面单位面积上的波段光子数之差乘以透镜面积和积分时间, 即

$$\Delta\bar{Q}_d(\Delta\lambda, \Delta T) = \frac{\tau_i A_o A_b}{4\pi R^2} \tilde{Q}_1 \quad (29)$$

式中, $\tilde{Q}_1$ 由式 (5) 定义。于是信噪比可由式 (30) 给出:

$$SNR = \frac{\Delta\bar{Q}_d(\Delta\lambda, \Delta T)}{\sigma_{T_B}} = \frac{A_o A_b \tau_i \tilde{Q}_1}{4\pi R^2 \sqrt{\tau_i \alpha \beta A_o \tilde{Q}_3}} \quad (30)$$

式中, $\tilde{Q}_1$ 由式 (28) 定义。作用距离为

$$R = \left\{ \frac{A_o A_b \tau_i \tilde{Q}_1}{4\pi SNR \sqrt{\tau_i \alpha \beta A_o \tilde{Q}_3}} \right\}^{1/2} \quad (31)$$

另外, 根据电压响应率 $R_v(\lambda)$, 光谱信噪比 $SNR(\lambda)$ 还可以表示为

$$SNR(\lambda) = \frac{v_{sig}(\lambda)}{v_n} = \frac{R_v(\lambda)P(\lambda)}{v_n} \quad (32)$$

式中, $v_{sig}(\lambda)$ 为光谱信号电压, $P(\lambda)$ 为光谱辐射功率, v_n 为噪声电压。

在理想情况下, 能被检测出的探测器的输出信号至少应该等于噪声值, 或者说, 探测器能够探测到的最小辐射功率应该对应于信噪比等于 1 时的辐射功率。此时, 辐射功率有一个专门的名称, 即噪声等效功率 (Noise Equivalent Power, NEP), 即

$$NEP(\lambda) = \frac{v_n}{R_v(\lambda)} \quad (33)$$

另有

$$\frac{D^*(\lambda)}{\sqrt{A_d \Delta f}} = \frac{1}{NEP(\lambda)} \quad (34)$$

$$P(\lambda) = \frac{A_o A_b}{4\pi R^2} [M_b(\lambda, T_T) - M_b(\lambda, T_B)] \quad (35)$$

综合上述关系, 可以写出

$$SNR = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} SNR(\lambda) d\lambda = \frac{A_o A_b}{4\pi R^2 \sqrt{A_d \Delta f}} \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) [M_b(\lambda, T_T) - M_b(\lambda, T_B)] d\lambda \quad (36)$$

以及

$$R = \left\{ \frac{A_o A_b}{4\pi SNR \sqrt{A_d \Delta f}} \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) [M_b(\lambda, T_T) - M_b(\lambda, T_B)] d\lambda \right\}^{1/2} \quad (37)$$

对于扩展源目标, 根据式 (17) 和式 (18) 可以写出:

$$A_b = \frac{A_d}{F_o^2} R^2 = \frac{a}{F_o} \cdot \frac{b}{F_o} \cdot R^2 = \alpha \beta R^2 \quad (38)$$

在式 (29) 中引入式 (38) 后, 可以得到:

$$\Delta\bar{Q}_d(\Delta\lambda, \Delta T) = \frac{\tau_i}{4\pi} \alpha \beta A_o \tilde{Q}_1 \quad (39)$$

于是信噪比可由式 (40) 给出:

$$SNR = \frac{\Delta\bar{Q}_d(\Delta\lambda, \Delta T)}{\sigma_{T_B}} = \frac{\tau_i \alpha \beta A_o \tilde{Q}_1}{4\pi \sqrt{\tau_i \alpha \beta A_o \tilde{Q}_3}} \quad (40)$$

可以看出, 式 (40) 中已经没有距离项 R , 即当目标张角大于瞬时视场时, 探测器接收到的光子数与其间的距离无关, 而且始终等于某一常数^[5]。因此, 对于扩展源来说, 仅仅基于辐射量还无法导出作用距离, 因此必须引入完成某一具体观察任务所需要的概率。

5 关于探测概率

扩展源目标的观察等级有探测、识别和确认之分, 如图 4 所示。其中的有关数值由 Johnson 准则给出。每一个观察等级对应于一个作用距离。在阴极射线管 (Cathode Ray Tube, CRT) 显示器上, 显示一对黑白线条需要两条电视线。因此, 完成 1 个空间频率周期需要 2 个像素 (1 个周期 = 1 个线对 = 2 条电视线或 2 个像素)。

对于探测任务而言, 不同探测概率下所对应的目标高度上的线对数、像素数以及信噪比见表 5。

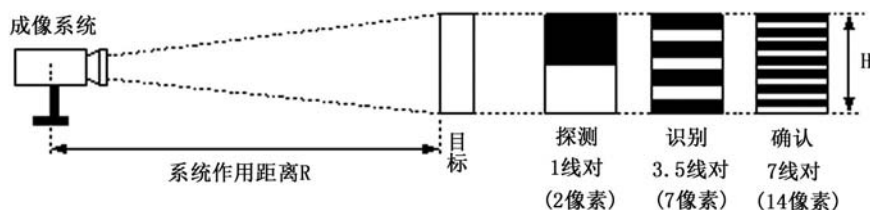


图 4 目标最小尺寸与一个条带图案的空间频率之间的关系

表 5 地面车辆探测概率与线对数、像素数和信噪比的关系 [6]

探测概率 P_d	线对数 $N_{linepair}$	像素数	信噪比 SNR_{dt}
1.0	3	6	5.5
0.95	2	4	—
0.9	—	—	4.1
0.80	1.5	3.0	3.7
0.50	1.0	2.0	2.8 (2.25*)
0.30	0.75	1.50	2.3
0.10	0.50	1.00	1.5

* 在美国陆军热成像系统静态模型中, 取 $SNR_{dt} = 2.25$ [6]

根据表 5 中所列的数据, 利用 MATLAB 的多项式拟合函数 $\text{polyfit}()$, 可以求出 $N_{linepair}$ 与 P_d 之间的函数关系:

$$N_{linepair}(P_d) = 241.57P_d^5 - 636.36P_d^4 + 614.36P_d^3 - 263.55P_d^2 + 49.34P_d - 2.25 \quad (41)$$

SNR_{dt} 与 P_d 之间的函数关系为

$$SNR_{dt}(P_d) = 152.78P_d^5 - 402.58P_d^4 + 394.788P_d^3 - 175.978P_d^2 + 37.328P_d - 0.83 \quad (42)$$

6 红外成像系统空间频率所对应的作用距离计算

从探测器的角度来看, 根据式 (16), 目标对透镜构成的张角 α_{target} 为

$$\alpha_{target} = \frac{H}{R} \quad (mrad) \quad (43)$$

根据 Johnson 准则, 设不同观察等级所要求的目标等效线对数为 $N_{linepair}$ 。该值除以 α_{target} 即为所要求的空间频率。令该值等于探测器的空间频率, 根据式 (18) 和式 (21) 可以写出:

$$\frac{N_{linepair}}{\alpha_{target}} = f_T = \frac{1}{2\alpha} = \frac{F_o}{2\alpha} \quad (44)$$

于是有

$$R = \frac{F_o H}{2\alpha N_{linepair}} \quad (45)$$

对于表 5 中未列出的 $N_{linepair}$ 值, 可以按照式 (41) 计算。从式 (41) 中可以看出, 不同的观察任务所对应的作用距离不同。

式 (45) 是一个基于 Johnson 准则的作用距离计算公式。我们注意到, 由式 (16) 可以导出:

$$R = \frac{F_o H}{\alpha} \quad (46)$$

式 (46) 是一个基于几何光学原理的作用距离计算公式。将其与式 (45) 比较后可以看到, 两者的差异只是式 (45) 的分母中多了一个大于 1 的常数项, 使作用距离缩短了。这一点和人们的常识是吻合的, 即目标越近, 被看得越清楚。

式 (45) 回答了这样一个问题, 即在一定参数条件下, 作用距离有多远? 其反问题是, 对于给定的作用距离, 需要有什么样的系统参数? 由式 (45) 可以写出:

$$F_o = \frac{2\alpha N_{linepair} R}{H} \quad (47)$$

从式 (47) 中可以看出, 焦距 F_o 与不同观察任务所对应的线对数 $N_{linepair}$ 相关。如果焦距 F_o 是固定的, 那么对于一种观察任务是最优的 F_o , 对于其他观察任务未必就是最优的。换言之, F_o 的选择应该兼顾各种观察任务, 而且最好是可以自适应自动调节焦距。

7 噪声等效温差所对应的作用距离计算

噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 是一个实验室测试参数 [2], 适用于扩展源目标。NETD 是信噪比 $SNR=1$ 时的温差, 这时由式 (40) 可以导出:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_b(\lambda, T_T) d\lambda = \tilde{Q}_3 + \frac{4\pi}{\sqrt{\tau_i \alpha \beta A_o}} \sqrt{\tilde{Q}_3} \quad (48)$$

式 (48) 是一个积分方程, 方程右端为常数。利用 MATLAB 逐步逼近 [7] 求出 T_T 后, 再将其与 T_B 相减, 其差值即为 NETD。

由式 (6) 可以导出:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{4\pi \sqrt{\tilde{Q}_3}}{\sqrt{\tau_i \alpha \beta A_o} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial Q_b(\lambda, T)}{\partial T} \Big|_{T=T_B} d\lambda} \\ &= NETD(T_B) \end{aligned} \quad (49)$$

式 (49) 中给出 $NETD(T_B)$ 是为了强调噪声等效温差是背景温度的函数。如果已知积分时间 τ_i 、瞬时视场以及透镜面积等参数, 那么可以利用式 (48) 或式 (49) 计算 NETD。

可以导出与不同参数相对应的 NETD 函数表达式 [1-3,5-6], 例如 [1]:

$$NETD(T_B) = \frac{4\sqrt{\Delta f_{noise}}(F/\#)^2}{\sqrt{A_d D^*} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_b(\lambda, T)}{\partial T} \Big|_{T=T_B} d\lambda} \quad (50)$$

[算例 3] 设 $\Delta\lambda=8 \sim 12 \mu\text{m}$, $D^*=2 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, $NETD=0.1 \text{ K}$, 系统视场为 1° 。单元探测器的尺寸为 $a=b=50 \mu\text{m}$, 识别 $2.3 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ 的北约标准坦克 (识别距离 $R=2 \text{ km}$), 确定在帧频 $f_{frame}=30 \text{ Hz}$ 下的 D_o 。

(1) 确定焦距。对于识别, $f_T=4 \text{ cycles/mrad}$ 。根据式 (45), 可以算出焦距 $F_o=34.78 \text{ cm}$ 。

(2) 确定瞬时视场。根据式 (18) 求出 $\alpha=0.14376 \text{ mrad}$ 。

(3) $1^\circ (\approx 17.5 \text{ mrad})$ 的系统视场内约有 128 个 $\alpha=0.14376 \text{ mrad}$ 的张角, 故可取像元数 $N=128$ 。因此驻留时间为

$$\tau_d = \frac{1}{f_{frame} N^2} = \frac{1}{30 \times 128^2} = 2.0345 \times 10^{-6} \text{ s}$$

(4) 探测器的信号带宽 Δf 为 [1]

$$\Delta f = \frac{1}{2\tau_d} = \frac{1}{2.0345 \times 10^{-6}} = 2.4576 \times 10^5 \text{ Hz}$$

(5) 根据式 (50) 可以求出 $F/\#=1$ 。

(6) 根据式 (14) 可以得到 $D_o=34.78 \text{ cm}$ 。

(7) 如果用 128×128 元 FPA 器件代替单元器件, D^* 保持不变, 这时驻留时间等于帧时间, 即 $\tau_d=1/f_{frame}=1/30 \text{ s}$, $\Delta f=1/2\tau_d=15 \text{ Hz}$; 由式 (50) 可算出 $F/\#=11$; 根据式 (14) 可得 $D_o=3.2 \text{ cm}$; 根据式 (23) 可得衍射限分辨率 $\delta=0.61 \text{ mrad}$, 该值大于前面计算出来的瞬时视场值, 因此需要对有关设计参数作出调整。

8 红外成像系统温度灵敏度所对应的作用距离计算

人眼通过红外成像系统观察目标的基本条件是, 对于空间频率为 f_T 的目标, 它与背景的实际等效温差在经过大气衰减到达红外成像系统时, 仍大于或者等于系统对应该频率的最小可分辨温差 $MRTD(f_T)$, 即

$$\Delta T_a(R) = \Delta T \exp(-\gamma R) \geq MRTD(f_T) \quad (51)$$

式中, ΔT_a 为经大气衰减后目标与背景的视在 (apparent) 温差; ΔT 为零视距时目标与背景之间的等效黑体温差; γ 为距离 R 上的平均大气消光系数 (km^{-1})。对于原理性的简化系统计算, 经常取 $\gamma=0.25 \text{ km}^{-1}$ [6]。计算时一般取等号的情形, 即求解式 (52):

$$\Delta T \exp(-\gamma R) = MRTD(f_T) \quad (52)$$

这是一个超越方程。只要知道 $MRTD(f_T)$ 的具体数值,即可简单地利用 MATLAB 的 solve() 命令求解。

$MRTD$ 涉及较多机理,反映在计算上就是一系列数学公式的耦合或综合。 $MRTD$ 具有不同的表述形式,但它们在本质上都是相同的。红外成像系统有光机扫描系统与凝视系统之分,两者的 $MRTD$ 均可按式 (53) 计算^[5]:

$$MRTD(f_T) = 0.66SNR_T \times \frac{NETD(T_B)f_T\sqrt{bf_{tc}c}}{MTF_{system}(f_T)F_o\sqrt{\Delta f_{noise}f_{frame}t_{eye}}} \quad (53)$$

式中, SNR_T 为不同探测概率所对应的信噪比,如表 1 所示;对于表 1 中未列出的数值,可以按照式 (42) 计算; t_{eye} 为人眼积分时间,多数研究结果所得出的 t_{eye} 值在 0.1 ~ 0.25 s 之间^[5],其中以 $t_{eye}=0.25$ s 用得最多^[6]; f_{frame} 为帧频; c 为水平方向上光敏元之间的间距; f_{tc} 为 CCD 输出转移区时钟频率; T_B 为背景温度。

Δf_{noise} 为噪声等效带宽,凝视系统的噪声等效带宽可以按式 (54) 计算:

$$\Delta f_{noise} = \frac{\pi f_{frame}}{4\eta_{ftime}}N \quad (54)$$

式中, η_{ftime} 为凝视系统的帧时效率; N 为 FPA 器件的光敏元数。

式 (53) 中的 $MTF_{system}(f)$ 为系统的调制传递函数,可按式 (55) 计算:

$$MTF_{system}(f) = MTF_{diff}(f) * MTF_{det}(f)MTF_{elec}(f)MTF_{eye}(f) \quad (55)$$

式中, $MTF_{diff}(f)$ 为衍射限光学系统的调制传递函数:

$$MTF_{diff}(f) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{f}{f_{cutoff}} \right) - \frac{f}{f_{cutoff}} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{cutoff}} \right)^2} \right] \quad (56)$$

$MTF_{det}(f)$ 为探测器的调制传递函数:

$$MTF_{det}(f) = \frac{\sin(\pi\alpha f)}{\pi\alpha f} \quad (57)$$

$MTF_{elec}(f)$ 为电子处理学系统的调制传递函数:

$$MTF_{elec}(f) = \left[1 + \left(\frac{f}{f_{cutoff}} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (58)$$

$MTF_{eye}(f)$ 为人眼的调制传递函数^[8]:

$$MTF_{eye}(f) = \exp \left(-\frac{\zeta f}{M} \right) \quad (59)$$

式中, ζ 为显示器亮度的函数,通常 $\zeta \approx 0.9$; M 为系统的放大系数。

9 结束语

上述讨论与分析没有考虑大气透过率和透镜光学材料的透过率。引入透过率就是要在有关光谱积分项中再引入相应的系数函数。严格意义上的透过率是波长 λ 的函数,实用中常取一个平均值即将透过率作为常数来处理。不管是引入函数还是引入常数,对于 MATLAB 编程计算来说,并不会增加多少工作量。

不同波段红外探测系统作用距离的比较时常是人们比较感兴趣的一个问题。在相同条件下进行比较所得到的结果才有意义。实用器件一般会给出 NETD 的值。 $MRTD$ 的计算也要用到 NETD。由于 NETD 是背景温度的函数,NETD 这一性能指标本身就存在一个可比性的问题。从逻辑上来说,在比较不同波段器件的作用距离时,应选用同一背景温度下的 NETD 值。

参考文献

- [1] Dereniak E L, Boreman G D. Infrared Detectors and Systems [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [2] Campana S B. Infrared & Electro-Optical Systems Handbook (Volume 4): Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [3] Larry A K, Lawrence A K. Millimeter-Wave and Infrared Multisensor Design and Signal Processing [M]. Norwood: Artech House, Inc, 1997.
- [4] 吴宗凡, 柳美琳, 张绍举, 等. 红外与微光技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [5] 杨宜禾, 岳敏, 周维真. 红外系统 (第二版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [6] Campana S B. Infrared & Electro-Optical Systems Handbook (Volume 5): Passive Electro-Optical Systems [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [7] 王忆锋, 毛京湘. 用 MATLAB 实现普朗克函数积分的快速计算 [J]. 红外, 2008, 29(51): 12-14.
- [8] Ballik E A, Wan W. Development and Analysis of a Simple Model for an IR Sensor [C]. SPIE, 1991, 1488: 249-256.