

文章编号: 1672-8785(2011)06-0034-05

基于探测距离的军用红外探测器分类

王忆锋 余连杰 陈 洁 何雯瑾

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘 要: 介绍了在引入地球半径的理想条件下计算红外探测器最大探测距离 (L) 的方法。指出最大探测距离与探测器所在位置的高度以及点源目标的高度密切相关。根据探测距离的量值, 可以将军用红外探测器分为 3 类: 第 I 类, 探测距离 $L < 50 \text{ km}$; 第 II 类, $50 \text{ km} \leq L < 500 \text{ km}$; 第 III 类, $500 \text{ km} \leq L < 1500 \text{ km}$ 。

关键词: 红外探测器; 探测距离; 分类

中图分类号: TN30 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.06.008

Classification of Military Infrared Detectors Based on Detection Range

WANG Yi-feng, YU Lian-jie, CHEN Jie, HE Wen-jin

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: A method for calculating the longest detection range (L) of an infrared detector under an ideal condition is presented. The longest detection range (L) is closely related to the position of the infrared detector and the altitude of the point object source. Therefore, the military infrared detectors can be classified into three types according to their detection range values. The infrared detectors having the detection range $L < 50 \text{ km}$ are classified as type I. The infrared detectors having the detection range $50 \text{ km} \leq L < 500 \text{ km}$ are classified as type II. The infrared detectors having the detection range $500 \text{ km} \leq L < 1500 \text{ km}$ are classified as type III.

Key words: infrared detector; detection range; classification

0 引言

对于军用红外探测系统来说, 作用距离是最重要的性能参数之一。作用距离包括探测距离、识别距离和确认距离^[1], 三者依次递减, 并以探测距离 (L) 最大。本文介绍了理想条件下的最大探测距离的计算方法, 并分析了探测距离与点源目标光子数之间的关系, 同时提出基于探测距离 L 的大小可将红外探测器分为 3 类。其中, $L < 50 \text{ km}$ 的探测器为 I 类探测器; $50 \text{ km} \leq L < 500 \text{ km}$ 的探测器为 II 类探测器; $500 \text{ km} \leq L < 1500 \text{ km}$ 的探测器为 III 类探测器。

1 理想条件下的最大探测距离的计算

简单地说, 本文所称的理想条件是指从一点投射出的光线只要不被物体遮挡, 即可到达任意远处的任意一点的情况。

从探测器的角度来看, 目标黑体辐射源可以简化分成点源和扩展源两类。两者是按照辐射源线度尺寸与接收面距离的比例来区分的。一般认为, 当目标与探测器之间的距离比目标的线度尺寸大 30 倍以上时, 可将目标看作点源^[2]。显然, 从实用意义上讲, 在分析军用红外探测系统的作用距离时, 目标均可以视为点源。本

收稿日期: 2011-04-05

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

文根据地(海)面目标的几何结构的最大高度, 将其进一步简化成在该高度上的一个点源目标。例如, 北约标准坦克的尺寸为 $2.3 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ [1], 我们可将其视为距地面高度为 2.3 m 的一个点源。这样处理的好处是, 所有点源目标均可以被纳入一个与地球同心的圆周轨道, 而其区别只是状态不同, 比如说可能是静止的或者运动的, 可能是低速运动的或者高速运动的。

视场是指光电探测器的角覆盖范围。在理想情况下, 目标进入视场即可被探测或发现。在大距离下, 小角度视场可以用一条视线来替代, 如图 1 所示(注: 该图未考虑实际尺寸的比例)。其中, 将地球视为一个半径 $R = 6378.24 \text{ km}$ 的圆, 并以地球圆心为原点取直角坐标系。

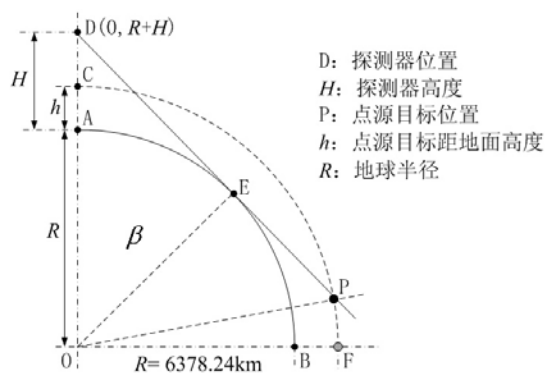


图 1 考虑地球半径后, 红外探测器视线与点源目标之间的几何关系

在图 1 中, 假定点源目标 P 距地面的高度为 h 。如果它是地面目标或海面目标, 可以将其

$$\begin{cases} x_P = \frac{\left[r_H^2 - r_h y_E + \sqrt{-x_E^2 (r_H^2 - r_h^2) + r_h^2 (r_H - y_E)^2} \right] x_E}{x_E^2 + (r_H - y_E)^2} \\ y_P = \frac{(y_E - r_H) \sqrt{-x_E^2 (r_H^2 - r_h^2) + r_h^2 (r_H - y_E)^2} + r_H x_E^2}{x_E^2 + (r_H - y_E)^2} \end{cases} \quad (4)$$

(3) 得到 $P(x_P, y_P)$ 后, 根据解析几何公式可知, 线段 DP 的长度为

$$DP = \sqrt{(x_D - x_P)^2 + (y_D - y_P)^2} \quad (5)$$

最大几何高度作为 h 值。以 $R + h$ 为半径画一个地球的同心圆, 该同心圆为点源的运动轨迹。从探测器所在位置 D 点引一条视线与地球圆周相切, 切点为 E。该切线与点源运动轨迹的交点为 P。基于平面几何和解析几何方法, 可以求出 P 点的坐标, 则线段 DP 的长度就是理想条件下的最大可探测距离。具体步骤如下:

(1) 从探测器所在位置 $D(0, R + H)$ 向圆周引一条切线, 切点坐标为 $E(x_E, y_E)$ 。由于 $\triangle OED$ 为直角三角形, 根据勾股定理, 存在以下关系:

$$\begin{cases} x_E^2 + y_E^2 = R^2 \\ x_E^2 + (y_E - R - H)^2 = (R + H)^2 - R^2 \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 是一个关于 x_E 和 y_E 的二元二次方程。利用 MATLAB 的 solve() 命令可以求出满足题意的解:

$$\begin{cases} x_E = \frac{R\sqrt{2RH + H^2}}{R + H} \\ y_E = \frac{R^2}{R + H} \end{cases} \quad (2)$$

(2) 得到 $E(x_E, y_E)$ 后, 可以写出直线 DE(P) 的方程。将其与运动轨迹的圆周方程联立, 可得

$$\begin{cases} \frac{x_P - x_E}{0 - x_E} = \frac{y_P - y_E}{r_H - y_E}, \text{ 其中 } \begin{cases} r_H = R + H \\ r_h = R + h \end{cases} \\ x_P^2 + y_P^2 = r_h^2 \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 是一个关于 x_P 和 y_P 的二元二次方程。利用 MATLAB 的 solve() 命令可以求出满足题意的解:

式 (5) 的展开形式较为繁琐, 这里略去。用 MATLAB 可以容易地完成对式 (5) 的数值计算, 所用程序如下:

```

close all; clear all; syms xE yE
R=6378.24;    % 地球半径
H=2.3*1e-3;  % 探测器高度, 北约标准坦克
h=2.3*1e-3;  % 点源目标高度, 北约标准坦克
xE=(2*R*H+H^2)^(1/2)*R/(R+H); yE=R^2/(R+H); rH=R+H; rh=R+h;
xP=(rH^2-rH*yE+(-xE^2*rH^2+rh^2*xE^2+rH^2*rh^2-
2*rH*yE*rh^2+yE^2*rh^2)^(1/2))*xE/(xE^2+rH^2-2*rH*yE+yE^2);
yP=(-rH*(-xE^2*rH^2+rh^2*xE^2+rH^2*rh^2-2*rH*yE*rh^2+yE^2*rh^2)^(1/2)+yE*(-
xE^2*rH^2+rh^2*xE^2+rH^2*rh^2-2*rH*yE*rh^2+yE^2*rh^2)^(1/2)+rH*xE^2)/(xE^2+rH^2-
2*rH*yE+yE^2);
xD=0; yD=R+H; DP=sqrt((xD-xP)^2+(yD-yP)^2)

```

表 1 所示为不同探测器高度和点源目标高度的差异, 部分结果的小数点后的位数取得较多。度下的若干计算结果。其中, 为了显示计算结果

表 1 不同探测器高度和点源目标高度对应的直线段 DE 和 DP 的长度 (km)

	E 点坐标	直线 DE 的长度	P 点坐标	直线 DP 的长度
$H=2.3 \text{ m}, h=2.3 \text{ m}$	(5.42, 6378.2377)	5.42	(10.832222, 6378.2331)	10.832226
$H=10 \text{ m}, h=2.3 \text{ m}$	(11.29, 6378.230)	11.29	(16.71071, 6378.2204)	16.71074
$H=100 \text{ m}, h=2.3 \text{ m}$	(35.72, 6378.140)	35.72	(41.13, 6378.1097)	41.13
$H=1000 \text{ m}, h=2.3 \text{ m}$	(112.93, 1129.3131)	112.95	(118.35, 6377.1443)	118.37
$H=30 \text{ km}, h=20 \text{ km}^{[3]}$	(616.5, 6348.4)	619.35	(1119.6, 6299.5)	1124.85

探测器的搭载平台包括(地面)车辆、(水面)舰船、(空中)飞机、(近地空间, 指距地面 20 ~ 100 km 的空域)浮空器(如高空气球、飞艇)和(外层空间)卫星等。不同的搭载平台大体上限定了探测器相对于地面的高度。从表 1 中可以看出, 由于受地球曲率的限制, 在理想条件下, 探测器的最大探测距离(即图 1 中直线段 DP 的长度)为一定值, 而且该值与探测器的高度以及点源目标的高度密切相关。例如, 当用装在一辆北约标准坦克上的红外探测系统观察另一辆同类坦克时, 其最大探测距离不到 11 km。随着探测器所在位置的升高, 最大探测距离也会相应增加。

2 探测距离与光子数之间的关系

假设目标是温度为 T 的黑体。根据黑体辐射理论, 在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内, 黑体辐射出的光子数为

$$M_p(\lambda_1 \sim \lambda_2, T) = \frac{1}{hc}$$

$$\times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^4 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} d\lambda \quad (\text{个} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (6)$$

式中, h 为普朗克常数, $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; c 为真空光速, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, 称为第一辐射常数; $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$, 称为第二辐射常数。利用 MATLAB 可容易地对式 (6) 进行计算^[4]。

设目标的表面积为 A , 将式 (6) 乘以黑体的辐射面积 A , 即可得到目标黑体在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的辐射光子数:

$$N_p = M_p(\lambda_1 \sim \lambda_2, T)A \quad (7)$$

假设点源向四周辐射的能量是均匀分布的, 而且探测系统与目标之间的距离为 S , 探测器为焦平面组件芯片。若以目标辐射源为球心并以 S 为半径作一球面, 则从目标投射到球面处的单位面积上的光子数为

$$\bar{P} = \frac{N_p}{4\pi S^2} = \frac{M_p(\lambda_1 \sim \lambda_2, T)A}{4\pi S^2} \quad (8)$$

我们不妨将 $\bar{P}$ 称为名义 (nominal) 光子数。设黑体温度 $T = 2700 \text{ K}$, 面积 $A = 1 \text{ m}^2$, 探测器的工作波段为 $1 \sim 3 \text{ }\mu\text{m}$ (本文算例均取该组参数, 下面不再另行指出), 表 2 所示为不同 S 值对应的球面单位面积上的光子数。可以看出, 在 μs 级时间尺度上, 到达焦平面组件的黑体辐射已经呈现出单光子特征。

设来自点源的光子通过探测系统入瞳处的

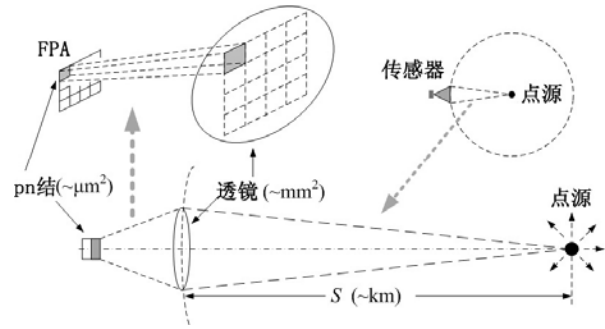


图 2 透镜将点源辐射光子数从 ($\sim$ 个 $\cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 映射到 ($\sim$ 个 $\cdot \mu\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

表 2 在不同球面半径 S 处, 不同量纲下的黑体辐射的名义光子数 $\bar{P}$

量纲	球面半径 S (km)				
	1124.8 ^[3]	1000	500	100	50
($\sim$ 个 $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.0655×10^{12}	1.3481×10^{12}	5.3922×10^{12}	1.3481×10^{14}	5.3922×10^{14}
($\sim$ 个 $\cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.0655×10^6	1.3481×10^6	5.3922×10^6	1.3481×10^8	5.3922×10^8
($\sim$ 个 $\cdot \text{mm}^{-2} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)	1.0655	1.3481	5.3922	1.3481×10^2	5.3922×10^2
($\sim$ 个 $\cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{ns}^{-1}$)	1.0655×10^{-3}	1.3481×10^{-3}	5.3922×10^{-3}	1.3481×10^{-1}	5.3922×10^{-1}

一个薄透镜会聚到焦平面组件光敏面。由于透镜 - 点源之间的距离一般远大于焦平面组件 - 透镜之间的距离 (即焦距), 在计算时可以不计焦距的影响。另外, 假设是在理想情况下, 投射在透镜上的光子经过透镜会聚后散落在焦平面组件上的分布比例与数量保持不变, 即透镜单位面积上的光子数 ($\sim$ 个 $\cdot \text{mm}^{-2}$) 就是焦平面组件单位面积上的光子数 ($\sim$ 个 $\cdot \mu\text{m}^{-2}$)。

另外, 由式 (8) 可知

$$S = \sqrt{\frac{M_p(\lambda_1 \sim \lambda_2, T)A}{4\pi\bar{P}}} \quad (9)$$

根据式 (9), 可以计算出不同名义光子数 $\bar{P}$ 所对应的球面半径 S 。此时, 如果在距离 S 处放置一

个理想探测器, 则 S 值即可视为探测距离 L 。上述分析是从点源目标出发所作出的。

从光电探测器的角度看来, 式 (9) 中 $\bar{P}$ 值的大小取决于可检测的电流阈值。作为一种概念性描述, 假设每一个光子对应于一个电子电量 ($q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$), 则 1 pA 电流所对应的光子数为

$$\bar{P} = \frac{10^{-12}}{1.6 \times 10^{-19}} = 6.25 \times 10^6 \text{ (个} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (10)$$

根据式 (9), 可以算出 1 pA 电流所对应的探测距离为 464.4 km 。同理计算了 10^{-10} A 、 1 nA ($= 10^{-9} \text{ A}$) 以及 $1 \text{ }\mu\text{A}$ ($= 10^{-6} \text{ A}$) 等电流值所对应的光子数和探测距离, 如表 3 所示。在具体计算时, 要注意有关量纲的统一。

表 3 若干可检测的电流阈值所对应的光子数和探测距离

可检测的电流阈值	1 pA ($= 10^{-12} \text{ A}$)	10^{-10} A	1 nA ($= 10^{-9} \text{ A}$)	1 μA ($= 10^{-6} \text{ A}$)
电流阈值所对应的光子数 (量纲: $\sim$ 个 $\cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	6.25×10^6	6.25×10^8	6.25×10^9	6.25×10^{12}
探测距离 (km)	464.4	46.4	14.7	0.5

不难看出,当目标黑体的温度和面积以及探测器可检测的电流阈值确定后,式(9)实际上给出了探测距离的理论极限。在实际情况下,由于要引入量子效率、大气透过率、透镜透过率和填充系数等衰减因素,探测距离将会有所减小。

3 基于探测距离的红外探测器分类

在有关红外探测器的文献资料中,以代际划分器件或系统的表述比较常见^[5-6]。以红外成像系统中常用的碲镉汞探测器为例,一般认为其发展过程至今可划分为三代:第一代为一维)光导阵列,其中包括 60、120 或 180 元器件和 8 元 SPRITE 器件等;第二代为(二维)光伏阵列器件,如 240×4、288×4 和 480×4 元器件等;第三代则为(二维、光伏)大面阵凝视器件,如 640×480 和 640×512 元器件等。第二、三代之间还有第 2.5 代。第二、三代器件主要是以 pn 结为核心的焦平面组件。一般认为,与第二代器件相比,第三代器件在像元数、帧速和温度分辨率等方面均有较大提高,同时具有多色功能且可在其他芯片上进行处理^[6-7]。双色/多色探测器、雪崩光电二极管以及超光谱阵列等便属于第三代器件^[8]。文献[9]将保持美军现有光电优势所需的各种技术定义为第三代技术。这些分代依据一般未涉及探测距离。

事实上,近年来各项技术研究对探测距离的要求越来越高。例如,高超音速巡航导弹的早期探测预警^[10-11]要求具有 1000 km 左右的探测距离^[3]。在本文前面分析的基础上,不妨可以根据探测距离的量值,将军用红外探测器分为 3 类:第 I 类,探测距离 $L < 50$ km;第 II 类, $50 \text{ km} \leq L < 500$ km;第 III 类, $500 \text{ km} \leq L < 1500$ km。这种方法具有包容性,与现有的探测器代际划分方法并不矛盾。比如地对地、地对海、海对海以及直升机对地/海的探测距离一般小于 50 km,这一类探测器即为第 I 类探测器,它们又可按现有方法细分为第二代和第三代等。

4 结束语

探测器的搭载平台大体限定了探测器相对于地面的高度。本文的分析结果表明,由于受地球曲率的限制,在理想条件下,探测器的最大探测距离与探测器的高度以及点源目标的高度密切相关。换言之,在制定实际系统的这一性能参数时,要考虑两者的高度。

另外,本文提出的基于探测距离的红外探测器分类方法具有概念简单清晰、易于比较和歧义性较少等优点。

参考文献

- [1] Campana S B. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, Volume 5: Passive Electro-Optical Systems [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1994.
- [2] 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.
- [3] 王忆锋,余连杰,马钰. 即时全球打击(PGS)武器早期预警对光电探测器的需求分析 [J]. 激光与红外, 2011, 41(3): 288-292.
- [4] 王忆锋,毛京湘. 用 MATLAB 实现普朗克函数积分的快捷计算 [J]. 红外, 2008, 29(4): 12-14.
- [5] 王忆锋,唐利斌. 第三代碲镉汞器件的研发进展 [J]. 光电技术应用, 2009, 24(5): 17-22.
- [6] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation Infrared Photodetector Arrays [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(9): 1103.
- [7] Rogalski A. Competitive Technologies of Third Generation Infrared Photon Detectors [J]. Opto-Electronics Review, 2006, 14(1): 87-101.
- [8] Norton P. HgCdTe Infrared Detectors [J]. Opto-Electronics Review, 2002, 10(3): 159-174.
- [9] Reago D, Horn S, Campbell J, et al. Third Generation Imaging Sensor System Concepts [C]. SPIE, 1999, 3701: 108-117.
- [10] 王忆锋,陈树勤. 高超音速飞行器红外探测预警分析 [J]. 光电技术应用, 2010, 25(4): 21-22.
- [11] 王忆锋,陈洁. 高超声速飞行器的红外辐射特征及其红外探测预警 [J]. 战术导弹技术, 2011, 32(2): 55-57.