

文章编号: 1672-8785(2019)07-0018-08

红外点目标探测系统的作用 距离理论模型分析

郭晓东^{1,2} 左志高^{1,2*} 岳松^{1,2} 洪普^{1,2}

(1. 华中光电技术研究所, 湖北 武汉 430223;

2. 湖北久之洋红外系统股份有限公司, 湖北 武汉 430223)

摘 要: 系统性地分析了红外点目标探测系统的作用距离理论模型。通过建立大气分层模型, 结合 MODTRAN 模型计算了中波红外光和长波红外光在典型大气条件下的透过率。两者计算结果的对比数据可为红外探测系统设计中的波段选择提供参考依据。通过对目标红外辐射强度的理论模型进行分析, 计算了几种典型目标在不同波段的红外辐射强度, 为系统作用距离的指标论证提供了支撑。从红外图像噪声的概率密度分布函数出发, 推导出了图像信噪比与系统检测概率及虚警概率的理论公式, 为检测门限设置提供了参考依据。红外点目标探测系统的作用距离理论模型分析结果对于提升红外探测系统作用距离指标论证的可信度和系统参数设计的合理性具有非常重要的理论支撑作用。

关键词: 红外; 点目标探测; 探测距离; 理论模型

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.07.003

Theoretical Model Analysis of Operation Range of Infrared Point Target Detection System

GUO Xiao-dong^{1,2}, ZUO Zhi-gao^{1,2*}, YUE Song^{1,2}, HONG Pu^{1,2}

(1. Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan 430223, China;

2. Hubei Jiuzhiyang Infrared System Co., Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract: The theoretical model of infrared point target detection system is systematically analyzed. The transmittance of medium-wave and long-wave infrared light under typical atmospheric conditions is calculated by establishing the atmospheric stratification model and combining the MODTRAN model. The comparison data of the two calculation results can provide reference for the band selection in the design of infrared detection system. By analyzing the theoretical model of infrared radiation intensity of targets, the infrared radiation intensity of several typical targets in different wavebands is calculated, which provides support for the demonstration of operation range for IR system. Based on the probability density distribution function of infrared image noise, the theoretical formulas of image signal-to-noise ratio, system detection probability and false alarm probability are derived, which provide reference for setting detection threshold. The theoretical model analysis results of infrared point target detection system's operation range can offer an important theoretical support for

收稿日期: 2019-07-06

作者简介: 郭晓东(1977-), 男, 辽宁营口人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为红外系统总体设计。

*通讯作者: E-mail: zgzu0118@foxmail.com

improving the credibility of infrared detection system's operation range demonstration and the rationality of system parameter design.

Key words: infrared; point target detection; detection range; theoretical model

0 引言

作用距离是红外探测系统的关键指标之一。在设计红外系统时, 往往根据系统实际应用场景对作用距离的指标要求来对探测器和光学系统等参数进行设计。图 1 为典型红外系统的目标探测原理图。目标的红外辐射能量经过大气衰减后, 由接收光学系统入射到红外探测器上; 红外探测器完成光电转换后对信号进行处理, 然后输出最终的红外图像和目标检测结果。在这一过程中, 红外探测系统的作用距离与目标的红外辐射能量、红外波段大气透过率、光学系统与红外探测器参数以及信号处理算法等因素有关。对目标辐射能量、红外波段大气透过率和信号处理算法等进行精确的理论建模分析, 对于指导红外探测系统参数设计和保证系统实测作用距离满足指标要求具有十分重要的意义。

文献[1-2]对红外探测系统的理论模型进行了研究, 并推导了作用距离的理论公式, 但是仅对作用距离的影响因素作了定性分析。文献[3]对红外点目标的探测概率进行了理论建模与研究, 分析了不同背景下系统探测概率与信噪比及作用距离的关系。综合看来, 现有文献报道普遍针对某一特定因素开展作用距离理论建模与分析, 因此对红外系统总体参数设计的指导性有限。

本文从红外探测系统的总体设计出发, 对系统作用距离的理论模型进行了详细建模。然后根据理论模型综合分析了大气参数、探测器

与光学系统性能、目标辐射能量以及信噪比等对红外探测系统作用距离的影响。将此作为理论支撑依据, 可以有效提升对红外系统总体设计的指导性。

1 红外探测系统作用距离理论模型

点目标在红外探测系统处的光谱辐射照度 E_λ 可以表示为

$$E_\lambda = \frac{J_\lambda \tau_a(\lambda)}{R^2} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

式中, J_λ 为点目标的光谱辐射强度, 其单位为 W/Sr ; $\tau_a(\lambda)$ 为大气透过率; R 为点目标到红外探测器的距离。

红外接收光学系统的有效面积可以表示为

$$A_0 = \frac{1}{4} \pi D_0^2 \quad (2)$$

式中, D_0 为光学系统的有效口径。由于目标为点目标, 目标辐射能量将汇聚在探测器的一个像元上, 因此探测器接收到的光谱辐射功率 P_λ 可以表示为

$$P_\lambda = E_\lambda A_0 \tau_0(\lambda) \quad (3)$$

式中, $\tau_0(\lambda)$ 为光学系统的透过率。探测器的光谱响应率 R_λ 可表示为 $R_\lambda = V_s / P_\lambda$, 其中 V_s 为探测器输出的信号电压。对于某一波长范围 (λ_1, λ_2) , V_s 可以表示为

$$\begin{aligned} V_s &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda P_\lambda d\lambda \\ &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda \frac{J_\lambda \tau_a(\lambda)}{R^2} A_0 \tau_0(\lambda) d\lambda \\ &= \frac{A_0}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda J_\lambda \tau_a(\lambda) \tau_0(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (4)$$



图 1 典型红外系统的目标探测原理图

为便于计算, R_λ 、 $\tau_a(\lambda)$ 和 $\tau_0(\lambda)$ 均用 (λ_1, λ_2) 范围内的均值 R_0 、 τ_a 和 τ_0 替换, 于是得到:

$$V_s = \frac{A_0 R_0 \tau_a \tau_0}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_\lambda d\lambda = \frac{A_0 R_0 \tau_a \tau_0}{R^2} \cdot J \quad (5)$$

式中, $J = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_\lambda d\lambda$ 为 (λ_1, λ_2) 范围内目标辐射的总能量。将式(5)除以探测器输出噪声电压的均方根值, 得到红外探测系统输出信号的信噪比:

$$SNR = \frac{V_s}{V_n} = \frac{A_0 R_0 \tau_a \tau_0}{R^2 V_n} \cdot J \quad (6)$$

由于探测率 $D = R_0/V_n$, 比探测率 D^* 可以表示为^[4]

$$D^* = D \sqrt{A_d \Delta f} = \frac{R_0}{V_n} \sqrt{A_d \Delta f} \quad (7)$$

式中, A_d 为探测器的像元感光面积; Δf 为探测器带宽, $\Delta f = 1/(2t_{int})$ 。因此信噪比可以表示为

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{A_0 \tau_a \tau_0 D^*}{R^2 \sqrt{A_d \Delta f}} \cdot J = \frac{\pi D_0 \frac{D_0}{2f} \tau_a \tau_0 D^*}{2R^2 \sqrt{\frac{ab}{f^2} \cdot \frac{1}{2t_{int}}}} \cdot J \\ &= \frac{\pi D_0 \frac{\tau_a \tau_0 D^* J}{2F}}{2R^2 \sqrt{\frac{ab}{f^2} \cdot \frac{1}{2t_{int}}}} \end{aligned} \quad (8)$$

即红外探测系统的作用距离为

$$\begin{aligned} R^2 &= \frac{A_0 \tau_a \tau_0 D^*}{R^2 \sqrt{A_d \Delta f}} \cdot J = \frac{\pi D_0 \frac{D_0}{2f} \tau_a \tau_0 D^*}{2R^2 \sqrt{\frac{ab}{f^2} \cdot \frac{1}{2t_{int}}}} \cdot J \\ &= \frac{\pi D_0 \frac{\tau_a \tau_0 D^* J}{2F}}{2 \sqrt{\frac{ab}{f^2} \cdot \frac{1}{2t_{int}}}} \cdot SNR \end{aligned} \quad (9)$$

式中, t_{int} 为探测器的积分时间。在实际应用中, 往往还要考虑一定的工程修正。设定工程修正系数为 ξ , 则红外探测系统作用距离的理论模型可以表示为

$$R^2 = \frac{\pi D_0 \frac{\tau_a \tau_0}{2F} D^* J}{2 \sqrt{\frac{ab}{f^2} \cdot \frac{1}{2t_{int}}}} \cdot SNR \quad (10)$$

2 红外探测系统作用距离的影响因素分析

对红外探测系统作用距离的理论模型进行适当分解, 即

$$\begin{aligned} R^2 &= \frac{\pi D_0 \frac{\xi \tau_0}{2F} D^*}{2 \sqrt{\frac{ab}{f^2} \cdot \frac{1}{2t_{int}}}} \cdot \tau_a \cdot J \cdot \frac{1}{SNR} \\ &= S_{sys} \cdot S_{atom} \cdot S_{target} \cdot S_{process} \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)将红外探测系统的作用距离模型分成了与系统参数、大气、目标和信号处理相关的四个部分, 即与红外探测系统作用距离有关的四个因素。下面分别对这四个因素作进一步的理论分析。

2.1 探测器及光学系统的性能参数分析

根据式(11), 与红外探测系统作用距离相关的系统参数可以表示为

$$S_{sys} = \frac{\pi D_0 \frac{\xi \tau_0}{2F} D^*}{2 \sqrt{\frac{ab}{f^2} \cdot \frac{1}{2t_{int}}}} \quad (12)$$

可以看出, 系统光学镜头的有效口径、透过率、 F 数、焦距和探测器的比探测率、像元感光面积、积分时间等参数相关。将 $F = f/D_0$ 代入式(12), 可以得到:

$$S_{sys} = \frac{\pi D_0 \frac{\xi \tau_0}{2} D^*}{2 \sqrt{\frac{ab}{f^2} \cdot \frac{1}{2t_{int}}}} \quad (13)$$

可以看出, 在其它参数相同的情况下, 红外探测系统的作用距离正比于系统的有效光学口径。也就是说, 光学系统的有效口径越大, 接收到的目标辐射能量更多, 相应的探测距离也更远。这一结论与工程试验结果一致。

在红外探测系统的总体设计过程中, 往往依据工程应用对系统作用距离的要求, 开展探测器的选型和光学系统参数的合理化设计。对于制冷探测器, 为了提高光学系统口径的使用效率, 通常根据探测器的 F 数来设计合适的光学镜头焦距和透过率, 以满足系统作用距离要

求; 对于非制冷探测器, 则通常设计有效口径大的短焦光学系统, 以同时满足系统作用距离和系统体积重量要求。

2.2 大气透过率的理论计算模型

在红外点目标探测系统设计过程中, 通常采用 MODTRAN 模型计算红外波段的大气透过率。在该模型中, 影响红外大气透过率的因素主要包括大气能见度、温度、湿度、大气压强、海拔高度以及 CO_2 浓度等大气参数。在用 MODTRAN 模型计算斜视观测路径的红外波段大气透过率时, 需要对大气进行分层建模, 并对不同海拔高度的温度、湿度和气压等大气参数进行合理设置。

在红外点目标探测系统的设计过程中, 用户单位往往只提供海平面的气象条件以及空中目标的飞行高度等输入要求。为了更加准确地计算这个斜视观测过程中的红外波段大气透过率, 对目标所在层的大气参数与海平面大气参数的关系进行建模就显得尤为重要。

根据大气理论模型^[5], 目标层大气环境温度与目标层海拔高度及海平面环境温度的关系可以表示为

$$T(h) =$$

$$\begin{cases} T_0 - 6.5 h & 0 \leq h \leq 11 \text{ km} \\ T(11) & 11 \text{ km} \leq h \leq 20 \text{ km} \\ T(11) + (h - 20) & 20 \text{ km} \leq h \leq 32 \text{ km} \end{cases} \quad (14)$$

式中, T_0 为海平面的大气温度; h 为目标层的

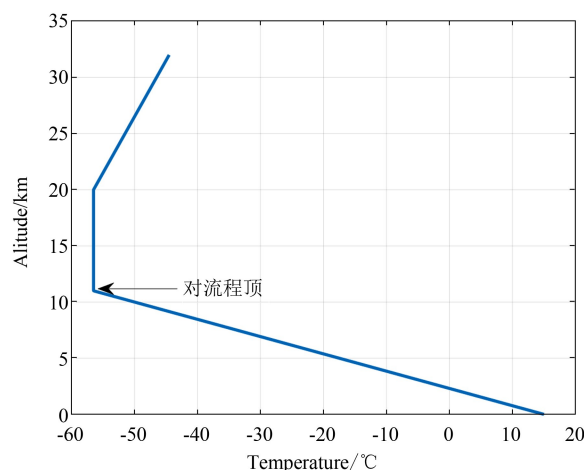


图 2 大气温度随海拔高度的变化曲线(以海平面温度 15°C 为例)

海拔高度, 其单位为 km。图 2 所示为典型大气温度随海拔高度的变化曲线。

目标层大气相对湿度与目标层海拔高度及海平面环境相对湿度的关系可以表示为

$$RH = \begin{cases} RH_0 (1 - 0.2523h) & 0 \leq h \leq 2 \text{ km} \\ 0.4954 RH_0 \exp\left(\frac{2-h}{1.861}\right) & 2 \text{ km} \leq h < 8 \text{ km} \\ 0.0197 RH_0 \exp\left(\frac{8-h}{1.158}\right) & h \geq 8 \text{ km} \end{cases} \quad (15)$$

式中, RH_0 为海平面的大气相对湿度。图 3 (左图) 所示为典型大气相对湿度随海拔高度的变化曲线。

目标层大气压强与目标层海拔高度及海

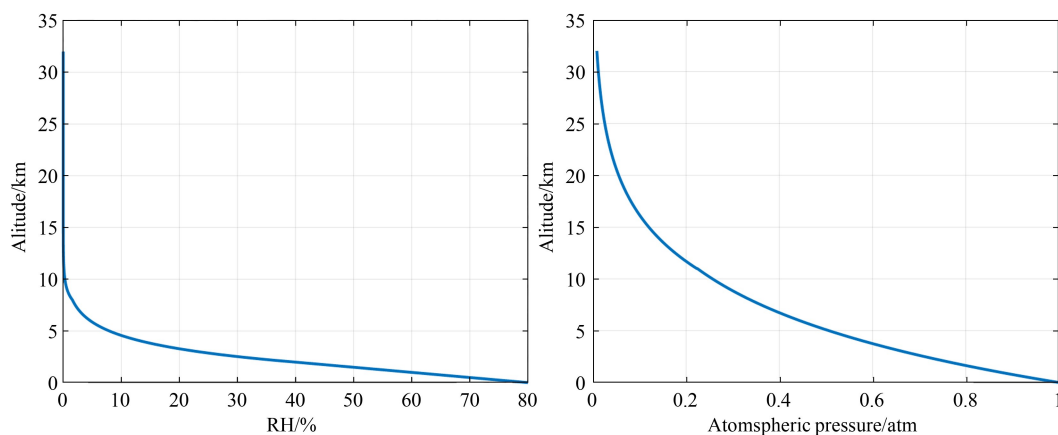


图 3 大气相对湿度(左)和压强(右)随海拔高度的变化曲线(以海平面大气相对湿度 80%、大气压强 1 atm 为例)

平面大气压强的关系可以表示为

$$P = \begin{cases} P_0 \exp\left(-\frac{h}{7.354}\right) & 0 \leq h \leq 11 \text{ km} \\ 1.224 P_0 \exp\left(-\frac{h}{6.457}\right) & h > 11 \text{ km} \end{cases} \quad (16)$$

式中, P_0 为海平面的大气压强, 其单位为 atm。图 3 (右图) 所示为典型大气压强随海拔高度的变化曲线。

根据上述大气温度、湿度和压强随海拔高度的变化曲线, 利用 MODTRAN 模型计算了目标飞行高度为 1 km 时斜视观测的大气透过率与波长的关系 (传输距离为 2 km) 以及红外波段的平均大气透过率随作用距离的变化曲线 (结果见图 4 和图 5)。

通过对比图 4 和图 5 可以看到: (1) 在 3~12 μm 波段, 存在 3~5 μm 和 8~12 μm 两个透过率相对较高的大气窗口, 且在 4.3 μm 附近有一个强的大气吸收峰; (2) 在高温高湿环境下, 中波 (3~5 μm) 红外辐射的大气透过率明显高于长波 (8~12 μm) 红外辐射, 而在低温低湿环境下, 两者相差不大。

在设计红外点目标探测系统时, 可将上述两个结论作为系统工作波段选择的参照依据之一。

2.3 目标红外辐射强度的理论计算模型

目标红外辐射强度与目标的温度有关^[6]。

假定目标为漫散射体, 根据普朗克公式可求得目标某一单位面元的光谱辐射出射度 $M_{i,\lambda}$ ^[7]:

$$M_{i,\lambda} = \epsilon_i(\lambda) \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_i} - 1} \quad (17)$$

式中, $\epsilon_i(\lambda)$ 为目标第 i 个单位面元的发射率; c_1 为第一辐射常量, $c_1 = 2\pi h c^2 = 3.7418 \times 10^4 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{cm}^2$; c_2 为第二辐射常量, $c_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; T_i 为目标第 i 个单位面元的温度。因此, 第 i 个单位面元的辐射强度 $J_{i,\lambda}$ 为

$$J_{i,\lambda} = \frac{M_{i,\lambda}}{\pi} = \frac{\epsilon_i(\lambda)}{\pi} \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_i} - 1} \quad (18)$$

为便于计算, 假定目标每个单元面元的发射率和温度都相同, 通过对式 (18) 进行积分可以得到, (λ_1, λ_2) 范围内面积为 S 的目标的红外辐射强度 J 可以表示为

$$J = \frac{\epsilon_0 S}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \text{ (W/Sr)} \quad (19)$$

式中, ϵ_0 为目标的平均发射率; T 为目标温度。式 (19) 即为目标红外辐射强度的理论计算模型。

对于空中飞行的点目标, 根据气动加热模型, 目标壳体温度 T 可表示为^[8]

$$T = T_0 (1 + 0.164 Ma^2) \quad (20)$$

式中, T_0 为目标周围环境的温度, 与当地地面温度及海拔高度有关, 如式 (14) 所示; Ma 为目标的飞行速度, 其单位为马赫。表 1 列出了几种典型目标在中波红外和长波红外波

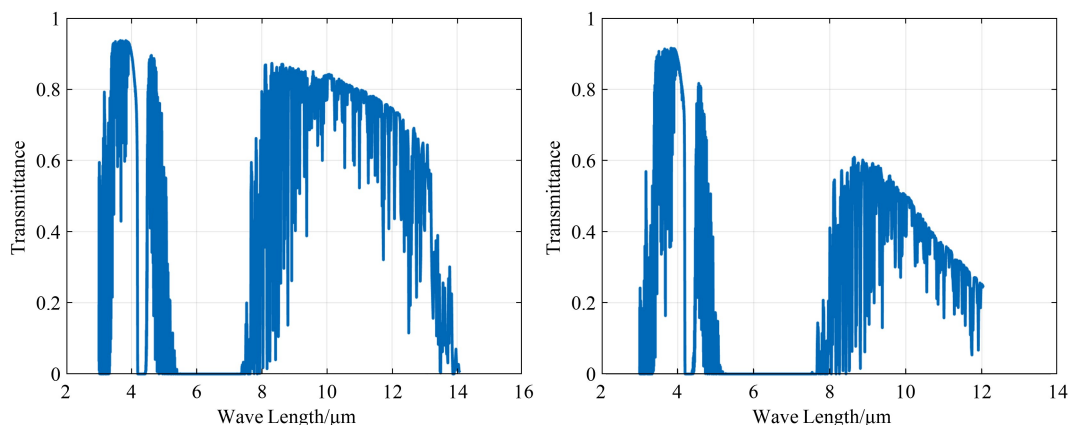


图 4 当海平面的大气能见度为 10 km, 温度为 15℃、相对湿度为 80% (左), 温度为 30℃、相对湿度为 90% (右), 目标飞行高度为 1 km 以及从海平面斜视观察目标时, 2 km 观测距离下大气透过率与红外波长的关系曲线

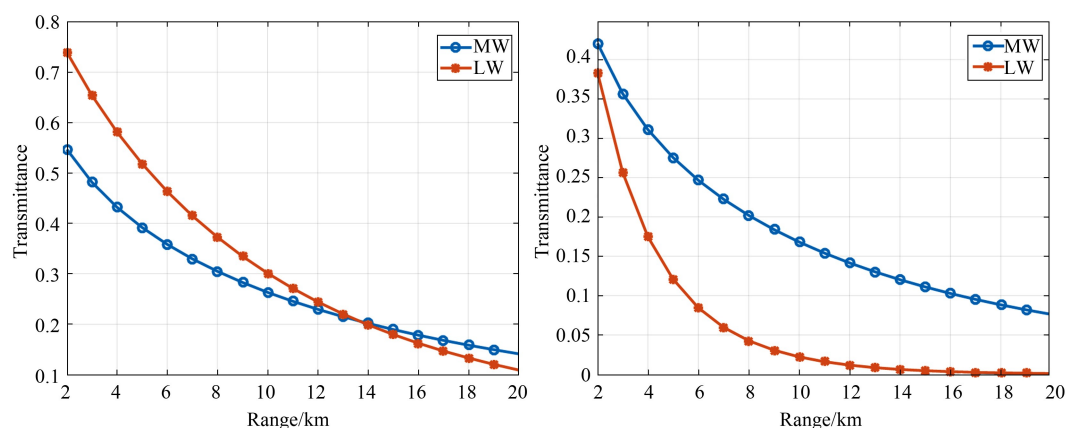


图 5 当海平面的大气能见度为 10 km, 温度为 15℃、相对湿度为 80% (左), 温度为 30℃、相对湿度为 90% (右), 目标飞行高度为 1 km 以及从海平面斜视观察目标时, 观测距离大气透过率与作用距离的关系曲线

表 1 几种典型目标在中波红外和长波红外波段的辐射强度计算结果

目标	等效面积/m ²	表面温度/K	发射率	辐射强度/(W/Sr)	
				3~5 μm	8~12 μm
某固定翼飞机迎头	2	301.2	0.5	1.95	39.3
某旋翼无人机	0.07	320	0.5	0.13	1.83
某弹道迎头	0.0038	424.7	0.5	0.1	0.32
碳炉	0.071	673.15	0.9	67.4	42.8

段的辐射强度计算值。

从表 1 中可以看出, 对于常温目标, 长波红外辐射强度大于中波红外辐射强度; 而对于高温目标, 中波红外辐射强度则明显高于长波红外辐射强度。这一结论与维恩位移定律一致。因此, 在红外系统总体设计中, 它也是系统工作波段选择的重要依据之一。

2.4 信噪比的影响因素分析

当前红外探测系统的噪声主要来源于探测器噪声, 而且其概率密度函数符合高斯分布。当一个点目标的信号与噪声信号同时进入红外探测系统时, 探测器的输出信号仍然符合高斯分布^[9]。假设噪声的概率密度分布函数为

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(n-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (21)$$

一般将阈值分割门限取为 $T_h = \mu + k\sigma$, 并将单帧图像中目标的信噪比定义为 $SNR = (s - \mu)/\sigma$ 。假设分割门限 T_h 已经确定, 那么图像中所有灰度值大于门限 T_h 的像素就被认为是

可能的目标点, 其余像素为背景像素, 则像素的检测概率为^[10]

$$P_d = \int_{T_h}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-s-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad (22)$$

$$P_v = \int_{T_h}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad (23)$$

式中, P_d 和 P_v 分别为目标像素和背景像素的检测概率。令 $y = (x - \mu)/\sigma$, 通过对式(22)和式(23)进行变量替换可以得到:

$$\begin{aligned} P_d &= \int_{\frac{T_h - \mu}{\sigma}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\left(y - \frac{s - \mu}{\sigma}\right)^2}{2}\right] dy \\ &= \int_{\frac{T_h - \mu}{\sigma}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(y - SNR)^2}{2}\right] dy \\ &= 1 - \Phi\left(\frac{T_h - \mu}{\sigma} - SNR\right) \end{aligned} \quad (24)$$

$$P_v = \int_{\frac{T_h - \mu}{\sigma}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$$

$$= 1 - \Phi\left(\frac{T_h - \mu}{\sigma}\right) \quad (25)$$

在基于单帧检测的情况下, 目标像素的检测概率和背景像素的检测概率可以看作检测概率 P_d 和虚警概率 P_{fa} 。因此, 单帧图像的检测概率、虚警概率与信噪比的关系可以表示为

$$P_d = 1 - \Phi\left(\frac{T_h - \mu}{\sigma} - \text{SNR}\right) \quad (26)$$

$$P_{fa} = 1 - \Phi\left(\frac{T_h - \mu}{\sigma}\right) \quad (27)$$

可以看出, 检测概率和虚警概率取决于信噪比以及检测门限。在相同的信噪比条件下, 检测门限越高, 虚警概率越小, 但是检测概率也在减小; 若检测门限过低, 则虚警概率会很大。所以检测门限的选择必须同时兼顾检测概率和虚警概率两个指标要求。图 6 所示为不同虚警概率条件下系统探测概率与信噪比的关系曲线。

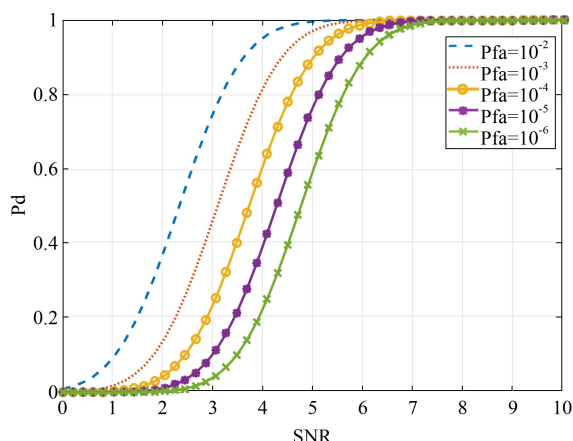


图 6 不同虚警概率下, 红外探测系统单帧图像的检测概率与图像信噪比的关系曲线

3 典型红外探测系统的作用距离分析结果

某典型红外探测系统的探测器为 640×512 元制冷型中波红外探测器。表 2 列出了该系统的性能参数。

探测目标为某固定翼飞机, 其飞行高度为 1 km, 辐射能量数据见表 1。地面能见度为 10 km、温度为 15°C 、相对湿度为 80% 时的大气透过率计算结果见图 5。图 7 所示为系统对

表 2 某红外探测系统的参数列表

参数名称	取值
工作波长	$3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$
分辨率	640×512
像元间距	$15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$
比探测率	$3 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$
积分时间	5 ms
焦距	150 mm
F 数	2
光学系统透过率	0.7

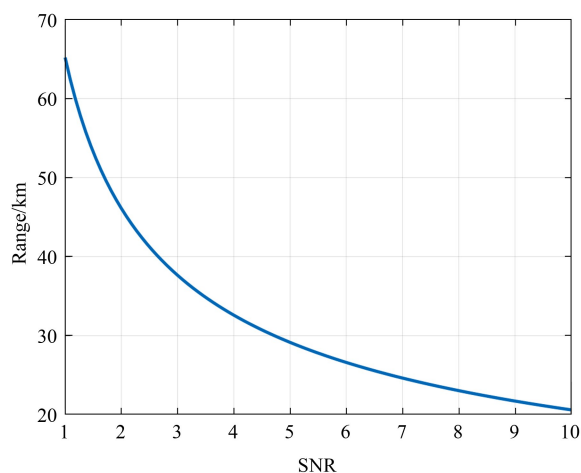


图 7 系统对某固定翼飞机的探测距离与信噪比的关系曲线

目标的探测距离与信噪比的关系曲线。可以看出, 当系统信噪比大于 5 (对于检测概率大于 90%, 虚警概率为 10^{-4}) 时, 系统对固定翼飞机的探测距离小于 30 km。

4 结束语

本文对红外点目标探测系统的作用距离理论模型进行了详细的过程推导; 建立了大气分层模型, 给出了大气环境温度、相对湿度和大气压强随海拔高度和海平面大气参数变化的理论公式; 基于普朗克公式分析了不同目标的红外辐射强度计算模型, 并计算了包括飞机等目标在内的典型空中目标在中波红外和长波红外波段的辐射强度; 分析了红外系统单帧图像的检测概率、虚警概率与图像信噪比的对应关系; 基于上述分析过程, 计算了典型红外点目标探测系统对固定翼飞

机的探测距离计算结果。本文所建立的理论模型对于红外点目标探测系统的参数设计具有较强的指导意义, 可为红外系统设计提供重要的理论支撑。

参考文献

- [1] 吴晗平. 红外点目标探测系统作用距离方程理论研究——基于探测率温度特性与背景影响[J]. *红外技术*, 2007, **29**(6): 341–344.
- [2] 吴学铭, 王海晏, 寇添, 等. 基于红外探测系统的作用距离模型优化研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2016, **36**(5): 145–154.
- [3] 祁蒙. 红外搜索跟踪系统的探测概率研究[J]. *激光与红外*, 2004, **34**(4): 269–271.
- [4] Wu H P, Yi X J. Operating Distance Equation and Its Equivalent Test for Infrared Search System with Full Orientation [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waver*, 2003, **24**(12): 2059–2068.
- [5] 乌拉比 F T, 穆尔 R K, 冯健超著. 候世昌, 马锡冠译. *微波遥感(第一卷): 微波遥感基础与辐射度量学* [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [6] 张亚梅, 符艳军. 光学成像系统中目标图像检测概率的计算方法[J]. *自动化与仪器仪表*, 2018, **38**(11): 214–217.
- [7] 李鸣, 杜小平. 空间目标红外辐射特性分析[J]. *飞机设计*, 2011, **31**(1): 67–70.
- [8] 唐尧文, 曾红郡. 反舰导弹红外辐射特性的建模与仿真[J]. *红外*, 2016, **37**(7): 33–42.
- [9] 毛峡, 常乐, 刁伟鹤. 复杂背景下红外点目标探测概率估算[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, **37**(11): 1429–1434.
- [10] 张艳晶. 复杂云背景下红外运动小目标监测算法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.