

临近空间飞行器红外探测距离估算

王航飞, 张凯, 闫杰
(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

摘要:传统的红外探测距离模型主要用于地面目标的检测, 载机飞行高度也比较低。在凝视型红外热探测器的基础上, 对临近空间的大气环境进行了详细分析, 建立了背景辐射模型。在此基础上提出了临近空间飞行器的红外探测距离模型, 对红外波段适用范围进行了讨论。计算结果表明, 在临近空间环境下, 红外波段都有较好的探测结果, 在短波下探测时, 背景辐射对其探测结果影响很大。

关键词:临近空间飞行器; 凝视型红外热探测器; 探测距离模型; 背景辐射

中图分类号: V271.4; TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)06-0024-04

Estimating the Infrared Detection Distance of Near Space Aircraft

WANG Hang-fei, ZHANG Kai, YAN Jie

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Traditional infrared detection distance model is mainly used for ground target detection, and the flying height of the carrier aircraft is relatively low. Based on analysis to staring infrared thermal detectors, the near space environment was studied and a background radiation model was established. Based on which, an infrared detection distance model of near space aircraft was proposed, and the application range of infrared bands was discussed. The results show that: 1) in the near space environment, infrared band has better detection results; and 2) in the detection using shortwave, the background radiation has a great effect on the detection results.

Key words: near space aircraft; staring infrared thermal detector; detection distance model; background radiation

0 引言

临近空间飞行器一般是指运行在距离地面 20 ~ 100 km 高度之间, 在临近空间中完成特定任务的飞行器。临近空间中目标的飞行速度快, 雷达截面积小, 使用雷达探测很难发现目标, 因此红外探测技术成为主要的探测方法。

红外探测系统通过探测目标与背景的热辐射来识别目标, 具有智能化高、隐蔽性好、抗干扰能力强等优点。对于红外成像探测系统来说, 作用距离是一项关键的战术技术指标。国内众多学者和研究人员对探测距离的各项参数进行了深入而广泛的研究, 并提出了

红外探测系统的不同探测距离模型, 国外学者对临近空间环境的应用研究得比较多, 但是对于临近空间环境下的红外探测研究得并不多。常见的建立红外探测系统作用距离的方法有: 基于信噪比检测基础的点源探测作用距离模型^[1-4]和基于对比度方法的探测距离模型^[5]。基于对比度方法的探测距离模型主要考虑了大气传输特性, 并没有考虑探测器成像时的弥散效应、背景的辐射特性以及信噪比, 探测误差比较大。基于信噪比的探测作用距离模型考虑了背景与目标的对比度, 比较直观地分析和计算了探测距离。常见的基于信噪比的探测距离方法有基于综合性能参数噪声等效温差 (NETD) 和基于噪声等效辐照度^[6] (NEFD) 两种。

临近空间环境中具有较好的大气透过特性, 在下视探测条件下, 背景为云层而不是地面。本文首先对临近空间中的背景特性进行分析, 建立了背景辐射模型, 然后结合红外探测系统成像时的弥散效应, 根据信

收稿日期: 2013-08-09

修回日期: 2013-08-28

基金项目: 航空科学基金(20120153003)

作者简介: 王航飞(1988—), 男, 河南宜阳人, 硕士生, 研究方向为红外图像处理、软件建模及仿真。

噪比的定义,提出了基于噪声等效温差的临近空间高动态飞行器的红外探测距离估算模型。通过模型仿真,对探测波段适用范围以及探测距离进行了讨论。

1 红外探测器辐射计算

由于临近空间的大气透过率较高,因此该空间探测距离一般较远。当临近空间飞行器与目标距离较远时,目标在探测器焦平面上的几何投影一般小于一个探测像元面积,可以将目标看作一个点源。图1所示为临近空间飞行器红外探测器成像示意图。

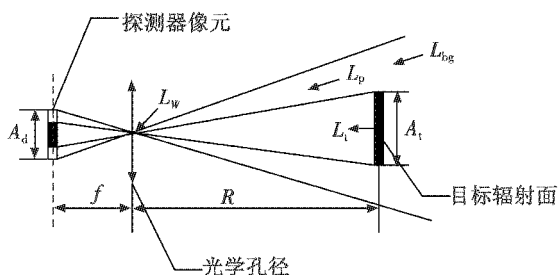


图1 点目标成像示意图

Fig.1 Schematic of point target imaging

图1中: A_d 为探测器单个像元面积(单位为 cm^2); A_t 为目标有效辐射面积(单位为 m^2); R 为探测距离(单位为 km); L_t 为目标辐射亮度(单位为 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$); L_{bg} 为背景辐射亮度(单位为 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$); L_p 为路径辐射亮度(单位为 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$); f 为光学系统焦距(单位为 cm)。

1.1 目标辐射

目标是金属,为郎伯余弦发射体,由普朗克黑体辐射定律^[7-8]可以得到黑体辐射亮度的公式为

$$M(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (1)$$

式中: λ 为波长(单位为 μm); T 为温度(单位为 K); $c_1 = 37413.82$, 为第一辐射常数; $c_2 = 14387.86$, 为第二辐射常数。

在波段内 $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ 的辐射度为

$$M(\Delta\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T) d\lambda \quad (2)$$

由于在远距离探测时,目标为点源,其辐射强度可以简单地看作各个部分能量的叠加。则目标的辐射亮度为

$$L_t = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i M_{\lambda_i} / \pi \quad (3)$$

式中: ε_i 为目标第 i 部分的辐射率; M_{λ_i} 为目标第 i 部分的辐射强度值(单位为 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)。

1.2 背景辐射

临近空间是距离地面 $20 \sim 100 \text{ km}$ 高的空间。临近空间飞行器进行下视探测时,最主要的背景是云层,

云层中较高的是冰晶云,大约在 10 km 高度处。因此,临近空间环境下,背景辐射包括云层自身辐射和云层反射太阳辐射以及路径辐射,路径辐射主要来源于大气辐射和太阳散射。

云层的高度大概是 10 km ,此时云层的温度与大气环境是一致的。在小于 11 km 时,大气温度随高度的变化规律^[9]为

$$T = 288.15 - 6.5h \quad (4)$$

式中: h 为高度(单位为 km); T 为温度(单位为 K)。由式(4)可以得到云层的温度为 223.15 K ,此后可以将云层当作黑体,通过式(2)计算其 M_{cld} 。

云层对太阳辐射的反射是随入射角 θ (即太阳光入射方向与垂直方向的夹角)的变化而变化的,如图2所示。

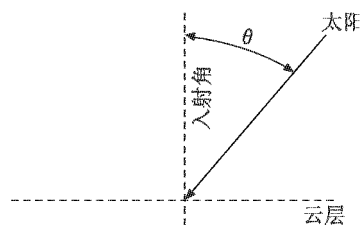


图2 入射角示意图

Fig.2 Angle of incidence

太阳辐射和大气路径辐射可以用相关的软件(Modtron)进行计算。由此可以得到背景辐射的计算公式为

$$L_{bg} = (\rho_c L_{\text{cld}} + \varepsilon_c L_{\text{sun}} \cos \theta) \times \tau_a + L_p \quad (5)$$

式中: L_{cld} 、 L_{sun} 分别为云层自身辐射亮度和太阳辐射亮度; ρ_c 、 ε_c 分别为云层辐射和反射系数; τ_a 为大气透过率。

1.3 辐射功率差

远距离探测时,目标很小,目标对背景像元的辐射影响可以忽略不计,因此背景像元接收到的辐射功率只有背景辐射和路径辐射。目标像元接收到的辐射功率包括目标辐射、路径辐射和背景辐射。在进行小目标探测时,光学系统衍射带来的弥散不能解释实际的成像情景,但发现系统跟踪的短时随机误差是引起弥散的主要原因,目标在焦平面上的投影就取决于短时随机误差引起的弥散角和光学系统焦距的大小。可以得到单个目标像元和背景像元上辐射功率差^[10]为

$$\Delta P = |P_t - P_{bg}| = \frac{A_0 \tau_a(R) \tau_0 A_p}{R^2} |L_t - L_{bg}| / N_t \quad (6)$$

式中: N_t 为目标所占的像元数; τ_0 为工作时光学系统的透过率; $\tau_a(R)$ 为大气透过率; A_0 为光学系统的入瞳面积(单位为 m^2); A_p 为目标在瞬时视场中的投影面积(单位为 cm^2); P_t 为目标单个像元接收的辐射功率; P_{bg} 为背景单个像元接收的辐射功率。

2 红外探测器波段响应度

响应度表示单位输入辐射功率产生的输出电压。它与焦平面的灵敏度、像元面积、噪声等效带宽有关。焦平面上成的像会经过非均匀性校正,因此,探测时可以认为各个像元的响应度相等,则焦平面上单个像元的响应度为

$$R_\lambda = V_n D^* / \sqrt{A_d \Delta f} \quad (7)$$

式中: Δf 为噪声等效带宽(单位为 Hz); D^* 为波段探测度(单位为 $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)。

波段探测度表示在某一波段内,面积为 1 cm^2 的焦平面上有 1 W 的入射功率,并用 1 Hz 带宽的电路测量时的信噪比,其与噪声等效温差(NETD)的转换方法^[10]为

$$D^* = \frac{\pi(A_d \Delta f)^{1/2}}{A_0 \alpha \beta T_{\text{NETD}} (\Delta M / \Delta T)} \quad (8)$$

式中: T_{NETD} 为系统噪声等效温差(单位为 K); $\Delta M / \Delta T$ 为温度对比度(单位为 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)^[6]; α, β 分别为系统瞬时视场横向和纵向张角。

3 探测距离模型

在探测光谱区间内,信号电压与辐射功率关系为

$$V = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_\lambda R_\lambda d\lambda \quad (9)$$

式中, P_λ 为单个像元接收的辐射功率。通过式(9)可以得到目标像元对应的信号电压峰值 V_{tg} 和背景像元对应的信号电压峰值 V_{bg} 。

探测器输出的、可检测的最低信噪比 $R_{s,N}$ 为

$$R_{s,N} = \frac{V_{\text{tg}} - V_{\text{bg}}}{V_N} = \frac{\Delta P \cdot D^*}{\sqrt{A_d \Delta f}} \quad (10)$$

信号通过系统后会发生能量衰减,因此必须考虑信号衰减因子 δ 的作用,根据式(6)、式(8)和式(10)可以得到目标探测距离公式,即

$$R^2 = \frac{\delta \pi A_p \tau_a(R) \tau_0 |L_t - L_{\text{bg}}| / N_t}{\alpha \beta \cdot T_{\text{NETD}} \cdot R_{s,N} \cdot (\Delta M / \Delta T)} \quad (11)$$

4 红外探测器参数

对于模型中的红外探测器系统参数进行设定,以便于编程计算,其主要参数如表1所示。

表1 红外探测系统参数

Table 1 Parameters of infrared detection system

t_{int}/s	$A_d/\mu\text{m}^2$	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$
0.001	255	1.5	1.5
τ_0	δ	T_{NETD}/K	$R_{s,N}$
0.8	0.707	0.0025	3

5 模型计算分析

根据上节设定的红外探测系统参数和模型计算公式,在 Win7 系统 Matlab2012 环境下进行编程。图3所示为通过 Modtron 计算得到 $10 \sim 25 \text{ km}$ 高度、路径长度为 50 km 的大气光谱透过率,可以看到长波探测时的大气透过率要好于中波和短波。

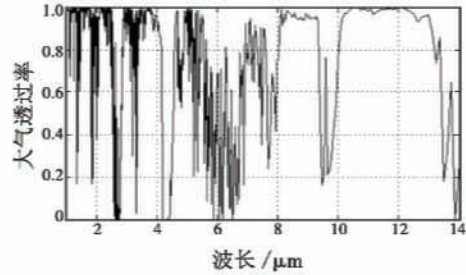


图3 大气透过率

Fig. 3 Atmospheric transmissivity

环境中的太阳辐射和路径辐射也是没有办法直接测量的,图4所示为通过 Modtron 计算得到的 $10 \sim 25 \text{ km}$ 高度、 50 km 路径长度的太阳辐射和路径辐射亮度曲线。

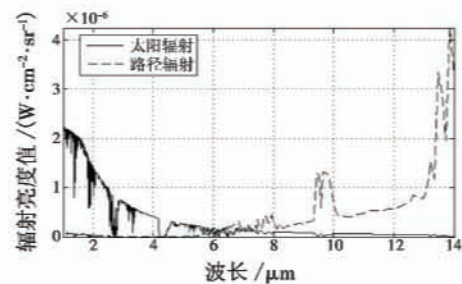


图4 太阳辐射与路径辐射

Fig. 4 Solar radiation and path radiation

可以看出,短波和中波下的太阳辐射要比短波和中波下的路径辐射大得多,此时路径辐射可以忽略不计,但在长波下路径辐射比太阳辐射强得多,太阳辐射可以忽略。

取目标有效辐射面积为 10 m^2 ,辐射系数为 0.75 ,为了抗背景干扰以及电磁干扰,在极限距离探测时,目标所占像元数至少为 9 ,此处取值为 9 。图5为探测极限距离随目标温度变化图,随着目标温度的升高,尽管中波和长波下的探测距离是增大的,短波下的探测距离先减小后增大,但是探测距离都比较远。在目标温度小于 900 K 时,3种波段的探测距离差别并不是很明显。相对来说,当目标温度低于 1050 K 时,采用中波探测比较好,没有短波下探测距离的反弹,而且比长波下的探测距离远。当目标温度大于 1100 K 时,采用短波探测的探测距离较远。

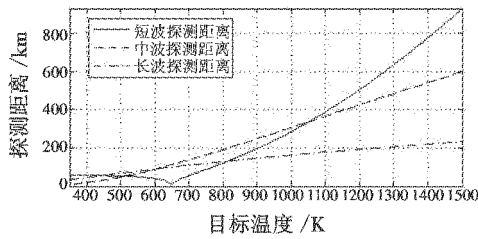


图5 探测距离与目标温度关系图

Fig. 5 Detection range and target temperature

目标与背景辐射亮度差如图6所示。

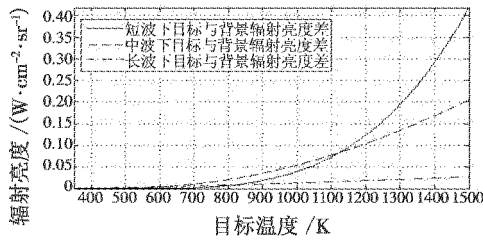


图6 目标与背景辐射亮度差

Fig. 6 Radiation brightness difference between target and background

图6中显示的曲线与图5中的曲线变化规律是一致的,在目标温度低于900 K时,3种波段下,目标与背景的辐射亮度差的差别很小,但是当目标温度大于1100 K时,短波下目标与背景辐射亮度差要比其他两个波段下变化得明显。图7为目标温度低于850 K时3种波段下的目标与背景辐射亮度差曲线。图中可以发现,短波情况下,随着目标温度的升高,目标与背景的辐射差值是先减小后增大的,这与式(6)中的绝对值是有关系的,这就出现了图5中短波下探测距离的反弹情形。当目标温度低于650 K时,短波下目标的辐射要比背景辐射小,这是由于在短波下太阳具有较强的辐射,图4显示出短波探测时,背景辐射中占主导地位的是太阳辐射。

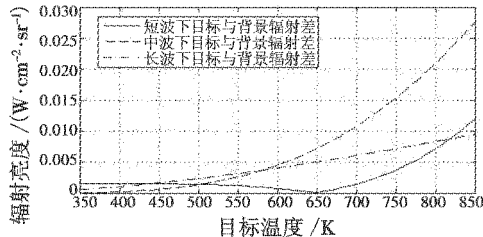


图7 目标温度低于850 K时目标与背景辐射亮度差
Fig. 7 Radiation brightness difference between target and background when the target temperature is below 850 K

6 结论

在临近空间环境下,具有很好的大气透过特性,高速运动的飞行器的红外探测系统探测距离较远。本文首先对临近空间的环境特性进行了分析,建立了背景

辐射模型,结合红外探测系统成像时系统跟踪的短时随机误差造成的像元弥散,提出了基于信噪比的临近空间探测距离模型,并根据模型进行了仿真。仿真结果表明,该作用距离模型在红外的各个波段下都有很好的探测效果,但是在目标温度比较低时,由于背景辐射的影响,短波探测会出现距离反弹现象,采用中波探测比较好;当目标温度比较高的时候,短波下目标与背景具有较大的辐射亮度差,探测距离远。

参考文献

- [1] HUDSON R D, Jr. Infrared system engineering [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1969.
- [2] 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 Waves, 2003, 24 (12) : 2059-2068.
- [3] WU H P, CHEN X Q, YI X J. Operating distance and comprehensive performance evaluation for infrared searching system [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 27 (6) : 903-912.
- [4] DATTA P K, KUMAR A, NIJHAWAN O P. Range estimation of thermal imaging system from MRTD and MTF measurement [J]. Optik, 1994, 97 (1) : 1-3.
- [5] 王刚, 禹秉熙. 基于对比度的空中红外点目标探测距离估计方法 [J]. 光学精密工程, 2002, 10 (3) : 276-280. WANG G, YU B X. Approach to estimate infrared point-target detection range against sky background based on contrast [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10 (3) : 276-280.
- [6] 李润顺, 袁祥岩, 范志刚, 等. 红外成像系统作用距离的估算 [J]. 红外与激光工程, 2001, 30 (1) : 1-3, 11. LI R S, YUAN X Y, FAN Z G, et al. Operating range prediction of infrared imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30 (1) : 1-3, 11.
- [7] 车念曾, 闫达远. 辐射度学和光度学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990. CHE N Z, YAN D Y. Radiometry and photometry [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990.
- [8] 吴继宗, 叶关荣. 光辐射测量 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995. WU J Z, YE G R. Optical radiation measurement [M]. Beijing: China Machine Press, 1995.
- [9] 张建奇, 方小平. 红外物理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004. ZHANG J Q, FANG X P. Infrared physics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004.
- [10] 王兵学, 张启衡, 陈昌彬, 等. 凝视型红外搜索跟踪系统的作用距离模型 [J]. 光电工程, 2004, 31 (7) : 8-11. WANG B X, ZHANG Q H, CHEN C B, et al. A mathematical model for operating range of a staring IR search and track system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31 (7) : 8-11.