

文章编号:1672-8785(2015)01-0021-04

焦平面探测器红外成像系统探测作用距离估算

王晓明

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘 要: 建立了焦平面探测器红外成像系统对红外目标的探测作用距离估算模型。该模型综合考虑了系统观测环境条件、目标红外辐射特性和焦平面探测器红外成像系统对探测作用距离的影响,能够有效估计系统对特定飞行目标的探测作用距离。依据该模型可科学地对红外成像系统的各关键技术参数进行论证计算,从而加强系统的顶层设计,为工程实践奠定理论基础,指导相关成像系统的研制过程。因此该模型具有十分重要的工程应用价值。

关键词: 作用距离; 红外成像系统; 焦平面探测器

中图分类号:O43

文献标志码:A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.01.004

Estimation of Detection Distance for Infrared Imaging System with Focal Plane Detector

WANG Xiao-ming

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

Abstract: A model for estimating the detection distance of an infrared imaging system with a focal plane array is established. Taking the influences of system observation environment conditions, infrared radiation characteristics of targets and infrared imaging systems with focal plane arrays on the detection distance into account, the model can estimate the detection distance of an imaging system for a specific flight target effectively. With this model, the key technical parameters of an infrared imaging system can be calculated and verified scientifically. Thus, the top design of a system can be strengthened, the theoretical foundation can be laid for the engineering practice and the development process of the relative imaging system can be instructed. Therefore, the model is of very important value to engineering applications.

Key words: detection distance; infrared imaging system; focal plane detector

0 引言

随着当代武器装备技术的不断发展,高速、隐身化已成为优秀航空装备的突出特征,得到了各方的广泛关注。如何应对隐身飞机、巡航导

弹等飞行目标带来的威胁已经成为世界各国共同面临的难题。红外探测系统凭其极高的角度分辨率与具有极高距离分辨率的雷达相互配合,可对飞行目标进行更加平稳、更加精确的跟踪,

收稿日期: 2014-12-02

作者简介: 王晓明(1984-),男,吉林长春人,助理研究员,博士,研究方向为光电测量技术研究和光机机构设计。

E-mail: 13604311978@163.com

极大地缩短目标航迹的判定时间,从而可对威胁做出迅速有效的反应,降低损失风险。红外搜索与跟踪系统一直都是各国的军事研究热点之一,诸多应用于陆基、舰载和机载平台的红外搜索与跟踪系统已被研制出来,诸如瑞典的陆基 IRS700 IRS 系统、法国舰载武器系统上装备的 VAMPIR-MB IRST、美国 F-14D 战斗机上装备的 AAS-42 IRST 系统和俄罗斯苏-27SK 战斗机上装备的 OEPS-29 IRST 系统等一系列产品[1-6]。

面阵凝视型红外探测器相对于线阵型红外探测器具有两个方面的显著优势:(1)面阵凝视型红外探测器的积分时间更长,热灵敏度更高,更有利于提升系统的信噪比和极限作用距离;(2)在两者分辨率相同的情况下,应用面阵凝视型红外探测器的系统具备更高的搜索效率,实际应用价值更大。建立了焦平面探测器红外成像系统对红外目标的探测作用距离估算模型。该模型综合考虑了系统观测环境条件、目标红外辐射特性和焦平面探测器红外成像系统对探测作用距离的影响,能够有效估计系统对特定飞行目标的探测作用距离。

1 系统探测作用距离估算模型

红外系统作用距离主要由三个方面的因素决定:(1)观测的环境条件:作用距离与太阳高角、观测仰角等观测条件密切相关。观测仰角不一样时,大气透过率的差别很大,对作用距离影响就很大;(2)目标的辐射特性:红外辐射在大气中的衰减主要由大气的吸收和散射引起,其透过率与气象条件、观测天顶角、地理位置和季节等诸多因素有关;(3)红外成像系统的特性:红外成像系统的透过率、系统带宽、口径、信噪比和红外探测器特性决定了系统的探测能力[7-12]。

1.1 目标辐射特性

当空气流过物体时,有一部分贴近于表面,称为附面层。在这层内,由于紧贴着表面,流动受到了影响。附面层内的流动既可以是层流,也

可以是紊流。在飞行物体前面,空气气流变成完全静止的任意点,称为驻点。在这一点上,运动着的空气气流的动能会以高温和高压的形式转变成势能,这一温度就称为驻点温度。驻点温度可近似地认为是飞行目标蒙皮的表面温度,其计算公式如下(适用于 $M < 10$ 时):

$$T_s = T_0 [1 + r \left(\frac{\gamma - 1}{2} \right) M^2] \quad (1)$$

式中, T_s 是驻点温度,单位为 K; T_0 是周围大气的温度,单位为 K; r 是恢复系数,流动为层流时取 $r = 0.82$,流动为紊流时取 $r = 0.87$; γ 是空气的定压热容量和定容热容量之比,取 $\gamma = 1.4$; M 是飞行目标的马赫数。

确定飞行目标蒙皮表面温度后,把目标表面简化为一个发射率 $\varepsilon = 0.8$ 的灰体,按照朗伯余弦定理处理其角分布,并计算其辐射亮度 L_t ,得:

$$L_t = \frac{M_t \varepsilon}{\pi} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} d\lambda}{\pi} \cdot \varepsilon \quad (2)$$

式中, M_t 是目标光谱辐射出射度; λ_1 是系统工作波段下限; λ_2 是系统工作波段上限; C_1 是普朗克第一辐射常数,取为 $3.7415 \times 10^8 (\text{W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2)$; C_2 是普朗克第二辐射常数,取为 $1.43879 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$ 。

1.2 探测作用距离模型

假设飞行目标到探测系统的距离为 R ,探测系统光学入瞳直径为 D ,飞行目标相对探测系统所张立体角为 ω ,则有:

$$\omega = \frac{\pi D^2}{4R^2} \quad (3)$$

设在探测系统焦平面探测器响应波段内,飞行目标光谱单位波长辐射强度为 $J_{\lambda T} (\text{W}/\text{sr}/\mu\text{m})$,目标所在区域背景辐射强度为 $J_{\lambda O} (\text{W}/\text{sr}/\mu\text{m})$,该光程上大气透过率为 τ_a ,探测系统光学透过率为 τ_0 ,则得目标与背景辐射入射到焦平面探测器上的光谱辐射功率差为

$$P = \frac{\pi D^2}{4R^2} \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (J_{\lambda T} - J_{\lambda O}) d\lambda \quad (4)$$

设 R_λ 为探测器的单色响应率 (V/W),探测器的均方根噪声电压为 V_n ,单色比探测率为 D^* ,

探测单元的面积为 A , 等效噪声带宽为 Δf , 则有:

$$R_{\lambda} = \frac{V_n D^*}{\sqrt{A \Delta f}} \quad (5)$$

设信号衰减因子为 δ , 目标像在探测器上所占的像元个数为 N_t , 则探测器内一个探测单元所产生的信号电压为

$$V_s = \frac{P \cdot R_{\lambda}}{N_t} = \frac{V_n \delta \pi D^2 \tau_a \tau_0 D^*}{4 R^2 N_t \sqrt{A \Delta f}} \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (J_{\lambda T} - J_{\lambda O}) d\lambda \quad (6)$$

即有:

$$R^2 = \frac{\delta \pi D^2 \tau_a \tau_0 D^*}{4 (V_s / V_n) R^2 N_t \sqrt{A \Delta f}} \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (J_{\lambda T} - J_{\lambda O}) d\lambda \quad (7)$$

假设飞行目标的有效辐射面积为 A_t , 则有:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (J_{\lambda T} - J_{\lambda O}) d\lambda = (L_T - L_O) A_t \quad (8)$$

则有:

$$R = \sqrt{\frac{\delta \pi D^2 \tau_a \tau_0 D^*}{4 (V_s / V_n) R^2 N_t \sqrt{A \Delta f}} \tau_0 (L_T - L_O) A_t} \quad (9)$$

1.3 大气和系统参数的确定

红外辐射通过大气时会有所衰减, 其透过率与地理位置、季节、气象条件和观测天顶角等

诸多因素有关。使用 LOWTRAN7 软件计算大气透过率。LOWTRAN7 是一个带参数和模式的低分辨率大气透过率和背景辐射计算软件包。它以 20 cm^{-1} 的光谱分辨率计算 0 到 50000 cm^{-1} ($0.2 \mu\text{m} \sim \infty$) 的大气透过率和大气背景辐射等目标辐射量。

对于红外光学系统, 需要确定的主要参数有焦距、口径和视场。首先, 根据空间分辨率的限制和成像尺寸的要求确定光学系统的焦距, 然后根据系统的最大可探测距离设计光学系统的口径, 最后通过选定的红外成像组件确定系统的视场大小, 并依据相关参数复算系统的作用距离。

2 模型估算实例

本节以飞行高度为 6 km、速度为 0.1 马赫 ~ 0.6 马赫、机尾横截面直径为 4 m 的波音 737 型客机为探测目标。选用光学通光口径为 200 mm、焦距为 400 mm、系统波段为中波红外、波长范围为 $3.7 \mu\text{m} \sim 4.8 \mu\text{m}$ 、焦平面探测器像元大小为 $15 \mu\text{m}$ 的红外成像系统分析其对探测目标的最大作用距离。

2.1 飞机温度的估算

假设飞机的飞行速度为 0.1 马赫 ~ 0.6 马赫, 飞机周围的大气温度为 10°C , 则飞机蒙皮温度的计算结果见表 1。

表 1 不同飞行速度下飞机表面的蒙皮温度

飞机速度 (马赫)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
飞机蒙皮温度 (K)	283.4	284.8	287.2	290.4	294.6	299.7

2.2 大气透过率的估算

由于探测目标相对于红外成像系统的高角是一个逐渐变大然后又逐渐变小的过程, 针对这一过程, 取几个特征高角进行透过率分析, 分别取高角为 20° 、 30° 、 45° 、 60° 和 75° 。由计算结果可知, 目标距离大于 30 km 时, 距离的增加对透过率的影响较小, 所以以目标距离 40 km 为例进行分析计算。使用 LOWTRAN7 软件计算 3.7

$\mu\text{m} \sim 4.8 \mu\text{m}$ 波段的透过率。不同窄波段的透过率不同, 使用平均透过率来近似代替该波段的透过率, 计算得到的不同高角的平均大气透过率见表 2。

表 2 不同高角时的平均大气透过率

目标高角	20°	30°	45°	60°	75°
透过率	0.3325	0.3927	0.4452	0.4744	0.4855

2.3 红外成像系统的主要特性

红外成像系统中与作用距离相关的参数见表 3。

表 3 红外成像系统中与作用距离相关的参数

特性参数	红外成像系统
τ_0 光学透过率	70%
A_0 光学系统入瞳接收面积	31360mm ²
D^* 探测器比探测度	$D^* = 3 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$
A_d 像元面积	$0.0015^2 = 2.25 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$
N 目标占像元数	$3 \times 3 = 9$
Δf 噪声等效带宽	$\Delta f = K/t_d$ $= \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{0.004} = 196.3 \text{ Hz}$
V_S/V_N 信噪比	6

2.4 作用距离的估算结果

飞行目标的迎头等效直径为 4 m, 面积为 12.6 m²。根据作用距离的计算公式, 飞行目标的速度为 0.6 马赫, 不同跟踪高角情况下作用距离的估算结果见表 4。

表 4 不同跟踪高角情况下作用距离的估算结果

高角	中波
20°	55 km
30°	60 km
45°	64 km
60°	66 km
75°	67 km

3 结论

通过分析飞行目标的红外辐射特性, 推导焦平面探测器红外成像系统的作用距离方程, 并以波音 737 客机为探测目标分析某型红外成像系统的极限作用距离, 可以得出以下结论:

(1) 飞行目标在某一高度巡航时, 大气的平均透过率随跟踪高角的变化而变化, 从而会影响探测目标到探测器靶面的辐射照度。高角越大, 极限作用距离越远。

(2) 在相同的大气条件下, 飞行目标的速度越快, 对其的探测作用距离越远。

(3) 光学成像系统的入瞳口径和透过率、探测器的比探测度、像元尺寸、信噪比和目标所占像元数对红外成像系统的作用距离影响极大, 设计中应着重加以考虑。

参考文献

- [1] Arie de J.IRST and its Perspective[C].SPIE,**2522**:206-213.
- [2] Gill T. IR FPA Phase Noise Effects in IRST Design [C].SPIE,**3698**:520-529.
- [3] Ceraid C H. Testing and Evaluation of Infrad Imaging System[M]. Second edition, JCD abd SPIE Optical Engineering Press, 1998:24-37.
- [4] 舒金龙. 国外红外搜索跟踪系统的研制现状与发展趋势 [J].现代防御技术,2003,**31**(4):112-116.
- [5] 王泽和. 舰用 IRST 系统的发展及应用前景 [J]. 现代防御技术,2001,**29**(1):46-49.
- [6] 晋培利, 李晓林, 毛登森, 等. 红外预警探测系统的现状和发展 [J]. 光电技术应用,2006,**21**(3):1-4.
- [7] 牟达, 王建立, 陈涛. 凝视型红外搜索跟踪系统对高速飞机作用距离的分析 [J].光学技术, 2007,**32**(3):420-423.
- [8] 牟达, 王建立, 陈涛. 红外搜索跟踪系统作用距离的分析 [J]. 仪器仪表学报,2006,**27**(6):93-95.
- [9] Rich ARD D H, Jr. Infrared System Engineering[M].John Wiley&Sons,Inc.1969.
- [10] 何照才, 胡保安. 光学测量系统[M]. 北京: 国防工业出版社,2002:188-198.
- [11] 陈玻若. 红外系统[M]. 北京: 兵器工业出版社,1995:225-227.
- [12] 王娟. 红外成像系统的作用距离估算 [D]. 成都: 电子科技大学, 2004.