

复杂背景下玫瑰扫描红外探测系统作用距离评估方法

李文通^{1,2}, 丁 雯^{1,2}, 朱 牧^{1,2}

- (1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;
2. 中国航天科技集团公司 红外探测技术研发中心, 上海 201109)

摘 要: 对复杂背景下传统作用距离方程无法准确评估红外探测系统作用距离的问题, 提出了玫瑰扫描体制下复杂背景中不同辐射亮度区域被探测的概率计算方法, 结合推导的玫瑰扫描红外探测系统作用距离模型, 得出复杂背景下玫瑰扫描红外探测系统作用距离概率模型。基于红外热像仪采集的背景灰度计算玫瑰扫描红外探测系统响应脉冲幅值的计算方法, 利用外场实测数据对该模型进行验证, 并与实验结果进行了对比分析, 结果证明改进后的概率模型能够一定程度解决复杂背景玫瑰扫描红外探测系统作用距离估算的问题, 具有一定的实用价值。

关键词: 作用距离; 玫瑰扫描; 复杂背景

中图分类号: TJ765.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1004002

Method for estimating operating distance of Rosette scan infrared detection system under complex background

Li Wentong^{1,2}, Ding Wen^{1,2}, Zhu Mu^{1,2}

- (1. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China;
2. Development Center of Infrared Detection Technology, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201109, China)

Abstract: Operating distance of Rosette scan infrared detection system is hard to be estimated by infrared detector operating distance formula in complex background. So correlated to the operating distance model of Rosette scan infrared detection system, the model working in complex background was developed. Using the algorithms that calculates the Rosette scan infrared detection system responses pluses characteristics via gray scale of background collected by infrared thermal imager and verified by field tests, the result shows that the improved model can estimate the operating distance of Rosette scan infrared detection system under complex background more efficiently.

Key words: operating distance; Rosette scan; complex background

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-03-20

作者简介: 李文通(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事光电探测、制导控制方面的研究。Email: xvanyuanbai@163.com

0 引言

红外探测系统采用被动探测,具有结构简单、隐蔽性好等特点,在军事领域得到广泛应用,如机载、舰载火控系统,地面防空系统以及导弹制导等。对于红外探测系统而言,作用距离是一项关键的战术技术指标。目前,玫瑰扫描(以下简称玫扫)红外探测体制已经得到较为广泛和成熟的应用,对于玫瑰扫描红外探测系统的作用距离要求多为理想条件下指标,在考核作用距离指标时如果单独依赖理论计算值,不足以确保在实际应用中能满足战术技术指标要求。在外场实际测量时,由于大气复杂背景的影响,测量结果与理想条件下的理论值存在一定差距,由于背景的影响是随着时间变化的,即在同一次测量实验中,玫瑰扫描红外探测系统作用距离的测量结果也不是一个确定的值。

国内外学者针对红外系统作用距离已经进行了较多的研究,参考文献[1-2]分析了大气环境条件、目标几何形状以及以及目标和背景热辐射特征对红外成像系统作用距离的影响,对系统作用距离的计算进行了修正。参考文献[3]引入概率分布的思想对传统作用距离方程进行了改进,提出了通过背景的红外图像灰度信息计算其红外辐射亮度的方法。该方法主要是针对外成像系统而研究的,由于玫瑰扫描红外探测系统具有跨象限非均匀扫描的特性,不适用于该方法。

基于上述研究成果和情况,文中根据红外光电探测器的一般作用距离方程,推导了玫瑰扫描红外探测系统的目标作用距离方程,提出了复杂背景中不同辐射亮度区域被探测的概率计算方法,最终得出复杂背景下玫瑰扫描红外探测系统作用距离概率模型。

1 红外探测距离模型

传统的红外搜索跟踪系统的作用距离方程为^[1]:

$$R = \left[\frac{A_0 J_\lambda \tau_o \tau_a D^*}{(A_d \Delta f)^{1/2} (V_s/V_n)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中: R 为红外探测系统作用距离; A_0 为光学系统入瞳的面积; A_d 为探测器有效光敏面面积; J_λ 为目标波段辐射强度; τ_a 为目标与传感器之间的大气透

过率; τ_o 为系统光学光谱透过率; D^* 为波段探测率; Δf 为等效噪声带宽; V_s/V_n 为系统信噪比。从公式(1)可以看出影响探测距离的因素:包括目标特性,大气透过率,光学系统特性,探测器的性能以及系统特性和信号处理,当模型中 V_s/V_n 为1时的距离定义为理想作用距离。大多数的探测距离分析方法都是基于上述模型,该模型存在一定的局限性,仅仅考虑了目标到达探测器光电传感器上的辐射强度是否满足探测要求,并没有考虑背景辐射的影响。

目标距离探测系统较远时,可按点源计算,此时目标对红外系统的张角小于系统瞬时视场,目标相当于在红外背景图像中存在的一个亮点。对于点源扫描探测系统,目标辐射能量经过信息电路处理后形成目标脉冲,能够被探测到。设目标的有效面积为 A ,目标距系统的距离为 R ,目标对系统的张角为 ω' ,系统瞬时视场为 $\omega(\omega > \omega')$ 。当探测系统扫过目标时,在探测器光敏面上同时接收到目标和背景的辐射。这时目标与背景在距离 R 的探测器上的光谱辐照度为:

$$H(\lambda) = (N_t(\lambda)\omega' + N_b(\lambda)(\omega - \omega'))\tau_a \quad (2)$$

式中: $N_t(\lambda)$ 为目标光谱辐照亮度; ω 为探测系统瞬时视场(球面度); $N_b(\lambda)$ 为背景光谱辐照亮度。

当视场中仅有背景没有目标时,探测器上的光谱辐照度为:

$$H(\lambda) = N_b(\lambda)\omega\tau_a \quad (3)$$

经光学系统聚焦,会聚到探测器上的光谱辐射功率分别为:

$$P_t(\lambda) = H_t(\lambda)A_0\tau_o = (N_t(\lambda)\omega' + N_b(\lambda)(\omega - \omega'))\tau_a A_0\tau_o$$

$$P_b(\lambda) = H_b(\lambda)A_0\tau_o = N_b(\lambda)\omega\tau_a A_0\tau_o \quad (4)$$

目标的有效输出信号电压差 V_s 为:

$$V_s = (P_t(\lambda) - P_b(\lambda))R(\lambda) = (N_t(\lambda) - N_b(\lambda))\omega'\tau_a A_0\tau_o R(\lambda) \quad (5)$$

式中: $R(\lambda)$ 为探测器电压响应率。根据:

$$\omega' = A/R^2$$

$$R(\lambda) = V_n D^* / (A_d \Delta f)^{1/2} \quad (6)$$

结合公式(5)、(6)可以得到在背景辐射情况下的红外系统作用距离:

$$R = \left[\frac{(N_t(\lambda) - N_b(\lambda))A A_0 \tau_o \tau_a D^*}{(A_d \Delta f)^{1/2} (V_s/V_n)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

重新推导的作用距离模型中考虑了背景辐射对探测系统的影响。

2 基于玫瑰扫描的目标作用距离模型

2.1 玫瑰扫描作用距离模型

对于点源扫描探测系统,当瞬时视场扫过目标时,系统瞬时视场对目标空间采样,可以等效为一个空间低通滤波的过程,系统等效噪声带宽为:

$$\Delta f = 1/2 \tau_d \quad (8)$$

式中: τ_d 为驻留时间。

$$\tau_d = \frac{n \omega T_f \eta_{sc}}{\Omega(1-q)} \quad (9)$$

式中: n 为探测器并联元数; T_f 为扫描帧周期; q 为扫描重叠率; Ω 为扫描总视场 (立体角); η_{sc} 为扫描效率。

$$R = \left[\frac{(N_i(\lambda) - N_b(\lambda)) A A_0 \tau_o \tau_d D^* \left(\frac{n \omega T_f \eta_{sc}}{\Omega(1-q)} \right)^{1/2}}{(A_d/2)^{1/2} (V_s/V_n)} \right]^{1/2} \quad (10)$$

玫瑰扫描点源红外探测系统,通过一对转向相反的光学元件来实现,它们将入射光偏转一定角度扫描后形成闭合的玫瑰线图案。玫瑰线扫描图案(见图 1)由 N 个花瓣组成,花瓣长度为 ρ (视场角半径)。假设实现玫瑰线扫描的两块转向相反的反射镜旋转频率分别为 f_1 和 f_2 ($f_1 > f_2$), f 是 f_1 和 f_2 的最大公约数。

$$N_1 = \frac{f_1}{f} \quad N_2 = \frac{f_2}{f} \quad (11)$$

则有花瓣数 $N = N_1 + N_2$ 。

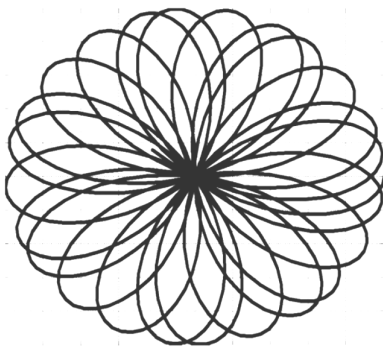


图 1 玫瑰线扫描图形
Fig.1 Rosette scan graph

为了提高玫瑰扫描探测系统对目标的作用距离,瞬时视场要做到极小,与点目标辐射源尺寸相匹配,同时有要保证在扫描一帧时能够覆盖整个扫描视场,提高对目标的捕获概率。探测系统的瞬时视场

ω (瞬时视场直径) 要满足以下约束方程。

$$\omega_r = \frac{2\pi\rho}{N} \cos \frac{\pi}{\Delta N} \quad (12)$$

式中: $\Delta N = N_1 - N_2$ 。

$$\frac{\omega_r \rho}{N} = \frac{2\pi}{N} \cos \frac{\pi}{\Delta N} \quad (13)$$

结合公式 (10)、(13) 可以得到玫瑰扫描探测体制下目标作用距离公式:

$$R = \left[\frac{(N_i(\lambda) - N_b(\lambda)) A A_0 \tau_o \tau_d D^* \left(\frac{(f_1 + f_2) \eta_{sc}}{(1-q)} \right)^{1/2} \frac{8\pi}{N^{3/2}} \cos \frac{\pi}{\Delta N}}{A_d^{1/2} (V_s/V_n)} \right]^{1/2} \quad (14)$$

V_s/V_n 为 1 且无背景噪声影响时的得到的距离为玫瑰扫描探测系统的理想作用距离 R_0 。

$$R_0 = \left[\frac{N_i(\lambda) A A_0 \tau_o \tau_d D^* \left(\frac{(f_1 + f_2) \eta_{sc}}{(1-q)} \right)^{1/2} \frac{8\pi}{N^{3/2}} \cos \frac{\pi}{\Delta N}}{A_d^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (15)$$

公式(14)考虑了背景的影响,利用其解算出的作用距离是一个定值。实际应用中大气背景是复杂的,其对红外探测系统的影响并非一成不变的。图 2 所示为 2 种常见复杂背景的红外图像,图 2(a)为海天背景,图 2(b)为云天空背景。它们的图像中存在多等级背景噪声值且分布混乱。在这些背景下,目标可能出现在红外辐射能力较小的背景区域内,也可能淹

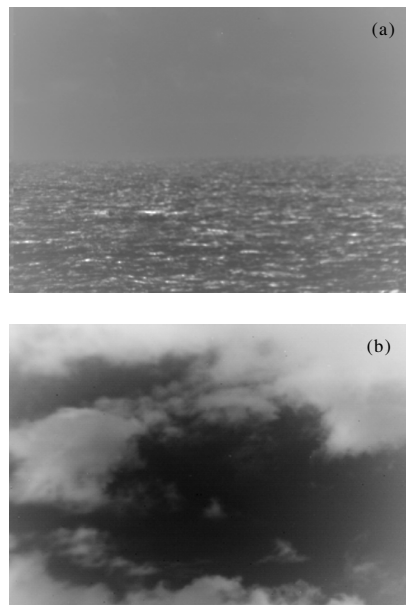


图 2 复杂背景红外图像
Fig.2 IR image of complex background

没在辐射能力较强的背景区域内,因此在复杂背景影响下,红外探测系统对目标的作用距离存在多个可能值。根据公式(14)求解定值的方法,无法解决在复杂背景条件下玫瑰扫描红外探测系统作用距离的评价问题。

2.2 改进作用距离模型

复杂背景对作用距离计算造成的影响,主要表现在复杂背景红外辐射的不确定性,以及背景红外辐射随时间的渐变性,这就造成在同一次测量实验中,所获得的红外探测系统作用距离结果并非唯一确定的。但对于确定的红外背景图像,根据玫瑰扫描的原理,按瞬时视场大小将扫描视场对应的背景划分成确定数目的瞬时探测区域,根据这些区域确定的背景红外辐射亮度存在确定的多个可能值,每个红外辐射亮度出现的概率是确定的。考虑到背景红外辐射对作用距离的影响,在确定的复杂背景下,玫瑰扫描红外探测系统对目标的作用距离存在多个可能值,将多个可能值出现的总数目对应的概率为 1,那么每个可能值出现的概率是可以计算得到的。

基于以上分析,文中引入概率分布的思想对玫瑰扫描探测系统的作用距离方程进行了如下改进:将受背景辐射亮度影响的信噪比变量改为一个多维向量,并且每个向量成员存在一个出现的概率,相应的作用距离也变成一个多维向量,也存在一个出现的概率。作用距离向量与信噪比向量的维数相等,即背景红外辐射亮度存在的可能值的数量。改进后的作用距离方程为:

$$\left[R_{1(p_1)}^2, R_{2(p_2)}^2, \dots, R_{N(p_k)}^2 \right]^T = \left[\frac{AA_0 \tau_o \tau_a D^*}{A_d^{1/2} (V_s/V_n)} \left(\frac{f_1+f_2}{1-q} \right) \eta_{sc} \right]^{1/2} \frac{8\pi}{N^{3/2}} \cos \frac{\pi}{\Delta N} \left[(N_k(\lambda) - [N_{b1}(\lambda)_{(p_1)}, N_{b2}(\lambda)_{(p_2)}, \dots, N_{bk}(\lambda)_{(p_k)}])^T \right] \quad (16)$$

式中: $\left[R_{1(p_1)}^2, R_{2(p_2)}^2, \dots, R_{N(p_k)}^2 \right]^T$ 为作用距离向量; $[N_{b1}(\lambda)_{(p_1)}, N_{b2}(\lambda)_{(p_2)}, \dots, N_{bk}(\lambda)_{(p_k)}]^T$ 为背景红外辐射向量, K 为向量的维数; P_i 为向量第 i 维对应的出现概率,且满足 $\sum_{i=1}^K P_i = 1$ 。当背景单一时,作用距离向量的维数为 1,对应的出现概率为 100%,该方程将退化为公式(14)。新的作用距离方程中背景辐射向量是玫瑰扫描红外

探测系统扫描背景获得的背景辐射亮度向量,每一维向量出现的概率与背景红外图像中出现的概率不同,这主要是由于玫瑰扫描系统对空间扫描是跨象限非均匀扫描,探测视场中心的区域被多次重复扫描,而视场边缘区域仅能被扫描一次。因此,与红外辐射亮度在红外图像中存在的概率相比,玫瑰扫描探测系统对背景扫描后,探测视场中心的红外辐射亮度向量出现的概率会因玫瑰扫描特点而增加,相对的,视场边缘区域的红外辐射亮度出现的概率会下降。计算出红外辐射向量各维数出现的概率,就可以得出复杂背景下多个可能的作用距离及其出现的概率。可以看出,新方程涵盖了背景单一以及复杂背景下的作用距离计算模型。改进后的作用距离方程考虑到了玫瑰扫描探测系统对背景的非线性扫描特征,以及背景红外辐射的复杂情况,引入了更多的信息描述背景和玫瑰扫描探测系统自身特点对作用距离的影响。求解复杂背景下作用距离的关键是得到背景红外辐射亮度信息,包括背景红外辐射亮度的大小以及对应的概率。

3 复杂背景红外辐射亮度及概率计算方法

背景红外辐射特性的复杂主要是由两个原因造成:一是组成背景的物质成分难以给出简单或精确的描述;二是背景起伏造成的不同区域辐射能力不同,很难准确对复杂背景的红外辐射特性进行建模描述。文中利用红外成像系统获取复杂背景的红外辐射数据,计算复杂背景下玫瑰扫描红外探测系统的作用距离。

3.1 红外辐射亮度计算

采集红外背景选用的红外成像系统,其入瞳处的红外辐射亮度与图像灰度值存在一定函数关系,在试验室利用黑体来标定红外成像系统的红外辐射亮度—灰度函数关系。利用拟合的红外辐射亮度—灰度拟合函数,结合红外成像系统采集的复杂天空背景的红外信息,可以计算出背景的红外辐射亮度信息。入瞳处红外辐射亮度值与成像灰度值的函数关系通过试验数据拟合获得,通过拟合函数解算出入瞳处的红外辐射亮度值 N_{out} ,利用红外辐射大气透过率软件 LOWTRAN7 根据试验时成像距离、时间以及环境参数等计算出红外辐射大气透过率 τ_a 。

背景红外辐射亮度 $N_b=N_{out}/\tau_a$ 。

3.2 背景红外辐射亮度出现概率计算

由于玫瑰扫描红外系统对空间进行跨象限扫描,具有视场中心扫描覆盖率高,边缘覆盖率低的特点,玫瑰扫描对整个视场完成一个周期扫描时,对不同区域扫描覆盖率是非线性的,视场中心被扫描的次数较多,视场边缘仅会被扫描一次。在复杂背景下的红外辐射亮度出现概率不能通过直接统计红外成像系统采集的红外辐射亮度信息获得。

一般红外成像系统的视场远大于玫瑰扫描探测系统视场,从红外成像系统获得的一幅背景红外信息图像中,根据玫瑰扫描探测系统视场中心的位置和扫描视场大小确定玫瑰扫描探测的背景区域,根据玫瑰扫描原理以瞬时视场张角和实际系统采样周期对背景区域进行扫描,每个采样周期获得一个瞬时视场范围内的背景红外辐射亮度信息。玫瑰扫描一个扫描周期内按瞬时视场大小在设定采样周期下对背景图像的总扫描覆盖次数为 M 。按红外辐射亮度将背景红外图像划分为 K 个亮度等级,某一同辐射亮度等级的区域经扫描采集到的次数记为 K_{Mi} ,玫瑰扫描探测下每个亮度等级按被扫描的次数计算被探测的概率为 P_i ,有:

$$\sum_{i=1}^K K_{Mi}=M, P_i=\frac{K_{Mi}}{M} \quad (17)$$

$\sum_{i=1}^K P_i=1$,即所有红外辐射亮度等级存在概率和为1。根据目标辐射亮度和背景红外辐射亮度向量可计算出目标作用距离在复杂背景下的多个可能值及其存在概率 P_i 。

4 计算实例及分析

以某型玫瑰扫描红外探测系统外场跟飞试验数据为例,评估其在复杂云背景下对某型固定翼飞机的作用距离,利用公式(15)计算出理想条件下无背景影响时对该固定翼飞机的理论作用距离记为 R_{a0} 。跟飞时玫瑰扫描红外探测系统在飞机进入点附近扫描,飞机进入点一段时间玫瑰扫描扫描视场内云背景红外图像如图 3 所示,以该背景分析玫瑰扫描红外探测系统在复杂背景下的的作用距离。

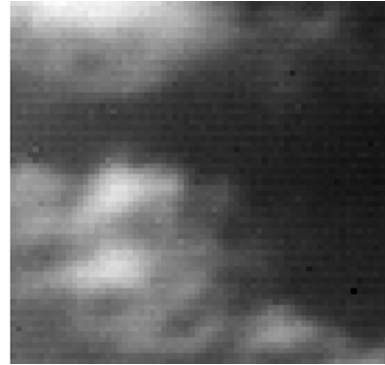


图 3 飞机进入点云背景

Fig.3 Background of airplane entering point cloud

试验中同时用红外成像系统对背景进行了监测,红外成像系统采集的该背景区域内的图像灰度统计结果如图 4(a)所示,灰度统计精度为 1。经过玫瑰扫描非线性扫描后的灰度统计结果如图 4 (b)所示。对比两幅图可以看出,红外成像采集的信息中灰度 2 640 附近的背景出现概率明显高于其他灰度区域。由于玫瑰扫描在视场中心扫描覆盖率高,边缘扫描覆盖率低,经玫瑰扫描探测后,在玫瑰扫描系统下灰度 2 640 附近的背景出现概率下降,灰度 2 660 和 2 680 附近的背景出现概率上升。并且从图 3 红外图像上看左上边缘最亮的区域对应的灰度 2 720~2 740 背景区域,在玫瑰扫描探测下并未被采集到,这是

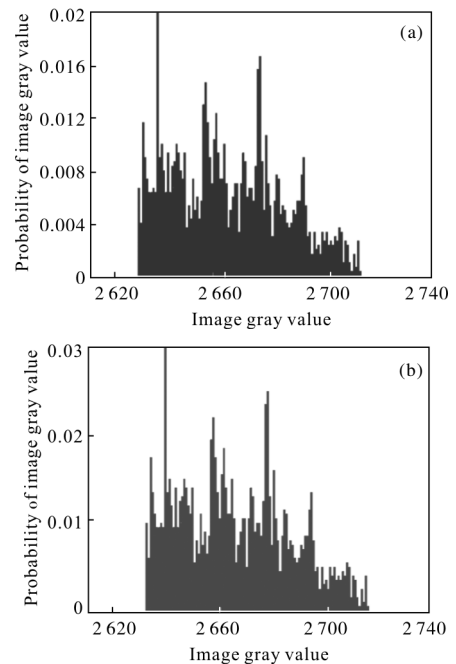


图 4 灰度统计概率结果

Fig.4 Probability of image gray value

由于该玫瑰扫描探测系统对全视场的覆盖率未达到 100%, 没有探测到该区域导致。玫瑰扫描系统对背景的探测与红外成像系统相比损失了部分背景信息。

由于红外成像系统与玫瑰扫描系统在试验时布置在相同位置, 红外成像系统入瞳处的背景红外辐射亮度可近似等效为玫瑰扫描探测系统获取的背景红外辐射亮度。利用实验室标定的红外成像系统的入瞳处红外辐射亮度—灰度拟合函数, 通过红外灰度计算入瞳处红外辐射亮度值, 玫瑰扫描探测下背景红外辐射亮度统计结果见图 5, 参考红外辐射大气透过率软件 LOWTRAN7 根据试验时成像距离、时间以及环境参数等计算出的大气透过率, 本次数据分析中将大气透过率值取为 0.85, 根据背景红外辐射亮度的多个值及其存在概率, 计算出复杂背景下玫瑰扫描红外探测系统对固定翼飞机的多个可能作用距离, 与理论上无背景影响时的最大作用距离 R_{a0} 的比值及其存在概率统计结果见图 6。

理论计算无背景影响时该玫瑰扫描探测系统对某固定翼飞机的最大理论作用距离 R_{a0} 为 15 km, 根据改进后的作用距离方程计算, 最小的作用距离约为 12.37 km (最小作用距离相对 R_{a0} 的比约为 0.824 5), 最大作用距离约为 12.58 km, 可统计出在此背景下有 75% 的概率作用距离大于 12.47 km。

表 1 玫瑰扫描红外探测系统跟飞结果统计

Tab.1 Tracking result of Rosette scan infrared detection system

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Distance/km	12.42	12.40	12.53	12.42	12.15	12.22	11.23	12.06	12.52	11.86	11.81	12.50

试验数据结果显示最小作用距离 11.23 km, 最大作用距离为 12.53 km, 均低于理论分析值, 12 组数据中 9 组数据(75%)作用距离大于 12.06 km, 低于理论统计概率结果的作用距离。一方面在计算中未考虑大气透过率随高度和距离非线性变化等情况, 理论计算中取 0.85 高于试验中的实际大气透过率值, 另一方面固定翼飞机进入时的姿态以及航路波动也使目标的实际辐射亮度低于理论目标辐射亮度取值, 导致理论计算作用距离值高于实际跟飞结果。

实际跟飞 12 次的结果见表 1。

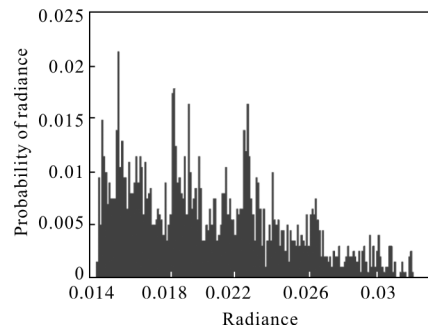


图 5 背景红外辐射亮度统计结果

Fig.5 Probability of background infrared radiance

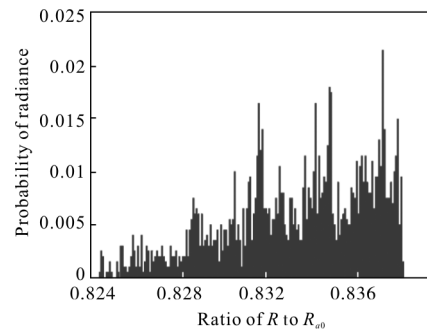


图 6 改进方程计算的可能作用距离相对最大理论作用距离比的统计结果

Fig.6 Probability of the ratio of operating distance with improved equation calculation to maximum theoretical operating distance

5 结论

文中分析了复杂背景对玫瑰扫描红外探测系统作用距离的影响, 在此基础上对传统作用距离方程进行了改进, 实现了复杂背景影响下玫瑰扫描红外探测系统的作用距离概率的估算, 在计算中对大气透过率、目标运动姿态和轨迹影响参数做了一定的简化处理, 理论计算结果与实际跟飞结果的误差在 10% 以内, 文中提供了一种解决复杂背景玫瑰扫描红外探测系统作用距离估算的方法, 改

进后的方程与传统的点源作用距离方程相比,对背景复杂红外辐射及玫瑰扫描自身的特征进行了更详细的描述,具有一定的实用价值。进一步提高改进方程的评估精度需要对方程中与大气透过率、目标辐射亮度等因素的影响进行更精确的建模或数据拟合。

参考文献:

- [1] Gao Sifeng, Wu Ping, He Manli, et al. Estimation on the operating range of infrared system under complex atmosphere condition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 941-944. (in Chinese)
高思峰, 吴平, 何曼丽, 等. 复杂大气条件下红外系统作用距离的估算[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 941-944.
- [2] An Chengbin, Zhang Xining, Chen Ying, et al. Calculation of function range of infrared imaging system [J]. *Laser and Infrared*, 2010, 40(7): 716-719. (in Chinese)
安成斌, 张熙宁, 陈盈, 等. 红外成像系统作用距离计算[J]. 激光与红外, 2010, 40(7): 716-719.
- [3] Diao Weihe, Mao Xia, Liang Xiaogeng. Method for estimating operating distance of IR imaging system under complex background [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(8): 1022-1026. (in Chinese)
刁伟鹤, 毛峡, 梁晓庚. 复杂背景红外成像系统作用距离估算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(8): 1022-1026.
- [4] Richard D Hundson. *Infrared System Engineering* [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1969.
- [5] Wu Hanping. Operating distance equation for infrared point target detect system based on temperature characteristic of detectivity and background influence [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(6): 341-344. (in Chinese)
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.
- [6] Zhang Le, Liang Dongming, Yao Mei, et al. Equivalent calculation of operating range ofIRST [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 26-30. (in Chinese)
张乐, 梁冬明, 姚梅, 等. 红外搜索跟踪系统作用距离等效折算[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 26-30.
- [7] Jia Qinglian, Qiao Yanfeng, Zheng Wenyuan. Analysis for point target detection range of panoramic searching system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 938-942. (in Chinese)
贾庆莲, 乔彦峰, 郑文渊. 周视搜索系统对点目标的作用距离分析[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 938-942.