复杂背景下红外点目标探测概率估算

毛 峡 常 乐 刁伟鹤

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 红外成像系统对点目标的探测概率在实际应用中往往受到复杂背景的极大影响,而现有的计算方法并不能适用于复杂背景下的探测概率估算. 首先从红外成像系统对点目标的作用距离模型出发,分析了探测概率与信噪比、作用距离的关系,推导出单一背景下红外点目标的探测概率估算方法;然后,利用红外成像系统的亮度-灰度函数,通过背景的红外图像灰度信息计算得到其红外辐射亮度;最后,引入概率统计的思想对单一背景下探测概率的估算方法进行了改进,提出了复杂背景下红外点目标探测概率的估算方法. 实验结果表明:该估算方法可以有效评估实际应用中典型复杂背景对红外成像系统的点目标探测概率的影响.

关 键 词: 探测概率; 作用距离; 复杂背景; 红外点目标; 红外成像系统; 信噪比

中图分类号: TN 215

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)11-1429-06

Estimation for detection probability of infrared point target under complex backgrounds

Mao Xia Chang Le Diao Weihe

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The detection probability of infrared(IR) imaging system for point target will always be affected by complex backgrounds, but present methods can not be applied in the condition of complex backgrounds. Beginning from the model of operating distance of IR imaging system for point target, the relationship between detection probability, signal-to-noise ratio(SNR) and operating distance was analyzed, the estimation method under single background was gained. Then through the gray-to-radiance function of IR imaging system, the background's IR radiance with its gray-value information was calculated. At last, the esimation method for single background was improved and the method for estimating the detection probability of infrared point target under complex background was proposed. The experimental results demonstrated that this method could effectively estimate the detection probability of IR imaging system under complex background in practical applications.

Key words: detection probability; operating distance; complex background; infrared point target; IR imaging system; signal-to-noise ratio(SNR)

红外成像系统以其完全被动的工作方式、强隐蔽性、精确的目标分辨能力、强大的低空探测能力和抗干扰能力等优点,在军事领域得到了广泛应用.

目前,红外成像系统中的一个重要问题是实际探测性能与理论探测性能之间往往存在较大差异. 一系列实验结果表明,这种差异主要是由复杂背景的红外辐射造成的. 在复杂背景红外辐射的干扰下,红外成像系统在理论作用距离上对点目标的探测概率将急剧下降以致无法完成探测任

收稿日期: 2010-06-30; **网络出版时间**: 2011-11-14 17:20; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111114.1720.017

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111114.1720.017.html

基金项目: 航天支撑技术基金资助项目

作者简介: 毛 峡(1952 -),女,浙江义乌人,教授,moukyou@buaa.edu.cn.

务,这不仅极大地制约了系统的应用,甚至可能造成战术安排上的致命失误. 为了避免这种失误并期望对红外成像系统的研制和应用做出指导改进,亟需找到一种对实际应用中的红外成像系统探测概率进行合理估算的方法.

一般情况下,作用距离和探测概率均针对红外点目标而言,是衡量红外成像系统探测性能的重要指标,目前,国内外学者已经对作用距离估算模型进行了较为深入的研究,提出了多种作用距离计算模型并作出了一些改进[1-4]. 与此同时,学者们也提出了涉及人工判别的红外成像系统探测概率的计算模型[5-6]. 然而,关于自动探测的红外成像系统的探测概率估算研究并不深入. 文献[7-8]虽然提出了红外成像系统探测概率的基本计算方法,但是仅考虑了系统自身的设计原理,而忽略了外界因素,尤其是复杂背景红外辐射的影响. 因此,必须对现有的探测概率估算方法进行改进和完善,使其尽可能地符合实际需求.

针对上述问题,本文首先选择并推导了基于噪声等效辐照度(NEFD, Noise Equivalent Flux Density)的点目标作用距离计算模型;然后推导出单一背景下探测概率的估算方法,并分析了背景红外辐射对红外成像系统探测概率的影响;之后,通过引入概率分布的思想,并利用一种通过背景成像的灰度信息计算红外辐射亮度的方法,提出了一种可适应各类复杂背景的探测概率估算方法;最后,通过实验对本文提出的估算方法的有效性进行了验证.

1 作用距离计算模型的推导

红外成像系统的探测概率和虚警概率主要是由输入信噪比和阈值信噪比决定的. 一般情况下,阈值信噪比是一个固定值,而系统的输入信噪比则会随着作用距离的不同而变化. 可见,探测概率、虚警概率、信噪比以及作用距离之间并不是相互独立的关系. 因此,在讨论探测概率的估算之前,有必要对作用距离的计算模型进行简单的推导.

在某一距离,当红外成像系统接收的目标红外辐射恰好能够满足系统的阈值信噪比时,这个距离就是红外成像系统的作用距离. 红外成像系统在探测目标时,目标运动由远及近,成像最先由点目标开始,故作用距离的计算通常是针对点目标而言.

目前,在实验室环境下测试红外成像系统性能时,常采用基于噪声等效温差(NETD, Noise Equivalent Temperature Difference)的作用距离模型. 但通过其理论推导过程可以证明,基于 NETD 的作用距离模型仅适用于对面源目标的作用距离估算,而且 NETD 是实验室环境下的理想测试值,因此它并不适于在实际环境下对点源目标的作用距离进行估算. 对于点源目标,考虑到背景噪声的影响,选择基于 NEFD 的作用距离模型对实际条件下的红外成像系统作用距离进行估算更为准确. 以下是基于 NEFD 的作用距离模型进行简单的推导.

当目标在红外成像系统中的成像为点目标时,目标对红外成像系统的张角远小于系统的瞬时视场,不能充满整个视场. 因此,系统接收到的辐射除了目标的辐射之外,还有一部分来自于背景辐射.

设点目标在红外系统入瞳上的辐照度为

$$E_t = \frac{I_t}{R^2} \cdot \tau_a(R) \tag{1}$$

式中,$I_t = L_t \cdot A_t$ 为目标的辐射强度,L_t 为目标的辐射亮度,A_t 为目标投影面积;$\tau_a(R)$ 为大气透过率,R 为目标到成像系统间的距离.

由于目标没有充满瞬时视场,因此背景辐射也能到达探测器. 假设背景辐射单一,这时背景辐射在红外系统入瞳上的辐照度为

$$E_b = L_b(\omega - \omega')\tau_a(R) \tag{2}$$

式中,L_b 为背景辐射亮度;ω 为系统的瞬时视场;$\omega' = \frac{A_t}{R^2}$为目标对光学系统中心所张的视场.

那么,此时红外系统入瞳上总的辐照度为

$$E = E_t + E_b = \left[\frac{I_t}{R^2} + L_b(\omega - \omega')\right]\tau_a(R) \tag{3}$$

当背景完全充满探测器单元时,红外系统入瞳上的辐照度为

$$E' = L_b\omega\tau_a(R) \tag{4}$$

故目标与背景在入瞳上辐照度差为

$$\Delta E = E - E' = \left(\frac{I_t}{R^2} - L_b\omega'\right)\tau_a(R) = \frac{L_t - L_b}{R^2}A_t\tau_a(R) \tag{5}$$

用变量 N 代表系统的 NEFD,那么

$$N = \frac{(A_d\Delta f)^{1/2}}{A_o\tau_o D^*} \tag{6}$$

式中,A_d 为探测器面积;Δf 为等效噪声带宽;A_o 为光学系统有效面积;τ_o 为光学系统透过率;D^* 为星探测度.

入瞳上的辐照度差 ΔE 与系统的噪声等效辐

照度 NEFD 之比就是信噪比,即

$$S_{NR} = \frac{V_s}{V_n} = \frac{\Delta E}{N} \tag{7}$$

式中,V_s 为外界输入信号;V_n 为探测器噪声的均方根值.

将 ΔE 代入并考虑信号衰减因素,即可推导出作用距离 R 的方程为

$$R = \left[\frac{\delta(L_t - L_b)A_t\tau_a(R)}{N \cdot (V_s/V_n)}\right]^{1/2} \tag{8}$$

式中,δ 为系统的信号衰减系数.

将式(6)代入式(8),即可得到下式

$$R = \left[\frac{\delta(L_t - L_b)A_tA_o\tau_oD^*\tau_a(R)}{(A_d\Delta f)^{1/2} \cdot (V_s/V_n)}\right]^{1/2} \tag{9}$$

式(9)即为传统的基于信噪比的作用距离模型. 实际上基于信噪比的模型与基于 NEFD 的模型之间并无本质区别,使用 NEFD 参数估算作用距离,可使作用距离方程更加简洁,利于工程估算.

由于大气衰减系数 $\tau_a(R)$ 也是 R 的函数,式(8)可以通过迭代进行求解. 当方程中的信噪比取系统最小可探测到的阈值信噪比时,就得到了系统的极限作用距离. 通过推导过程可以看出,该作用距离模型仅适用于对单一背景下点源目标的作用距离进行估算.

2　探测概率计算

探测概率是指当目标出现在红外成像系统的瞬时视场时,系统能够探测到目标的概率. 一般情况下,红外成像系统的作用距离是在特定的探测概率下得到的. 在实际中,不断变化的复杂背景对红外成像系统的探测性能会造成较大的影响,主要体现在两个方面:①在理论的作用距离下,由于背景辐射的影响,红外成像系统往往探测不到目标,即此时系统的探测概率很可能远低于理论值;②复杂多变的背景使系统的探测概率呈现出不确定性.

针对上述两个问题,本文提出了一种估算复杂背景下探测概率的方法. 需要说明的是,这里的探测概率是单帧探测概率,并且仅针对自动探测目标的红外成像系统,不涉及人工的识别判断. 多帧探测概率可以根据单帧探测概率进一步计算获得,文献[7,9]对此均有阐述,在此不作讨论.

2.1　单一背景下的探测概率估算

红外成像系统的噪声源种类繁多,随着设计水平和制造工艺的进步,当前系统的主要噪声来源于探测器噪声,其噪声信号符合高斯分布.

当一个特定的外界输入信号与噪声信号同时输入时,探测器的输出信号仍然符合高斯分布,其概率密度为

$$p_d(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}V_n}\exp\left(-\frac{(V - V_a - V_s)^2}{2V_n^2}\right) \tag{10}$$

式中,V_a 为信号均值. 实际上,探测器的输入信噪比超过阈值信噪比的概率就是探测概率. 通过对式(10)的积分,探测器的探测概率为

$$P_d(S_{NR}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{S_{NR}-T_{NR}}\exp\left(-\frac{\rho^2}{2}\right)d\rho \tag{11}$$

式中,$S_{NR} = V_s/V_n$ 为探测器的输入信噪比;$T_{NR} = (V - V_a)/V_n$ 为探测器的阈值信噪比;$\rho = (V - V_a - V_s)/V_n$ 为积分变量. 一般而言,红外成像系统的阈值信噪比 T_{NR} 等于系统探测概率为 50% 时的输入信噪比. 当 T_{NR} 固定时,探测概率与输入信噪比之间的关系如图 1 所示. 可以看出,红外成像系统的探测概率是输入信噪比 S_{NR} 的单增函数,同时,在输入信噪比 S_{NR} 确定的情况下,阈值信噪比越低,探测概率越高.

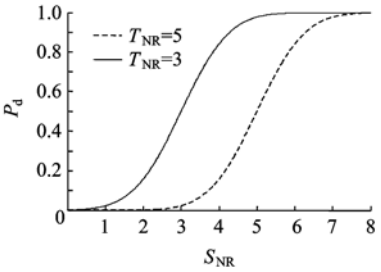


图 1　探测概率与输入信噪比的关系

对某一红外成像系统来说,系统的输入信噪比与目标红外辐射、背景红外辐射以及系统与目标间的距离均有关系. 因此,红外成像系统的输入信噪比与作用距离的关系可由式(8)的作用距离方程导出:

$$S_{NR}(L_t, L_b, R) = \frac{\delta(L_t - L_b)A_t\tau_a(R)}{N \cdot R^2} \tag{12}$$

由式(12)可看出,假如红外成像系统、目标辐射以及系统与目标间的距离均已确定,则系统的输入信噪比仅与背景辐射有关,那么二者的函数关系变为 $S_{NR}(L_b)$. 将此输入信噪比代入式(11),可以得到红外成像系统在单一背景下对点目标的探测概率为

$$P_d[S_{NR}(L_b)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{S_{NR}(L_b)-T_{NR}}\exp\left(-\frac{\rho^2}{2}\right)d\rho \tag{13}$$

由于探测概率一般是在特定的虚警概率下计算得到的,因此在这里有必要提到虚警概率的计

算. 红外成像系统的虚警概率 P_f 是指目标实际不存在,但系统却错误地探测到目标存在的概率. 在计算时,虚警概率可以认为是探测器噪声电压超过门限电压的概率,可由式(13)得到:

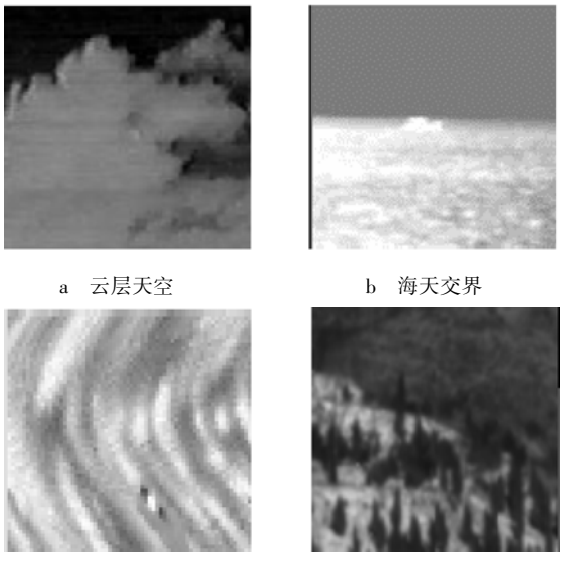
$$P_f(T_{NR}) = \exp\left(-\frac{T_{NR}^2}{2}\right) \tag{14}$$

可见,虚警概率仅与阈值信噪比有关. 然而在实际中,复杂背景的红外辐射干扰将使背景的误警概率大大增加. 误警概率是指由于环境温度过高或者背景反射的红外辐射太强,从而导致红外成像系统将背景中的物体错误地当作目标探测的概率. 但是误警概率的估算还与具体的目标检测算法有关,在此不作讨论.

至此,本文推导出了单一背景下红外成像系统对点目标探测概率的估算方法.

2.2 复杂背景下的探测概率估算

实际情况中,目标的背景并非是单一的,而且往往非常复杂. 图 2 所列为一些常见的复杂背景红外图像. 通过观察图像可以发现,复杂背景的红外图像具有多个灰度值,并且灰度像素的空间分布毫无规律可言. 背景像素的灰度值反映了它的红外辐射能力,像素的灰度值越大,背景的辐射能力就越强. 由于目标出现在视场中的位置并不确定,故它的背景辐射亮度值可能是当前背景中存在的任意辐射亮度值. 因此,单一背景下的探测概率计算方法并不能满足实际需要. 文献[10-11]提出了一种用概率分布的思想估算复杂背景下红外成像系统作用距离的方法. 通过论证,该思想对于估算复杂背景下红外成像系统的探测概率同样有效.



a 云层天空　　b 海天交界

c 海杂波　　d 复杂地面

图 2 复杂背景红外图像

虽然复杂背景红外图像有多个灰度值并且空间分布混乱,但是在系统成像条件确定的情况下,背景图像的每个灰度值的像素个数及其在图像像素总数中所占的比例是确定的,因此可以将这一比例定义为每个灰度值在图像中的出现概率. 利用出现概率这一信息,可以对单一背景下的红外点目标的探测概率估算方法做出改进.

通过上述分析,可知图像中的灰度值与其出现概率存在一一对应的关系,故可以将灰度值的出现概率分布看作复杂背景的一个固有属性. 由于背景图像中的每个灰度值都对应不同的背景辐射亮度,而红外成像系统的输入信噪比与背景辐射亮度之间是正比关系,因此复杂背景下系统输入信噪比的出现概率就等于它所对应的灰度值的出现概率. 假设一幅背景红外图像中存在 m 个不同的灰度值,则可以将式(12)转化为以下形式:

$$S_{NR}(P_i) = \frac{\delta(L_t - L_b(P_i))A_t\tau_a(R)}{N \cdot R^2}$$
$$i = 1,2,\cdots,m \tag{15}$$

式中,$[P_i]_{i=1,2,\cdots,m}$ 为 m 个灰度值所对应的出现概率,$\sum_{i=1}^{m} P_i = 1$;$[L_b(P_i)]_{i=1,2,\cdots,m}$ 为背景红外辐射亮度;$[S_{NR}(P_i)]_{i=1,2,\cdots,m}$ 为输入信噪比.

如此,可以得到点目标的探测概率为

$$P_d(P_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{S_{NR}(P_i)-T_{NR}} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2}\right)d\rho$$
$$i = 1,2,\cdots,m \tag{16}$$

式中,$[P_d(P_i)]_{i=1,2,\cdots,m}$ 为不同背景辐射亮度所对应的探测概率.

根据式(16),可以得到复杂背景下的探测概率向量以及其出现概率分布情况. 在某一复杂背景下,红外成像系统的探测概率总是倾向于出现概率最大的值. 当 $m=1$ 时,即背景红外图像仅有一个灰度值时,探测概率向量的维数为 1,此时式(16)即退化为单一背景下的探测概率估算.

3 复杂背景红外辐射亮度计算

传统的红外辐射模型[12-13]难以对复杂背景的红外辐射特性进行计算,因此,在这里引入一种新的计算复杂背景红外辐射亮度的方法.

目标的红外辐射通过大气传输到成像系统,然后再通过信号处理系统转化为灰度图像. 那么,可以将计算复杂背景红外辐射亮度的过程看作是成像过程的逆过程.

实际的背景红外辐射亮度可用下式得到:

$$L_b(P_i) = L_{b_opt}(P_i)/\tau_a \quad (17)$$

式中,$[L_b(P_i)]_{i=1,2,\cdots,m}$为各灰度所对应的背景红外辐射亮度值;$[L_{b_opt}(P_i)]_{i=1,2,\cdots,m}$为入瞳处的背景红外辐射亮度值;$\tau_a$ 可以通过将当时的环境信息输入大气透过率软件 LOWTRAN7 中计算得到.

计算复杂背景红外辐射亮度的关键在于获得系统成像的灰度值与入瞳处红外辐射亮度的函数关系. 虽然二者不是线性对应,但是在光圈固定的条件下二者之间的关系是确定的. 因此,不必考虑二者内部的因果关系,可以直接通过泰勒级数拟合亮度与灰度间的函数关系:

$$L = A_0 + A_1 \cdot G + A_2 \cdot G^2 + \cdots + A_n \cdot G^n \quad (18)$$

式中,L 为红外辐射亮度值;G 为对应的成像灰度值;$A_0, A_1, \cdots, A_n$ 为亮度-灰度函数的泰勒展开的各级系数. 各级泰勒展开系数可以通过如下方法确定:用成像系统近距离拍摄 20 个不同温度的黑体模拟器,记录 20 组样本,每组样本包括:黑体模拟器的温度值、红外辐射亮度值以及成像的灰度值;然后,将每组样本中的红外辐射亮度值和灰度值代入亮度-灰度函数,利用最小二乘估计得到最优的 20 个系数值,最终确定该函数.

随机获取 30 组红外辐射亮度数据,将该实际值与用亮度-灰度函数计算得到的数据进行比较,结果为二者平均相差 3.4%,最大相差不超过 11.3%. 以上说明,利用该亮度-灰度函数描述光圈和成像灰度级固定的红外成像系统的入瞳处红外辐射亮度和成像灰度间的关系是比较准确的.

4　计算实例

本文以某型中波红外成像系统为例,估算了它在复杂地面背景和复杂海面背景下对某型巡航导弹的探测概率. 其中,巡航导弹的飞行速度为 0.75*Ma*. 红外成像系统的阈值信噪比为 5,在无背景、探测概率为 50% 的情况下,作用距离为9 400 m.

首先,获取 20 组入瞳的红外辐射亮度与其对应的成像灰度的数据,如表 1 所示.

然后,利用第 3 节的方法确定红外成像的亮度-灰度函数,得到红外成像系统的亮度-灰度函数,如图 3 所示. 拍摄的复杂背景图像分别如图 4a 和图 5a 所示,二者的灰度分布信息如图 4b 和图 5b 所示,再由亮度-灰度函数计算得到背景红外辐射亮度信息,结果如图 4c 和图 5c 所示.

最后,利用第 2 节介绍的计算方法,可以得到探测概率在此复杂背景下的出现概率分布结果,如图 4d 和图 5d 所示.

表 1　确定亮度-灰度函数的 20 组实验数据

黑体模拟器温度/K	辐射亮度/(W·sr^{-1}·m^{-2})	成像灰度	黑体模拟器温度/K	辐射亮度/(W·sr^{-1}·m^{-2})	成像灰度
225	0.053 3	10	375	17.068 6	143
237	0.108 7	16	387	22.558 1	158
262	0.392 8	30	412	38.413 4	192
275	0.702 0	35	425	49.509 2	204
287	1.148 2	49	437	61.801 2	216
300	1.876 8	65	450	77.614 0	227
312	2.855 0	75	462	94.770 5	235
337	6.253 4	105	487	139.499 9	248
350	9.020 0	120	500	168.151 3	252
362	12.376 6	133	520	220.357 2	255

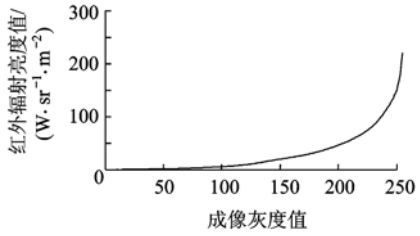


图 3　亮度-灰度函数关系图

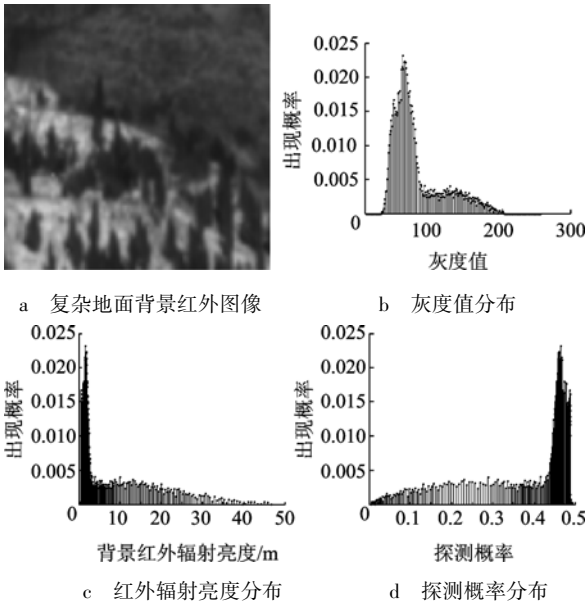
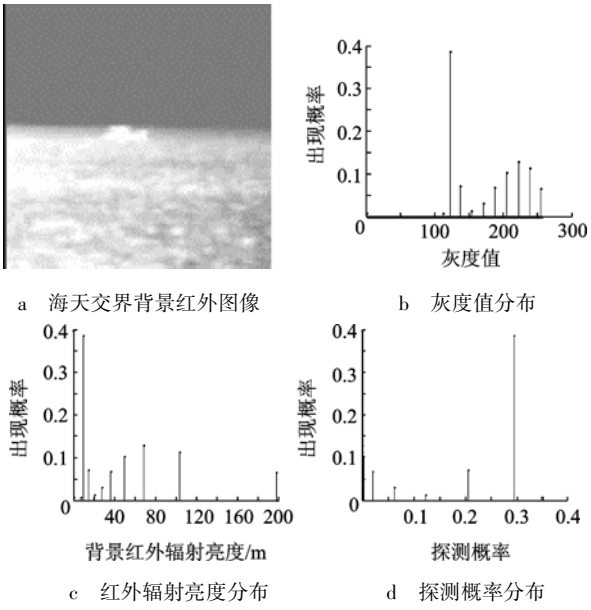


图 4　复杂地面背景下计算结果

从实验结果可以看出,在复杂背景红外辐射的影响下,红外成像系统对点目标的探测概率有多个可能值,这些可能值出现的概率各不相同,并且均不同程度地低于理论值(50%). 图 4a 中复杂地面背景的红外辐射并非很强烈,因此系统的探测概率有 80% 的可能性为 45% ~50%,接近理论值. 在图 5a 的海天交界背景中,出现的灰度值较少且对比强烈、分布鲜明. 直观上看,目标出现在天空背景时系统的探测概率应该明显大于目标出现在海面背景时的探测概率,且二者的出现概

率相差不大. 而从图 5d 的探测概率分布结果可以看出,系统的探测概率有约 40% 的可能性为 29%,比理论值有一定下降;还有约 45% 的可能性处于 0 ~ 7%,几乎探测不到目标,这与对该背景的分析结果较为符合.



a 海天交界背景红外图像　b 灰度值分布

c 红外辐射亮度分布　d 探测概率分布

图 5 海天交界背景下计算结果

此计算实例表明:本文提出的估算方法既能从宏观上体现复杂背景红外辐射对红外成像系统探测性能的影响程度,又能从微观上估算在复杂背景下系统的探测概率分布情况,满足了实际应用中的需要.

5 结 束 语

本文在作用距离方程的基础上推导了单一背景下红外点目标探测概率的估算方法. 通过分析复杂背景对探测概率的影响,并引入概率分布的概念,提出了复杂背景下对红外点目标探测概率进行估算的方法,解决了在实际复杂背景下系统探测概率与理论值有较大差异的问题. 实验结果表明:该估算方法能够较为准确地估算红外成像系统在典型复杂背景和作用距离下对点目标的探测概率,不仅可以作为评估红外成像系统探测性能的一个有效手段,而且可以为红外成像系统在实际中的应用提供理论依据.

参考文献 (References)

[1] Hundson R D. Infrared system engineering [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1969: 62 - 91

[2] Wu Hanping, Yi Xinjian. 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

[3] 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

[4] 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
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)

[5] Meitzler T J, Gerhart G R, Sohn E, et al. Detection probability using relative clutter in infrared images[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(3): 955 - 962

[6] Gerhart G R, Bednarz E L, Meitzler T J, et al. Target acquisition methodology for visual and infrared imaging sensors[J]. Optical Engineering, 1996, 35(10): 3026 - 3036

[7] 祁蒙. 红外成像系统的探测概率研究[J]. 激光与红外, 2004, 34(4): 269 - 271
Qi Meng. Detection probability of IR search and track system [J]. Laser & Infrared, 2004, 34(4): 269 - 271(in Chinese)

[8] 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
Li Runshun, Yuan Xiangyan, Fan Zhigang, et al. Operating range prediction of infrared imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(1): 1 - 3(in Chinese)

[9] 徐军. 红外图像中弱小目标检测技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学技术物理学院, 2001
Xu Jun. Research on the detection of small and dim targets in infrared images[D]. Xi'an: School of Technical Physics, Xidian University, 2001(in Chinese)

[10] Diao Weihe, Mao Xia, Chang Le, et al. Operating distance evaluation method for infrared imaging system under complicated backgrounds[J]. Electronics Letters, 2009, 45(25): 1309 - 1310

[11] 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
Diao Weihe, Mao Xia, Liang Xiaogeng. Method for estimating operating distance of IR imaging system under complex backgrounds [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(8): 1022 - 1026(in Chinese)

[12] 宣益民, 李德仓, 韩玉阁. 复杂地面背景的红外热像合成[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(2): 133 - 136
Xuan Yimin, Li Decang, Han Yuge. Synthetic infrared image of complicated terrain background [J]. Infrared Millim Waves, 2002, 21(2): 133 - 136(in Chinese)

[13] 韩玉阁, 刘荣辉, 宣益民. 复杂地面背景红外热像模拟[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(4): 487 - 490
Han Yuge, Liu Ronghui, Xuan Yimin. Infrared image simulation of complex terrain background [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2007, 31(4): 487 - 490(in Chinese)

(编 辑:赵海容)