复杂背景红外成像系统作用距离估算方法

刁伟鹤 毛 峡 梁晓庚

(北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100191) (中国空空导弹研究院，洛阳 471009)

摘 要：传统红外成像系统作用距离模型只有在背景单一不变的条件下有效，引入概率分布的思想对传统作用距离方程进行了改进，将方程中的作用距离和背景红外辐射亮度由变量更换为向量，向量维数由背景红外图像的灰度值分布确定. 改进后的作用距离模型将应用条件拓展到任意背景，打破了传统模型对背景条件的局限. 针对作用距离计算过程中复杂背景红外辐射亮度难以获取的问题，提出建立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其红外辐射亮度的方法. 计算实例表明，该模型能够解决复杂背景下红外成像系统作用距离的估算问题.

关 键 词：作用距离；复杂背景；红外成像系统；红外辐射特性

中图分类号：TN 21

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)08-1022-05

Method for estimating operating distance of IR imaging system under complex backgrounds

Diao Weihe Mao Xia

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

Liang Xiaogeng

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: For the application limitation of traditional operating distance model under complex backgrounds, the traditional equation was improved by adding the idea of probability distribution. In the new equation, the variables operating distance and background IR radiance were replaced by vectors, whose dimensions could be calculated according to gray distribution of background image. Then, a new model which is valid in various backgrounds was established. In order to calculate the infrared signature of complex background, a new method that gets radiance from image gray value by establishing radiance-gray function was proposed here. The operating distance calculation instance shows that the new model can accurately estimate the operating distance under complex backgrounds.

Key words: operating distance; complex background; IR imaging system; IR signature

红外成像系统以其被动工作方式、隐蔽性好、图像直观以及低空探测性好等特点，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. 对于红外成像系统而言，作用距离是一项关键的战术技术指标. 目前，国内外学者针对理想条件下红外成像系统作用距离的研究较为深入，给出了基于信噪比检测基础的点源探测作用距离模型[1-4]. 然而，在实际应用中发现，上述模型只有在背景单一不变的情况下有效，当背景复杂时，其计算结果与实际情况有很大的出入，这严重限制了该模型的应用范围.

针对这个问题，文献[5]提出基于图像目标信噪比检测依据的作用距离计算模型，该方法考虑了目标与背景的对比度以及背景的起伏对作用距

收稿日期：2008-07-21

基金项目：航空科学基金资助项目(20070112001)；北航博士研究生创新基金资助项目

作者简介：刁伟鹤(1984—)，男，吉林磐石人，博士生，diaoweihe@163.com.

离的影响,但是它脱离了作用距离产生的机理,不能从理论上证明其正确性,而且实验结果与实际情况也有较大差别.本文分析了复杂背景对红外成像系统作用距离的影响,在此基础上引入了概率分布的思想对传统作用距离方程进行了改进,并提出通过背景成像灰度信息计算红外辐射亮度的方法,最终建立了对各种背景条件均有效的作用距离模型.

1　传统作用距离模型及局限性分析

1.1　传统作用距离方程

目标在成像器中成像是从点目标开始,即目标在成像器中的张角小于其瞬时视场.假设目标的有效面积为 A,与成像器的距离为 R,对成像器的张角为 $\alpha'\beta'$,瞬时视场为 $\alpha\beta(\alpha'\beta'<\alpha\beta)$.其中

$$\alpha'\beta'=\frac{A}{R^2} \tag{1}$$

则探测器接收到的辐射照度 $H(\lambda)$来源于目标和背景的红外辐射,其大小为

$$H(\lambda)=[N_t(\lambda)\cdot\alpha'\beta'+N_b(\lambda)\cdot(\alpha\beta-\alpha'\beta')]\cdot\tau_a\lambda \tag{2}$$

其中,$N_t(\lambda)$为目标光谱辐射亮度;$N_b(\lambda)$为背景的光谱辐射亮度;$\tau_a(\lambda)$为光谱大气透过率.仅有背景时探测器接受到的辐射强度照度 $H(\lambda)'$为

$$H(\lambda)'=[N_b(\lambda)\cdot\alpha\beta]\cdot\tau_a(\lambda) \tag{3}$$

探测器上的光谱辐射功率 $P(\lambda)$可表示为

$$P(\lambda)=H(\lambda)\cdot A_o\cdot\tau_o(\lambda) \tag{4}$$

其中,A_o 为光学系统有效面积;$\tau_o(\lambda)$为光学系统的光谱透过率.

含有目标的探测元与其它探测元上产生的信号电压差 V_s 为

$$V_s=\int_{\lambda 2}^{\lambda_1}(N_t(\lambda)-N_b(\lambda))\cdot\frac{A}{R^2}A_o\tau_o(\lambda)\tau_a(\lambda)\mathscr{R}(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{5}$$

其中,$\mathscr{R}(\lambda)$为探测器的光谱响应度.

为简化计算,将与波长有关的各项由积分形式用传感器光谱通带内的平均值或积分值代替,分别为 N_t,N_b,τ_o,τ_a,$\mathscr{R}$.再导入探测器的均方根噪声值 V_n,可解出作用距离 R.考虑信号衰减的影响,得到:

$$R=\left[\frac{A_o(N_t-N_b)A\tau_o\tau_a\mathscr{R}\delta}{V_n(V_s/V_n)}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

其中,δ 为信号衰减因子,$\mathscr{R}$ 可以表示为

$$\mathscr{R}=\frac{V_nD^*}{(A_d\Delta f)^{1/2}} \tag{7}$$

其中,D^* 为表示探测器性能的星探测度;A_d 为探测器的面积;Δf 为等效噪声带宽.将式(7)代入式(6),得到单一背景下的作用距离方程:

$$R=\left[\frac{A_o(N_t-N_b)A\tau_o\tau_aD^*\delta}{(V_s/V_n)(A_d\Delta f)^{1/2}}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

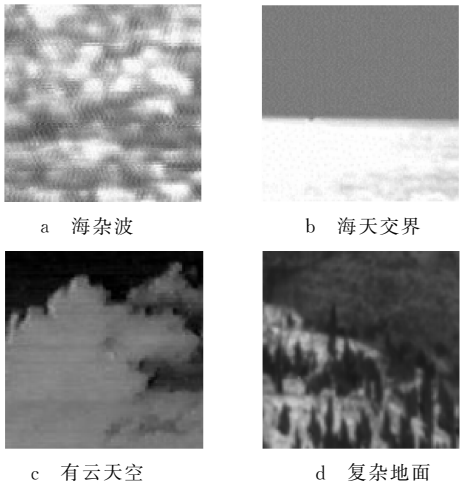
无背景时,$N_b=0$,此时,作用距离方程可表示为

$$R=\left[\frac{A_oN_tA\tau_o\tau_aD^*\delta}{(V_s/V_n)(A_d\Delta f)^{1/2}}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

1.2　传统作用距离模型的局限性

对式(8)分析可知,传统作用距离方程考虑了背景的影响,但是它没有考虑背景的变化,利用其解算出的作用距离是一个定值.从直观上可知,将复杂背景对作用距离的影响看作一成不变是不准确的.本文通过复杂背景的红外图像对这种影响进行进一步分析.图 1 所示为 4 种常见复杂背景的红外图像,分别为海杂波、海天交界、有云天空和复杂地面.它们的图像中存在多个灰度值且分布混乱,由于背景的成像灰度值与其红外辐射能力相对应,可以推断复杂背景的红外辐射能力不是确定的,而是存在多种可能值.在这种情况下,目标可能出现在红外辐射能力较小的背景区域里,也可能淹没在背景的起伏中,因此,受背景复杂的影响,红外成像系统对目标的作用距离不是一个定值,而是存在多个可能值.

由于传统作用距离方程本身定义的局限,其只可以将背景的影响看作是固定的,而不能描述作用距离存在多种可能性的信息,这决定了传统作用距离模型无法解决复杂背景下的作用距离估算问题.



a　海杂波　　b　海天交界

c　有云天空　　d　复杂地面

图 1　常见的复杂红外背景图像

2　新的作用距离方程

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.然而复杂背景的红外辐射特性并非无规律可循,分析图 1

中的复杂背景图像可知,虽然图像中存在多个灰度值且分布混乱,但是在背景及成像条件确定的情况下,图像中灰度值数目是确定的,同时每个灰度值对应像素个数在整个图像中所占的比例也是确定的.根据成像灰度和辐射特性的关系可以近似的认为,背景的红外辐射亮度有多个可能值,可能值的数目是确定的,每个值出现的概率也是确定的.考虑到背景红外辐射对作用距离的影响,可以得出如下结论:在确定的复杂背景下,红外成像系统对目标的作用距离存在多个可能值,可能值的数目是确定的,而且每个可能值出现的概率也是确定的.如果解算新的作用距离方程能够得到这些信息,则可以认为新的作用距离方程在背景复杂的条件下是有效的.

基于上述分析,本文引入概率分布的思想对传统作用距离方程进行了如下改进:将背景辐射亮度由单一变量改为一个多维向量,并赋予该向量的每个成员一个属性——出现概率,相应的作用距离也由单一变量改为一个多维向量,同样赋予该向量的每个成员一个属性——出现概率.作用距离向量和背景辐射亮度向量的维数相等,维数等于背景红外辐射亮度存在可能值的数目(例如:背景红外辐射亮度值有10种可能,则维数为10).改进后的作用距离方程为

$$[R_1(p_1),R_2(p_2),\cdots,R_M(p_M)]^{\mathrm{T}}=\left[\frac{A_{\mathrm{o}}}{(V_{\mathrm{s}}/V_{\mathrm{n}})(A_{\mathrm{d}}\Delta f)^{1/2}}\cdot(N_{\mathrm{t}}-[N_{\mathrm{b1}}(p_1),N_{\mathrm{b2}}(p_2),\cdots,N_{\mathrm{bM}}(p_M)]^{\mathrm{T}})A\tau_{\mathrm{o}}\tau_{\mathrm{a}}D^{*}\delta\right]^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

其中,$[R_1(p_1),R_2(p_2),\cdots,R_M(p_M)]^{\mathrm{T}}$ 为作用距离向量,$[N_{\mathrm{b1}}(p_1),N_{\mathrm{b2}}(p_2),\cdots,N_{\mathrm{bM}}(p_M)]^{\mathrm{T}}$ 为背景红外辐射亮度向量,M 为向量的维数,p_i 为向量第 i 维对应的出现概率,且满足 $\sum_{i-1}^{M}p_i=1$,其它的变量的意义与传统作用距离方程相同.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%,该方程将退化为式(8),当无背景即不考虑背景影响时,作用距离向量维数为0,该方程将退化为式(9).可以看出,传统作用距离方程是新方程在特殊情况下的表现形式.由此可见,新方程中的作用距离向量可以准确描述无背景、背景单一和背景复杂条件下红外成像系统的作用距离信息.

分析新的作用距离方程可知,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可能值的数目、每个可能值的大小以及对应的概率.

3 复杂背景红外辐射亮度计算方法

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复杂;二是背景起伏引起的不同区域反射光线能力不同.在实际应用中,复杂背景的物质组成以及光线条件难以确定,所以,利用建立背景红外辐射模型的传统方法[6-8]很难准确计算复杂背景的红外辐射特性.针对这个问题,本文提出一种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.

3.1 方法流程

红外成像系统的成像过程如图2所示,目标的红外辐射通过大气传输到达红外成像系统,再通过光电转换、增益等处理转化为成像的灰度值.本文将红外成像系统入瞳处的红外辐射亮度与成像灰度的关系用函数 $F_{N\text{-}G}$ 来表示,由于光学系统的相差、探测器响应的非线性以及A/D转换的非线性等影响,红外辐射亮度与灰度之间不是线性对应关系.

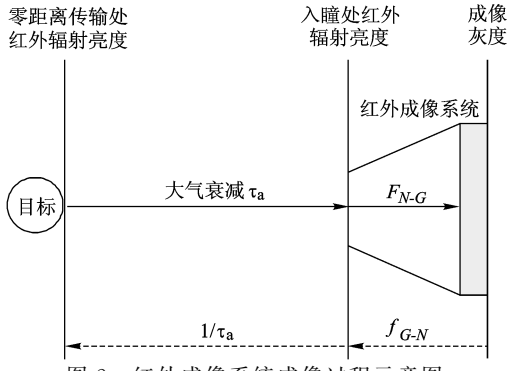


图2 红外成像系统成像过程示意图

本文提出的计算复杂背景红外辐射亮度的方法可以看作是成像系统成像的逆过程,如图2中的虚线箭头所示.该方法的步骤如下:

1) 确定红外成像系统入瞳处红外辐射亮度关于成像灰度的函数 $f_{G\text{-}N}$,本文将此函数简称为亮度-灰度函数,确定该函数的具体方法将在3.2节详细介绍;

2) 利用红外成像系统拍摄所需要复杂背景的红外图像,并记录拍摄时的成像距离、时间、地点以及环境参数;

3) 获取背景红外图像中的灰度信息,并用灰度向量 $[G_1(p_1),G_2(p_2),\cdots,G_M(p_M)]^{\mathrm{T}}$ 表示,其中 G_i 为灰度值,p_i 为图像中灰度值等于 G_i 的像素在整个图像所占的比例,M 为图像中存在灰度

级的数目;

4) 计算背景在红外成像系统入瞳处的红外辐射亮度信息,如下式:

$$[N_{b1_opt}(p_1),N_{b2_opt}(p_2),\cdots,N_{bM_opt}(p_M)]^T = [G_1(p_1),G_2(p_2),\cdots,G_M(p_M)]^T \times f_{G-N} \tag{11}$$

其中,$[N_{b1_opt}(p_1),N_{b2_opt}(p_2),\cdots,N_{bM_opt}(p_M)]^T$ 为入瞳处的红外辐射亮度向量;N_{bi_opt} 为入瞳处的红外辐射亮度值;

5) 计算背景的红外辐射亮度信息,如下式所示:

$$[N_{b1}(p_1),N_{b2}(p_2),\cdots,N_{bM}(p_M)]^T = [N_{b1_opt}(p_1),N_{b2_opt}(p_2),\cdots,N_{bM_opt}(p_M)]^T/\tau_a \tag{12}$$

其中,$[N_{b1}(p_1),N_{b2}(p_2),\cdots,N_{bM}(p_M)]^T$ 为背景红外辐射亮度向量;τ_a 为红外辐射大气透过率,通过将步骤 2)中记录的相关信息代入到红外辐射大气透过率软件 LOWTRAN7 中计算得到.

3.2　亮度-灰度函数的确定

在红外成像系统中,入瞳处红外辐射亮度值与成像灰度值不是线性对应的,但在光圈固定的条件下两个值之间的关系是确定的.本文不对产生这种非线性的原因进行讨论,而是将这种非线性关系看作是"黑箱",利用"黑箱"的输入值和对应的输出值归纳出其代表的函数关系.本文采用泰勒级数来表示亮度-灰度函数,其中,因变量为亮度值,自变量为灰度值,如下式所示:

$$N = A_0 + A_1 \cdot G + A_2 \cdot G^2 + A_3 \cdot G^3 + \cdots + A_n \cdot G^n \tag{13}$$

其中,N 为红外辐射亮度值;G 为对应的成像灰度值;$A_0 \cdots A_n$ 为亮度-灰度函数的各级系数.该函数的系数采用如下方法确定:近距离拍摄 20 个温度下的黑体模拟器,并记录 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灰度值.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.

经实验验证,该函数 5 级以后的系数约为 0,所以本文采用 5 级泰勒级数对亮度-灰度函数近似描述为

$$N = A_0 + A_1 \cdot G + \cdots + A_4 \cdot G^4 \tag{14}$$

对该函数计算得到的红外辐射亮度与真实红外辐射亮度进行比较,利用 30 组随机获取的数据进行实验,结果为:平均相差 3.4%,最大相差 11.3%.这说明,对于光圈固定的红外成系统在亮度显示上下限固定的情况下,利用 5 级泰勒级数来描述亮度-灰度函数是比较准确的.

4　计算实例

本文以某型中波(3～5 μm)红外成像系统为例,计算了它对巡航导弹在复杂地面背景下的作用距离.其中,巡航导弹的飞行速度为 0.75 Ma(声速).

首先,利用 3.2 节中的方法确定红外成像系统的亮度-灰度函数,其中用来确定该函数的 20 组数据如表 1 所示,计算得到的亮度-灰度函数如图 3 所示;然后,拍摄了所需复杂地面背景的红外图像(见图 4a),并根据 3.1 节中的方法得到地面复杂背景的灰度信息(见图 4b),以及背景的红外辐射亮度信息(见图 4c);最后,将背景亮度以及目标亮度等信息代入到第 2 节建立的作用距离方程中,解方程得到红外成像系统对巡航导弹的作用距离,用作用距离向量表示,包括多个作用距离值以及对应的出现概率,如图 4d 所示.

表 1　确定亮度-灰度函数的 20 组实验数据

黑体温度/K	辐射亮度/(W·(sr·m²)⁻¹)	成像灰度	黑体温度/K	辐射亮度/(W·(sr·m²)⁻¹)	成像灰度
225	0.0533	10	375	17.0686	143
237	0.1087	16	387	22.5581	158
262	0.3928	30	412	38.4134	192
275	0.7020	35	425	49.5092	204
287	1.1482	49	437	61.8012	216
300	1.8768	65	450	77.6140	227
312	2.8550	75	462	94.7705	235
337	6.2534	105	487	139.4999	248
350	9.0200	120	500	168.1513	252
362	12.3766	133	520	220.3572	255

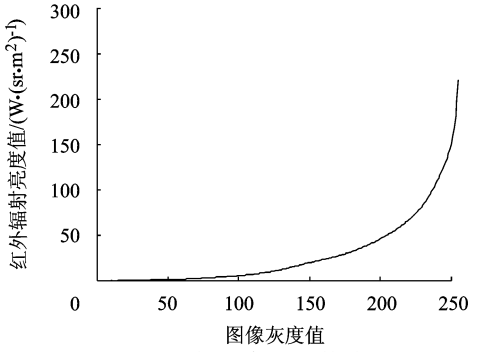


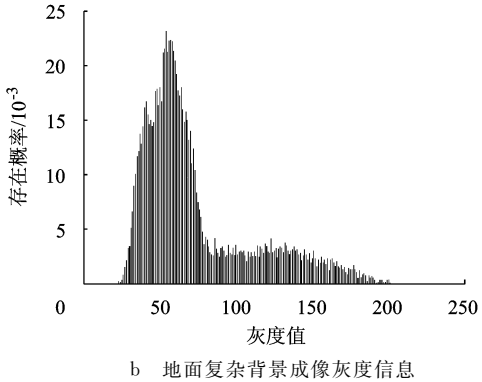
图 3　亮度-灰度函数关系图

由实验结果(图 4d)可知,在图 4a 所示的复杂地面背景下,该红外成像系统对巡航导弹的作用距离有多个可能值,且主要分布在 3 500～4 300 m,与此同时,成像系统有 6.5% 的可能性探测不到目标.此结果显示了复杂背景下作用距离存在多种可能性的信息,并给出了作用距离各个可能值的大小及其概率分布信息,准确地体现了

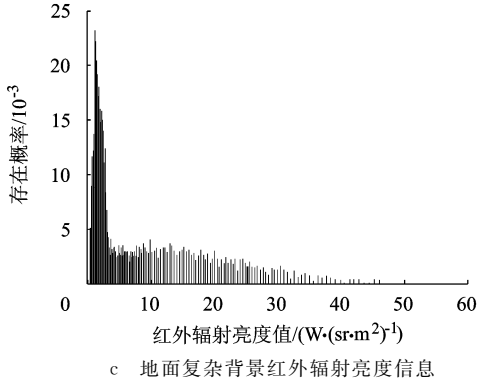
复杂背景对作用距离的影响.此计算实例证明,本文提出的方法可以解决复杂背景下红外成像系统作用距离的估算问题.



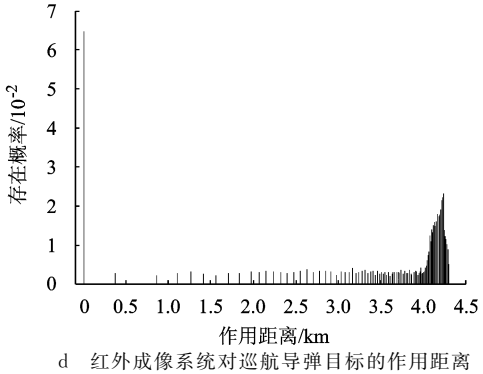
a 复杂地面背景的红外图像



b 地面复杂背景成像灰度信息



c 地面复杂背景红外辐射亮度信息



d 红外成像系统对巡航导弹目标的作用距离

图4 作用距离计算过程中的信息

5 结束语

本文分析了复杂背景对红外成像系统作用距离的影响,并对其规律进行了总结,在此基础上对传统作用距离方程进行了改进,实现了无背景、背景单一和背景复杂3种背景条件下的作用距离估算,打破了传统方程对背景条件的局限.同时,提出了通过红外图像的灰度信息获取红外辐射亮度的方法,解决了复杂背景红外辐射亮度信息难以计算的问题,具有很高的实际应用价值.

参考文献(References)

[1] Richard D Hundson, Jr. 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] Wu Hanping, Chen Xiqu, Yi Xinjian. Operating distance and comprehensive performance evaluation for infrared searching system [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waver, 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] 王卫华,牛照东,陈曾平. 海空背景凝视红外成像系统作用距离研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2): 150-152
Wang Weihua, Niu Zhaodong, Chen Zengping. Research on the operating range of staring IR imaging system in sea-sky background [J]. J Infrared Millim Waves, 2006, 25(2): 150-152 (in Chinese)

[6] 王美,沈国土,杨宝成,等. 小目标和海天背景红外热像模拟[J]. 兵工学报, 2007, 28(5): 561-564
Wang Mei, Shen Guotu, Yang Baocheng, et al. Simulation of infrared images of small target and sea and sky background [J]. Acta Arm amentarii, 2007, 28(5): 561-564 (in Chinese)

[7] 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 Dechang, Han Yuge. Synthetic infrared image of complicated terrain background [J]. J Infrared Millim Waves, 2002, 21(2): 133-136 (in Chinese)

[8] 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 Yiming. Infrared image simulation of complex terrain background [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2007, 31(4): 487-490(in Chinese)

(责任编辑:娄 嘉)