

红外成像探测系统作用距离分析方法研究*

邢强林¹ 黄惠明¹ 熊仁生² 于 涛¹

(1 中国人民解放军 63921 部队, 北京 100094)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘 要 根据视频跟踪测量技术工程实践中, 可靠跟踪测量对目标在探测器靶面上的成像尺寸、照度及对比度的要求, 综合考虑背景辐射和目标成像弥散的影响, 对原有红外探测系统作用距离计算公式进行了改进, 给出了适用于红外焦平面成像探测系统的新的作用距离分析方法, 并针对水平观测、非水平穿越大气层观测等应用条件推导了具体的计算公式. 文中通过应用示例进行了比较分析, 得出了新分析方法比原分析方法具有更高可信度的结论.

关键词 红外成像探测; 作用距离; 成像尺寸; 照度; 对比度

中图分类号 TN215 **文献标识码** A

0 引言

在以红外焦平面成像为基础的红外成像跟踪测量技术中, 红外探测系统的作用距离是一项最为关键的战术技术指标, 在系统设计过程中, 必须给予充分论证. 以往, 人们以信号处理信噪比要求为基础, 给出了红外探测系统的作用距离计算公式. 该公式对点源扫描红外探测系统的作用距离分析具有较高的可信度, 但实际应用表明, 该方法对焦平面成像红外探测系统作用距离分析具有较大的偏差. 为此, 本文根据焦平面成像红外探测系统的特点, 给出一种新的作用距离分析方法, 结果表明, 该方法具有更高的可信度.

1 原作用距离分析方法

对红外探测系统的作用距离传统的分析方法主要以目标的辐射功率在探测器上产生的响应是否满足信噪比要求为依据, 其具体计算公式如下

$$R = \left[\frac{\pi \tau_a \tau_o I D^* D^2}{4 \sqrt{A_d \Delta f} (V_s / V_N)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中, R 为目标到测站的距离, τ_a 、 τ_o 分别为大气和光学系统透过率; I 、 D^* 、 D 、 A_d 、 Δf 、 V_s/V_N 分别为目标辐射强度、探测器的探测率、光学系统通光口径、单元探测器光敏面面积、系统的带宽、信号处理信噪比最低要求.

该方法存在一定的局限性, 主要表现在两个方面, 其一: 该算法仅考虑目标到达靶面上的辐射功率是否满足探测要求, 未考虑背景的影响; 其二, 该方法未考虑成像点弥散及其影响.

2 新作用距离分析方法

根据视频跟踪测量技术工程实践经验, 为确保对目标进行可靠的跟踪测量, 通常要求系统同时满足三个条件: 其一, 目标的成像尺寸应大于 1 个像素; 其二, 在不考虑背景的条件下, 探测器接收到的目标辐射功率满足信号探测处理的最低要求, 亦即目标在探测器靶面上的照度满足最低要求; 其三, 目标和背景在探测器靶面上的对比度满足最低要求. 在分析系统的作用距离时, 可根据以上三个条件的要求分别计算对应的作用距离, 则三者之最小值即为系统的作用距离.

以上三个条件中, 条件一是为了避免噪声点引起的虚警, 确保对目标的可靠跟踪测量; 条件二给出的是无背景条件下系统的作用距离也就是由目标辐射功率决定的作用距离; 条件三给出的是背景限制条件下系统的作用距离, 亦即由目标与背景的对比度决定的作用距离.

2.1 成像尺寸分析

目标成像尺寸计算应考虑理论成像尺寸和弥散两个因素. 对理论成像尺寸较大的面目标, 可忽略弥散的影响, 其成像尺寸可根据物像映射关系直接求出; 对点目标(或近似点目标, 以下同), 可忽略理论成像尺寸, 其成像尺寸主要由像弥散决定; 对介于二者之间的目标, 两种因素必须同时考虑.

影响弥散斑大小的主要因素有光学系统的成像质量、衍射分辨极限、大气抖动、仪器的振动、目标的相对运动、探测器空间分辨率等. 成像质量弥散因素主要包括光学系统的设计像差、光学镜片的加工误差、各镜片的装校误差等, 由其引起的弥散斑大小可以利用光学设计专用软件进行分析计算. 由光学系统衍射分辨极限引起的弥散斑可近似为零级衍射

“爱里斑”。上述两种因素引起的近似圆形弥散斑由光学系统本身决定,是像弥散的基本量。大气抖动是一个快速随机变化过程,由其引起的弥散斑也是一个圆形光斑,其直径等于大气抖动量与光学系统焦距之积。仪器振动和目标与仪器视轴相对运动将使得弥散斑在振动和相对运动方向上产生位移。根据以上分析,成像弥散斑等于上述各种因素的合成,其合成过程如图1所示。图中 d 为前三种因素所形成圆形光斑的直径, L_1 为二维振动引起的位移, L_2 为相对运动引起的位移。

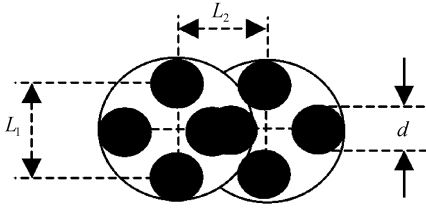


图1 弥散斑形成示意图

Fig.1 Diagram of spread spot formation

根据图1可计算成像弥散斑的几何尺寸。而目标在探测器靶面上的实际成像尺寸还要考虑探测器的空间分辨率的影响,以红外焦平面器件的像素间距为量化单位,即以目标像所占像素数来表示其大小。理论分析和实际经验表明,对目前常用的像素间距 $\leq 30 \mu\text{m}$ 的红外焦平面器件,即使点目标,其像弥散斑通常也将超过 2×2 像素。总之,通常成像尺寸可以满足可靠跟踪测量要求,故系统的作用距离主要由探测器接收到目标的辐射功率及目标与背景的对比度决定。

2.2 无背景条件下作用距离分析

2.2.1 目标在探测器靶面上的照度

为了便于分析目标的辐射特性,可将目标近似为灰体。设目标的有效辐射面积为 A_s ,温度为 $T(\text{K})$,发射率为 ε_1 ,根据普朗克公式,目标在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的辐射出射度 M_1 为^[1]

$$M_1 = \varepsilon_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (2)$$

对应的辐射强度 I 为

$$I = \frac{A_s M_1}{\pi} \quad (3)$$

式中, $c_1 = 3.741832 \times 10^8 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4)$, $c_2 = 1.438786 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$ 。

被会聚到仪器像面的目标辐射功率为

$$P_i = \frac{A_0}{R^2} I \tau_a \tau_0 \quad (4)$$

式中, A_0 为光学系统接收口径面积, R 为目标到测站的距离, τ_a 、 τ_0 分别为大气透过率和光学系统透过率。

对点目标,可不考虑像弥散的影响,此时目标在探测器靶面上的辐照度为

$$H_i = \frac{M_1 \tau_a \tau_0}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \quad (5)$$

式中, L 为目标的辐射亮度。

对点目标,设弥散斑面积为 A_m ,为便于分析,工程上可将光斑光能量近似为均匀分布,则此时目标在探测器靶面上的辐照度为

$$H_i = \frac{M_1 \tau_a \tau_0}{4} \left(\frac{A_s}{A_m} \right) \left(\frac{D}{R} \right)^2 \quad (6)$$

2.2.2 无背景条件下信噪比

在无背景条件下,探测器在目标辐照度为 H_i 时对应的信噪比为^[1]

$$\frac{V_s}{V_n} = D^* (A_d \cdot \Delta f)^{-1/2} A_d H_i \quad (7)$$

式中, D^* 为探测器辐射探测率, A_d 为单元探测器光敏面面积, Δf 为单元探测器系统对应的带宽。

将式(5)、(6)分别代入式(7),可得在面目标和点目标对应的信噪比分别为

$$\frac{V_s}{V_n} = \frac{M_1 \tau_a \tau_0 D^*}{4} \left(\frac{A_d}{\Delta f} \right)^{1/2} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \quad (8)$$

$$\frac{V_s}{V_n} = \frac{M_1 \tau_a \tau_0 D^*}{4} \left(\frac{A_d}{\Delta f} \right)^{1/2} \left(\frac{A_s}{A_m} \right) \left(\frac{D}{R} \right)^2 \quad (9)$$

2.2.3 无背景条件下作用距离分析

在水平观测条件下,大气透过率为^[2]

$$\tau_a = \exp(-\alpha R) \quad (10)$$

式中, α 为水平大气衰减系数。

将式(10)代入式(8),可得面目标条件下,水平观测的作用距离为

$$R = \frac{1}{\alpha} \ln \left[\frac{M_1 \tau_0 D^*}{4 V_s / V_n} \left(\frac{A_d}{\Delta f} \right)^{1/2} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \right] \quad (11)$$

将式(10)代入式(9),可得

$$R^2 \exp(\alpha R) = \frac{M_1 \tau_0 D^* D^2}{4 V_s / V_n} \left(\frac{A_d}{\Delta f} \right)^{1/2} \left(\frac{A_s}{A_m} \right) \quad (12)$$

据上式,解超越方程即可得到点目标条件下水平观测作用距离。

在非水平观测条件下,大气透过率与距离的函数关系复杂,无背景条件下作用距离计算公式不能直接给出。这时,通常可先计算不同距离对应的大气透过率,然后根据上述两式计算信噪比,并根据信噪比是否满足要求来分析系统的无背景条件下的作用距离。

对诸如卫星、战略导弹等飞行于大气层外的目标,可近似为点目标,且大气透过率仅与观测仰角有关,与目标的距离无关,此时,在无背景条件下的作用距离计算公式可由式(9)推出

$$R = \left[\frac{M_i \tau_a \tau_o D^* D^2}{4V_s/V_N} \left(\frac{A_d}{\Delta f} \right)^{1/2} \left(\frac{A_s}{A_m} \right) \right]^{1/2} \quad (13)$$

2.3 背景限制条件下作用距离分析

对红外探测系统来说,背景辐射应包括自然背景辐射(天空或地面)和光学系统辐射两部分.

2.3.1 自然背景在探测器靶面上的照度

设自然背景亮度为 L_b ,照射单个像素的背景面积为 A_b ,背景到测量设备的距离为 R_b ,则单个像素接收到的背景辐射功率为

$$P_b = L_b A_b \frac{A_o}{R_b^2} \tau_o \quad (14)$$

设单个像素的面积为 A_p ,则单个像素对应的立体角视场为

$$\omega = \frac{A_p}{f^2} \quad (15)$$

由此,照射单个像素的背景面积为

$$A_b = R_b^2 \omega = A_p \left(\frac{R_b}{f} \right)^2 \quad (16)$$

由式(14)、(16)可得背景在探测器靶面上的照度为

$$H_b = \frac{P_b}{A_p} = \frac{\pi}{4} L_b \tau_o \left(\frac{D}{f} \right)^2 \quad (17)$$

2.3.2 光学系统辐射在探测器靶面上的照度

光学系统辐射包括镜筒辐射和镜组辐射.镜筒辐射在冷阑严格匹配的情况下,可以不予考虑.对镜组辐射,为便于分析,可将光学系统简化为口径为 D 、焦距为 f 的单透镜光学系统.

设透镜的发射率为 ε_o ,温度为 T_o ,则其辐射出射度和辐射强度 I_o 分别为

$$M_o = \varepsilon_o \int_{\lambda_1 \lambda}^{\lambda_2 c_1} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_o} - 1} d\lambda \quad (18)$$

$$I_o = \frac{M_o D^2}{4} \quad (19)$$

单个像素相对透镜所张的立体角为

$$\omega' = \frac{A_d}{f^2} \quad (20)$$

由式(19)、(20)可得单个像素接收到的透镜辐射功率为

$$P_o = \frac{M_o A_d}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \quad (21)$$

透镜辐射在探测器靶面上的照度为

$$H_o = \frac{M_o}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \quad (22)$$

2.3.3 探测器靶面上调制对比度

根据调制对比度的定义则有

$$C_M = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}} = \frac{(H_b + H_o + H_l) - (H_b + H_o)}{(H_b + H_o + H_l) + (H_b + H_o)} = \frac{H_l}{H_l + 2(H_b + H_o)} \quad (23)$$

由式(5)、(17)、(22)、(23)可得在面目标条件下,靶面上调制对比度为

$$C_M = \frac{M_i \tau_a \tau_o}{M_i \tau_a \tau_o + 2(M_o + \pi L_b \tau_o)} \quad (24)$$

由式(6)、(17)、(22)、(23)可得点目标条件下,靶面上调制对比度为

$$C_M = \frac{M_i \tau_a \tau_o A_s f^2}{M_i \tau_a \tau_o A_s f^2 + 2(M_o + \pi \tau_o L_b) A_m R^2} \quad (25)$$

2.3.4 背景限制条件下作用距离分析

在水平观测条件下,将式(10)代入式(24),可得对面目标的作用距离为

$$R = \frac{1}{\alpha} \ln \left[\frac{M_i \tau_o}{2(M_o + \pi \tau_o L_b)} \left(\frac{1 - C_M}{C_M} \right) \right] \quad (26)$$

将式(10)代入式(25),可得

$$R^2 \exp(\alpha R) = \frac{M_i \tau_o f^2}{2(M_o + \pi \tau_o L_b)} \left(\frac{A_s}{A_m} \right) \left(\frac{1 - C_M}{C_M} \right) \quad (27)$$

据上式,解超越方程即可得到水平观测条件下点目标的背景限制作用距离.

与无背景条件的情况相似,背景限制条件下作用距离计算公式在非水平观测条件下也不能直接给出,这时,可采取相同的措施获得背景限制作用距离.

对诸如卫星、战略导弹等飞行于大气层外的目标,背景限制作用距离计算公式可由式(25)推出

$$R = f \sqrt{\frac{M_i \tau_a \tau_o}{2(M_o + \pi \tau_o L_b)} \left(\frac{A_s}{A_m} \right) \left(\frac{1 - C_M}{C_M} \right)} \quad (28)$$

3 应用示例

我们可通过论证探测高度 80 km 以上、有效辐射面积 $A_s = 1 \text{ m}^2$ 、表面温度 300 K 的黑体目标(简称给定黑体目标)对地基长波红外探测系统的口径、焦距等技术参数的需求情况,并结合已有的经验,来比较原方法与新方法的可信度.

我们利用新方法及原方法对不同口径、不同焦距测量系统对给定黑体目标探测距离进行了论证.表 1 分别列出了地基观测仰角为 45° 、 60° 时,利用新方法得到的口径为 700 mm、焦距为 1600 mm 的长波红外测量系统和原方法得到的口径为 200 mm 的长波红外测量系统在不同季节对应的作用距离.

表 1 新方法和原方法作用距离分析结果(km)

条件/仰角	新方法($D=700 \text{ mm}, f=1600 \text{ mm}$)			原方法($D=200 \text{ mm}$)		
	冬	春秋	夏	冬	春秋	夏
45°	109.6	105.3	100.8	112.7	108.3	103.7
60°	113.7	109.6	105.3	117.0	112.7	108.3

根据上述分析结果,两种方法的结论存在较大的差距.根据原方法,给定黑体目标探测很容易即可实现,而新方法分析结果表明,给定黑体目标探测难度相当大.

就直观感觉而言,给定黑体目标面积小、温度低,故其辐射强度低,同时还要经过较强的大气衰减,并淹没在高亮度背景(大气辐射主要集中在长波波段)中,因此,对其探测是相当困难的,需要采用大口径长焦距光学探测系统方能探测,这与新方法的分析结果是一致的.就实际经验而言,对有效辐射面积 0.7 m^2 、温度为 1500 K 以上的目标,口径为 250 mm 的长波红外测量系统的最好试验结果为发现目标高度 37.6 km 、距离 58 km ,可处理点高度为 31.2 km ,距离为 49.3 km .而给定黑体目标温度仅 300 K ,其高度大于 80 km ,因此,其探测难度相当大,必须采用大口径长焦距光学系统,方能实现,这一点也与新析方法的分析结果一致.由此不难看出,

和原方法相比,新方法的分析结果具有更高的可信度.

参考文献

- 1 徐南荣,卞南华. 红外辐射与制导. 北京:国防工业出版社,1997,28:213
Xu Nanrong, Bian Nanhua. Infrared. Beijing: National Defense Industry Press, 1997,28:213
- 2 杨臣华,梅遂生,林钧挺. 激光与红外技术手册. 北京:国防工业出版社,1990. 53 ~ 56
Yang Chenhua, Mei Suisheng, Lin Juntong. The Laser & Infrared Technology Handbook. Beijing: National Defense Industry Press, 1990. 53 ~ 56

Detect-ability Analyzing of IR FPA Tracking System

Xing Qianglin¹, Huang Huiming¹, Xiong Rensheng², Yu Tao¹

¹ The CPLA 63921 Unit, Beijing 100094

² Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date:2003-06-09

Abstract Based on the requirement for image size, irradiance, and contrast of the target on the detector plane in practical video tracking applications, and taking account of the background radiation and image dispersion, a new approach for analyzing the detecting-ability of IR FPA tracking system is presented. The calculation formula of evaluating the detecting-ability is deduced at the conditions of horizontal observation and penetrating through the whole atmosphere. By using the method to a practical sample, it shows that the new approach is more credible than the old one.

Keywords Optical tracking; IR FPA; Detect ability; Image size; Irrachance; Contrast



Xing Qianglin was born in 1965. He got his B. S. degree in 1988 from Technologic Physics Department of Xidian University and M. S. degree in 1993 from The CPLA 63921 Unit. Now, he is working in The CPLA 63921 Unit.