

•测试、试验与仿真•

红外系统空间点目标探测距离测试

孟凡斌¹, 王佳轶¹, 毛剑英²

(1.中国电子科技集团公司光电研究院,天津 300000; 2.哈尔滨飞行学院航理系,黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要:描述了一种成像型红外系统对空间点目标探测距离的内场测试方法,介绍了以灰度描述的点目标图像的信噪比定义、空间点目标及背景的辐射特点、目标检索算法以及照度等效原理,详细描述了测试设备的搭建方法和各项参数的选取原则,并给出了相关参数的计算实例。

关键词:红外系统探测距离;空间点目标;内场测试

中图分类号: TN216

文章标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-03-0085-04

Detection Range Testing of Point Target in Space Using Infrared System

MENG Fan-bin¹, WANG Jia-yi¹, MAO Jian-ying²

(1. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China; 2. Department of Aviation Theory, Harbin Flight Academy, Harbin 150000, China)

Abstract: A laboratory test method for the point target ranging in space using infrared imaging system is described. The signal-to-noise ratio (SNR) definition of point targets images described by gray level, the radiation characteristics of point targets in space and the background, target search algorithm and illumination equivalence principle are introduced. The building method of testing equipments and the choosing principle of the parameters are described in detail. And the calculation example of relative parameters is given.

Key words: infrared system detection range; space point target; laboratory test

红外系统对特定目标的作用距离(有效探测距离)是其一项重要指标,对于给定的红外系统,在计算阶段往往通过理论计算来确定其有效探测距离,但当实际产品生产完成后,有必要通过实际测试检验其真实的探测距离,以验证实际产品的性能是否满足设计需要^[1]。在科研实践中,对于在空间环境下应用的红外系统,由于其所处环境的特殊性,很难在地面搭建可以模拟真实空间环境的测试场所,所以有必要在地面实验室环境内对实际产品按相关红外理论进行等效测试。为此,提出了一种成像型红外系统探测距离的内场测试方法,该方法利用照度等效原理,测试装置搭建容易,操作简便,适用于在试验室内对空间背景下的弱小点目标的探测距离进行模拟测试。

1 测试原理

1.1 点目标图像的信噪比

图像信噪比定义方法多种多样,对于点目标应采用适合于描述点目标图像的定义方法。由于焦平面探测器上每一个像元输出的电信号反映在图像上是相应的像素灰度,较高的像素灰度代表了较高的入射能量(即照度值),因此可以得到以像素灰度表示的信噪比公式^[2]如下

$$SNR = 10 \lg \frac{U_{Target} - U_{Back}}{\sigma} \quad (1)$$

式(1)中, U_{Target} 代表目标灰度, U_{Back} 代表背景灰度, σ 代表噪声标准差,从图1中可以清晰地观察到各值

所代表的物理意义。

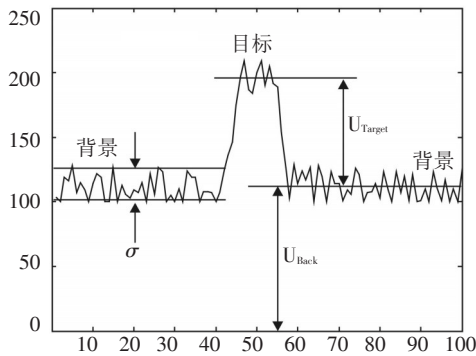


图1 信噪比定义示意图

1.2 真实空间目标及背景的红外图像特点

图2是真实空间背景下的目标及背景图像的灰度分布图。从图2中可以看出,由于真实的空间背景辐射能量极低且分布均匀,大概在3 K左右^[3],反映在图像上即是背景的灰度均值很小,几乎可以忽略,所剩的只是探测器的固有噪声。而目标的像点只占一个像素,其灰度值反应的是探测器所接收到的来自目标的辐射照度^[4]。

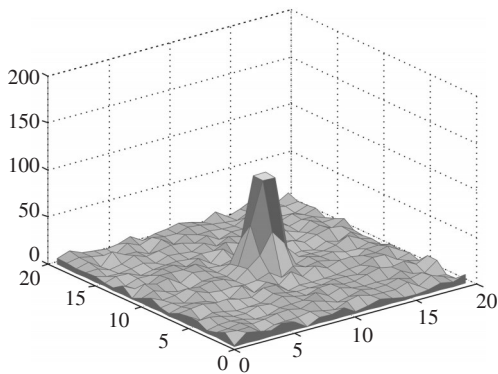


图2 真实目标及背景图像的灰度分布

1.3 目标检索算法

目标检出的基本原理是遍历图像上感兴趣区域内的所有像素点,如图3,找出在一定邻域范围内SNR值大于某一阈值的像素点,并标记该点为目标点。详细的目标检索算法流程图如图4。

1.4 照度等效原理

根据点目标图像的检索算法、以上描述的真实空间目标及背景的红外图像特点及点目标图像的

信噪比定义,在同一目标检测算法的情况下,为使模拟目标图像与真实目标图像具有相同的运算结果,目标模拟源在探测器焦面所成的像应具有如下特点:(1)目标像点只占一个像素;(2)目标像点周围一定区域内灰度均匀;(3)目标像点的像素灰度值减去背景灰度均值应与真实目标像点的灰度值相当。

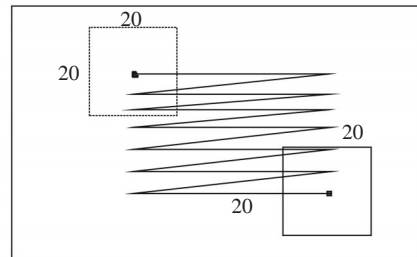


图3 像素点遍历示意图

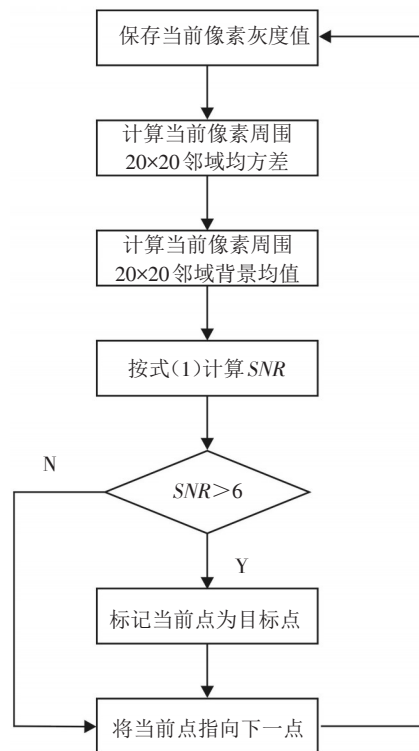


图4 目标检索算法流程

由于焦平面探测器上每一个像元输出的电信号反映在图像上是相应的像素灰度,而每一个像元输出的电信号即代表像元接收到的辐射照度^[5]。所以,为达到上述的要求,目标点在探测器处的照度值减去背景照度值应与真实目标在探测器处的照度值相等,此即照度等效原理^[6]。

根据以上分析,设计了结构如图5所示的目标

模拟源。

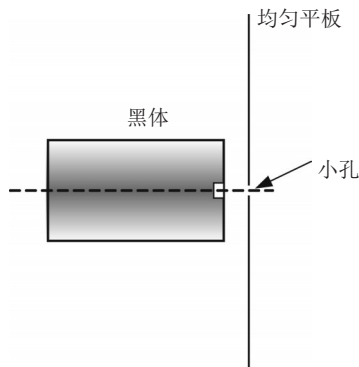


图5 模拟源结构示意图

图5中,黑体采用小型面源黑体,用于产生红外辐射,均匀平板采用金属板,表面涂黑漆,置于室温环境保证其表面温度分布均匀,用来模拟均匀的辐射背景。小孔位于黑体辐射腔口正前方,用于模拟目标辐射,小孔大小决定了其出射能量大小及目标像点大小。

按图5结构搭建的目标模拟源,其实际所成红外图像的灰度分布图如图6。通过调整黑体温度及小孔大小,比较容易做到图6中的凸起部分(目标像点灰度与背景的灰度差值)与图2中的凸起部分(真实目标像点灰度值)相等,而此时,对于目标检索算法来说,图2与图6的检索结果是一致的,这样就达到了用模拟目标图像代替真实目标图像的效果。

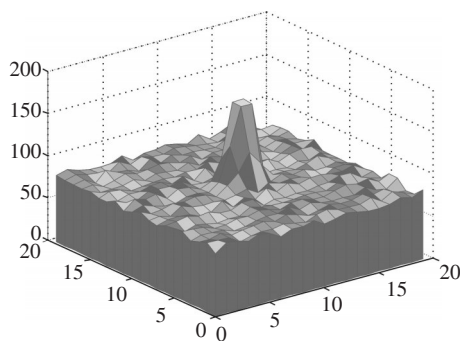


图6 模拟目标及背景图像的灰度分布

2 测试装置搭建

测试装置按图7所示搭建。将红外探测系统置于模拟源正前方一定距离处,从红外探测系统观测模拟源时,在小孔及其周围区域,可以得到与真实目标一致的成像效果。

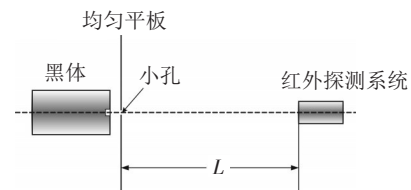


图7 模拟目标及背景图像的灰度分布

实际操作中,黑体温度、小孔直径、平板大小、光程长度 L 都是需要根据实际情况选取的,其选取原则有以下几点:(1)光程 L 应根据实验室空间大小,选取易于搭建的数值,如3~5 m左右;(2)小孔大小,保证其在红外探测系统所成的实际像点大小在光程为 L 的情况应小于一个像素;(3)黑体透过小孔的辐射在探测器处产生的照度与背景能量(即平板辐射能量)在探测器处产生的照度差值应与真实目标在探测器处产生的照度相同;(4)平板大小,应覆盖算法所用到的目标点邻域范围,如算法对当前点周围 20×20 邻域内的点进行相关运算,则平板在探测器像面所成的像应大于 20×20 像素。

系统各参数选定后,即可根据相关黑体辐射定律和距离平方反比定律计算出红外探测系统对真实目标的探测距离^[7]。

3 实际计算举例

假定一空间点目标,其在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段实际辐射值约为 2.47 kW/sr 。红外系统工作波段 $8 \sim 14 \mu\text{m}$,设计探测距离10 km,探测器分辨率 640×480 ,像元大小为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$,光学系统焦距为6.4 mm,据此计算出本测试方法中各参数的取值。

(1)光程 L :考虑实验室的空间大小,为方便布设,这里取 $L=3 \text{ m}$ 。

(2)平板大小:单像素视场张角为 $25 \mu\text{m}/6.4 \text{ mm} = 3.9 \text{ mrad}$,则3 m远处,单像素对应的目标边长大小为 $3 \text{ m} \times \tan(3.9 \text{ mrad}) \times 2 = 11.7 \text{ mm}$ 。按目标检索算法对当前点 20×20 邻域进行计算,则平板边长应大于 $11.7 \times 20 = 234 \text{ mm}$ 。为保留足够的裕量,取平板大小为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 。

(3)小孔大小:单像素点在3 m远处对应的目标尺度为11.7 mm,为成单像素点,理论上小孔直径只要小于11.7 mm即可,考虑到光学系统的实际精度,为确保像点及整个弥散斑都能够落入单一像素内,在满足实际透过能量要求的情况下,应使小孔直径

越小越好,此处取小孔直径为1 mm。

(4)黑体温度:目标的辐射出射度为2.47 kW/sr,则其在10 km处产生的照度为 $2.47 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$,小孔与背景在300 mm处的照度差应与之相等,则黑体温度采用式(2)进行计算

$$\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_1) d\lambda}{\pi L^2} A - \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T_B) d\lambda}{\pi L^2} A = 2.47 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

式中, $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为波段范围;取8~14 μm ; M 为黑体普朗克函数^[8]; $M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1}$

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} \quad (3)$$

式(3)中,第一辐射常数 $c_1=3.7415 \times 10^8 (\text{W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2)$,第二辐射常数 $c_2=1.43879 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$ 。

式(2)中, T_1 为黑体温度; T_B 为平板温度,取环境温度(20 $^\circ\text{C}$); A 为小孔面积。

经计算当黑体温度为483 K时,式(2)成立。

根据以上结果,在如图所示的测试条件下,当光程 $L=3 \text{ m}$,平板大小 $50 \times 50 \text{ cm}$,黑体温度为483 K时,如果红外探测系统可以有效检出小孔所成的像点,则可说明红外系统对真实目标的探测能力可以达到10 km。

4 结论

描述了一种简便易行的成像型红外系统对空

间点目标探测距离的内场测试方法,该方法利用照度等效原理,结合空间点目标及背景的辐射特性,可以在实验室内对红外系统的探测距离进行等效测定。测试设备使用较为常规的红外仪器组装搭建,整个测试过程可在一般的实验室环境中进行,经过多次实际项目检验,该方法准确度高,可操作性强,适当调整之后,也可用于其他种类目标的探测距离测试。

参考文献

- [1] 王学伟,王春歆,张玉叶.点目标图像信噪比计算方法[J]. 光电与控制,2010,17(1):18-21.
- [2] 小哈德逊 R D.红外探测系统原理[M]. 北京:国防工业出版社,1975:102-123.
- [3] 黄静,刘朝晖,邓书颖.点源目标的红外成像系统作用距离分析[J]. 科学技术与工程,2007,17(18):4587-4590.
- [4] 蔺建英,孟庆利,王智平.红外系统作用距离的实验室测试方法[J]. 光电技术应用,2004,19(4):14-15,34.
- [5] 李艳晓,胡磊力,蔡猛.红外成像系统的性能测试方法研究[J]. 红外与激光工程,2008,37(5):449-454.
- [6] 柴金广,刘云猛.空间低温点目标红外探测系统的作用距离的计算与等效测试[J]. 红外,2009,31(1):8-11.
- [7] 康大勇,成斌,高俊光.地空红外探测距离推算方法探讨[J]. 光电技术应用,2009,24(1):29-32.
- [8] 张建奇,方小平.红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004:54-57.

本刊声明

《光电技术应用》期刊投稿电子信箱已变更为nloe@vip.163.com,原投稿电子信箱neiet@jzptt.ln.cn已停止使用,请作者按新的电子信箱投稿。凡向期刊投稿的作者,请按照刊登论文的格式要求写稿,详见期刊网站www.gdjsyy.com,本刊拒绝一稿多投,敬请作者自觉遵守。