

·光电探测·

## 红外搜索跟踪系统作用距离分析与计算

严世华<sup>1</sup>, 祝世杰<sup>2</sup>

(1. 军械工程学院, 河北 石家庄 050003; 2. 第二炮兵某军事代表室, 湖北 宜昌 444200)

**摘要:**针对环境对红外搜索跟踪系统作用距离的影响,分析了传统作用距离方程中与环境有关的参数,进而改变了作用距离的表达形式。在新的作用距离表达式中,等效噪声功率充分反映了包括环境噪声因素在内的各类噪声的大小,通过分析探测器数字图像中噪声统计特性,并依据探测器灰度灵敏度估算了等效噪声功率,从而达到在不同的实际应用环境中估算红外系统作用距离的目的。通过试验分析得出结论,相对传统作用距离方程,改进的作用距离方程计算结果更接近实际作用距离。

**关键词:**作用距离;红外搜索跟踪系统;噪声功率;信噪比

中图分类号:TN216

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)02-0039-03

## Analysis and Calculation for Operating Range ofIRST System

YAN Shi-hua<sup>1</sup>, ZHU Shi-jie<sup>2</sup>

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. The Second Artillery Military Delegate Office, Yichang 444200, China)

**Abstract:** For the influence of environment effects on infrared search and track (IRST) system, the traditional operating range equation is changed in expression after analyses the parameters which relate to the environment. In the new operating range equation, the noise equivalent power (NEP) measures all noise power including environment noise. Based on the statistic characteristics of the signal and noise in digital image, the NEP can be calculated by the detector's sensitivity. As a result, the operating range of infrared system can be calculated in different applications. By analyzing the experiment, the conclusion is that comparing with traditional operating range equation, the results of improved operating range equation are more closer to the actual operating range.

**Key words:** operating range; infrared search and track (IRST) system; noise power; signal noise ratio

红外系统在某一距离上所接收到的目标辐射刚好能达到预期的使用效果,则此距离就称为系统的作用距离,它是红外系统的一个重要性能参数。红外搜索跟踪系统一般用于对远距离目标的探测,故可按点源计算<sup>[1]</sup>。在对其进行评价时一般是依据传统计算公式<sup>[2]</sup>

$$R^2 e^{\mu R} = \frac{I \tau_o A_o D^*}{(V_s / V_n) \sqrt{\Delta f A_d}} \quad (1)$$

式中, $R$ 为作用距离; $\mu$ 为大气衰减系数; $I$ 为目标产生

的辐射强度差; $\tau_o$ 和 $A_o$ 分别为光学系统的透过率和入瞳面积; $D^*$ 为归一化探测率; $V_s / V_n$ 为信噪比SNR; $\Delta f$ 为等效噪声带宽; $A_d$ 为像元感光面积。

根据式(1),系统探测距离与目标辐射强度、大气透过率、光学系统参数、系统的目标处理信噪比水平、探测器参数等有关,要得到较为精确作用距离,需充分考虑多种影响因素<sup>[3]</sup>。式(1)中目标辐射强度可根据目标的类型计算得出,大气透过率可利用LOWTRAN程序得到,光学系统参数和系统处理

收稿日期:2011-02-01

基金项目:国家专项技术创新计划

作者简介:严世华(1980-),男,湖南常德人,博士,主要研究方向为光电工程及信息处理。

信噪比水平对已知系统已经确认。归一化探测率  $D^*$  是出厂时在标准的环境条件下测定,环境的改变不可避免地影响  $D^*$  的准确,鉴于此,文中主要考虑了应用环境对系统参数的影响,从  $D^*$  的定义出发,改进探测器参数获取方式,进而提高系统作用距离的准确性。

## 1 距离方程的改进

红外搜索跟踪系统在实际工作中受到环境噪声和探测器噪声的影响。环境噪声包含背景辐射噪声和路径辐射噪声<sup>[4]</sup>。夏天和冬天靠近地表的大气流动剧烈程度不一样,造成辐射起伏也不同,此时即使探测器本身无噪声,也会在探测器的输出中产生噪声。当探测器的视场较大时,环境噪声甚至远远超过探测器本身的噪声,因此,应用环境中的噪声功率绝非等同  $D^*$  测量时的等效噪声功率。

根据  $D^*$  的定义有

$$D^* = \frac{1}{NEP} \sqrt{\Delta f A_d} \quad (2)$$

式中,  $NEP$  为噪声等效功率。将式(2)代入式(1)得到作用距离  $R$  为

$$R^2 e^{\mu R} = \frac{I \tau_o A_o}{SNR \times NEP} \quad (3)$$

式(3)中等效噪声功率为  $NEP$ , 包括了背景杂散光和探测器电路噪声在内所有的噪声功率,这些噪声在系统探测输出的数据图像中有直接反映。

## 2 数字图像噪声分析

噪声引起信号随机的、瞬间的、幅度不能预先知道的起伏,对于大多数探测器,产生的噪声可以视为加性的高斯噪声<sup>[5]</sup>。对图像噪声的估算一般采用区域内统计灰度方差来计算噪声,但存在以下问题:(1)该区域背景不完全均匀,特别是大视场系统包含背景更为复杂;(2)区域内像元间固有的偏差作为噪声被统计,在图像未经过非均匀性校正前,这样统计的灰度噪声远远大于实际噪声。在探测背景不变的情况下,依据噪声随机性特点,可采用2种方法进行噪声统计,如下:方法一,对每个像元在一段探测时间内(多帧)的方差进行统计;方法二,相邻两帧相减,非零的像素值的均方根作为噪声。

依据统计学原理可知,采样的时间越长,即统计的样本更多,就越符合对噪声的统计,但是这样对每个像素进行长时间采样会导致占用存储空间

和计算量都非常大,因此方法一不适合实际运用。

方法二以假设系统探测的背景不变和探测器焦平面各像元响应率一致为假设前提,相邻两帧相减的数值矩阵可视为单个像元经历  $M \times N$  帧的噪声采样,其均方根值等效噪声统计方差。该方法简单、快捷,有效地对噪声灰度进行估算,方便实际运用。图1为某试验数字图像序列,相邻两帧相减后,所有像元点灰度直方图。

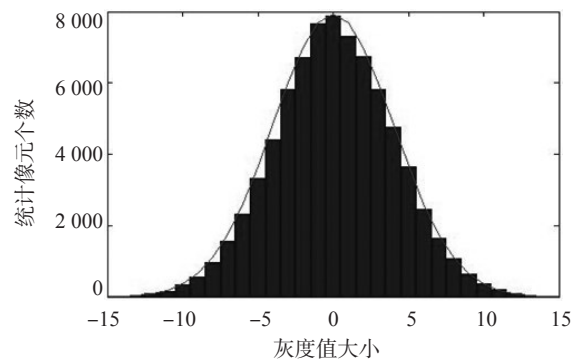


图1 灰度直方图

图1中的曲线为理想高斯噪声分布的包络,可见,两帧相减后的残差灰度值很符合高斯分布。计算此时灰度值方差公式为

$$D_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1, j=1}^{M, N} (x_{i,j} - \bar{x})^2}{M \times N}} \quad (4)$$

式中,  $x_{i,j}$  为残差灰度值;  $\bar{x}$  为残差均值。

连续500帧红外图像序列相邻两帧相减后,单帧数字图像差值的灰度方差和灰度均值变化如图2所示,其均值分别为4.02和0.005。多帧序列的差值方法计算得出了噪声灰度值。

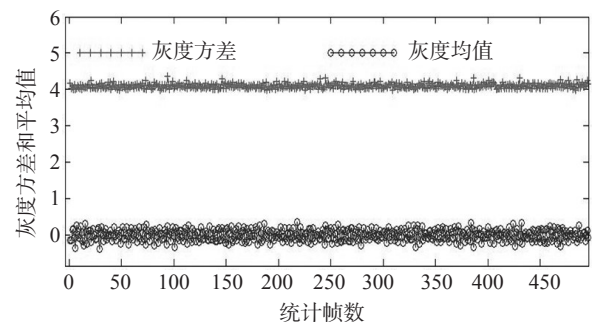


图2 序列帧邻帧相减后灰度值方差和均值

## 3 等效噪声功率计算

数字图像输出方式的CMOS图像传感器,通常给

出灰度灵敏度 $S_e(\lambda)$ ,表示对某一波长 $\lambda$ ,响应度灰度值与通量密度的关系,单位为 $\text{LSB}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。LSB(least significant bit)为数字图像灰度计量单位。一般应用的探测器积分时间是固定的,由波段积分可将灰度灵敏度转换为波段内的单像元的灰度响应率

$$S_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_e(\lambda) T_0 d\lambda \quad (5)$$

式中, $T_0$ 为积分时间; $S_e$ 为单像元响应灰度值与接收的功率的比例,计量单位为 $\text{LSB}\cdot\text{W}^{-1}$ 。

有变换表达式为

$$\Delta P_i = \frac{\Delta D_i}{S_e} \quad (6)$$

式中, $\Delta P_i$ 为像元接收波段内的辐射功率增量; $\Delta D_i$ 为像元的灰度值增量。

实际应用中,通过实验室模拟可以更精确地标定探测器的灰度灵敏度 $S_e$ 。经过对数字图像中噪声的分析,结合式(6)可以得出等效噪声功率的计算式

$$NEP = \frac{D_n}{S_e} \quad (7)$$

## 4 试验分析

试验系统的相关参数为:红外超广角镜头,制冷中波探测器工作波段 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ,探测率 $D^*=5\times 10^{11}\ (\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1})$ ,进一步转化为波段内的有效探测度<sup>[6]</sup>,取转换系数 $K=0.7$ 。模-数转换采用14位量化,输出帧频50 Hz,等效噪声带宽 $\Delta f=100\ \text{Hz}$ ,像元中心间距 $30\ \mu\text{m}$ ,填充率为81%。入瞳面积 $S_0=2.82\times 10^{-5}\ \text{m}^2$ 。系统光学透过率 $\tau_0=0.7$ 。

试验条件为:环境气温 $30^\circ\text{C}$ ,相对湿度72%,能见度3 km,中纬度,仲夏阴天,通过LOWTRAN软件计算得大气平均传输衰减系数为 $0.879\ \text{km}^{-1}$ 。目标为标准黑体辐射源,目标辐射强度 $I=2.692\ (\text{W}\cdot\text{sr}^{-1})$ ,距离探测系统 $R_1=550\ \text{m}$ ,为点源成像。考虑到检测率和虚警率,系统需求信噪比为 $SNR_2=5.48$ 。

分别采用3种不同的方法计算系统对该目标的最大作用距离:

(1) 由传统公式(1)代入系统参数计算得出系统对该黑体目标的作用距离为2.62 km。

(2) 考虑到点源成像,不可以忽略探测器感光面填充率的影响,调整探测器使目标成像位置移动,得到目标最大值信噪比 $SNR_1=312$ ,初始距离代入式(1),同时系统需求信噪比和最大作用距离 $R_2$

也代入式(1),两式联立方程组可得到

$$R_2^2 e^{\mu R_2} = \frac{SNR_1}{SNR_2} R_1^2 e^{\mu R_1} \quad (8)$$

由式(8)得到系统最大作用距离为2.08 km。

(3)文中改进的方程计算。由式(5)计算噪声均方根 $D_n=4.0258\ \text{LSB}$ ,灰度灵敏度 $S_e=1.85\times 10^{13}\ (\text{LSB}\cdot\text{W}^{-1})$ ,由式(7)计算 $NEP$ 为 $2.1622\times 10^{-13}\ \text{W}$ 。代入式(3)计算得到对该黑体的作用距离为2.34 km。

对试验结果分析如下:方法二通过式(8)计算时省去了更多的不确定因素,计算探测系统对目标的作用距离最准确,但在应用中要求条件较多,本试验是在已知测试距离的条件下推算最大作用距离,实际应用中不可能做到。利用传统式(1)得出作用距离,不能适应背景噪声的变化,误差也较大。文中改进的方程式(4)利用数字输出图像,实时监测背景噪声的变化,能适应不同应用环境下的作用距离估算,而且估算结果比较准确。

## 5 结论

红外搜索跟踪系统的作用距离受到多种因素影响,文中仅分析了环境噪声因素的影响。在不同的应用环境中,探测信号中的噪声强度随之变化,可以通过系统输出的数字图像来估算。依据各类典型目标通常的辐射强度,改进的作用距离表达式能方便地计算出红外探测系统对它的作用距离,在实时检测目标的同时,也能同步估算此时对各类不同辐射强度目标的作用距离。

## 参考文献

- [1] 樊祥,任彪,邓潘.凝视型红外搜索跟踪系统对巡航导弹作用距离分析[J].激光与红外,2009,39(5):503-506.
- [2] R D 小哈德逊.红外系统原理[M].《红外系统原理》编译组.北京:国防工业出版社,1975.
- [3] 王兵学,周昭明,张启衡,等.凝视型红外搜索跟踪系统探测能力的分析[J].光电工程,2004,31(6):52-55.
- [4] Kantrowitz F T, Watkins W R. Bandpass optimization for low-altitude long-path infrared imaging[J]. Optical Engineering, 1994, 33(4):1114-1119.
- [5] 陈秋林,薛永祺. OMIS 成像光谱数据信噪比的估算[J]. 遥感学报, 2000, 4(4):284-288.
- [6] 王兵学,张启衡,王敬儒,等.凝视型红外搜索跟踪系统作用距离模型中参数值的确定[J]. 红外技术, 2004, 26(4):6-10.