

文章编号:1001-5078(2007)02-0134-03

热成像系统点目标探测距离分析

万英, 安成斌

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:推导和修正了热成像系统点目标客观探测距离方程,在此基础上,进一步推导出实验室仿真系统的测试原理,并给出了一个利用C#与Matlab进行探测距离计算的实例。所述方法可用于热成像系统点目标性能预测与评估。

关键词:热成像系统;探测距离;仿真系统;点源探测

中图分类号:TN219

文献标识码:A

Analysis on Detection Range of Thermal Imaging System for Point Target

WAN Ying, AN Cheng-bin

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Equation of detection range of thermal imaging system for point target is deduced and corrected. Test theory of emulation system in the laboratory is deduced. A detection range calculation example is given by C# and Matlab program. The method is used for forecast and evaluation of thermal imaging system for point target performance.

Key words: thermal imaging system; detection range; emulation system; point source detection

1 引言

探测距离代表了热成像系统对所观察目标的探测能力,是观察系统的基本参数之一,也是评价热像仪好坏的一个重要指标。探测距离体现了热像仪的总体性能、被探测目标、环境对于探测的综合影响。随着热成像系统在各个领域的广泛应用,为了更准确、更全面地研究热成像系统,探测距离的研究也越来越多。

2 点目标探测距离方程推导与修正

作为辐射源,热成像所探测的目标一般可分为扩展辐射源、点源辐射源两种。扩展辐射源通常指目标角尺寸大于探测器瞬时视场的辐射源,点源辐射源通常指目标角尺寸小于探测器瞬时视场的辐射源^[1]。本文对实际探测中经常使用的点源辐射源探测距离方程进行了推导,模型参考了乌克兰科洛

勃罗多夫和德国舒斯特提出的红外热成像系统最大作用距离的非视觉模型^[2],并对式中SNR进行了修正。模型中不考虑人眼视觉对探测距离的影响,以能量形式进行方程推导。

2.1 点源辐射源作用距离基本方程

科洛勃罗多夫最大作用距离模型公式如式(1)所示:

$$R^2 = \frac{\delta A A_0}{(A_d \Delta f)^{\frac{1}{2}} \pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\varepsilon_t M_t(\lambda) - \varepsilon_b M_b(\lambda)] \tau_\alpha \tau_o D^*(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

其中, δ 为过程因子; A 为点源辐射源面积; A_0 为光学系统通光面积; A_d 为探测器有效面积; Δf 为系统

作者简介:万英(1976-),女,硕士研究生,主要从事红外成像系统总体测量方面的研究。

收稿日期:2006-08-24;**修订日期:**2006-09-14

等效噪声带宽; $M_t(\lambda)$ 为目标光谱辐射出射度; ε_t 为目标比辐射率; $M_b(\lambda)$ 为背景光谱辐射出射度; ε_b 为背景比辐射率; $\tau_a(\lambda)$ 为大气光谱透过率; $\tau_o(\lambda)$ 为光学系统光谱透过率; $D^*(\lambda)$ 为归一化光谱探测率。

科洛勃罗多夫、舒斯特在最大作用距离的非视觉模型将 SNR 固定为 1, 笔者认为该值可以作为与探测概率相关的变量, 根据不同的探测概率估算不同的作用距离, 因此本文在该公式中保留了 SNR, 如式(2)所示:

$$R^2 = \frac{\delta A A_0}{(A_d \Delta f)^{\frac{1}{2}} \text{SNR} \pi} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\varepsilon_t M_t(\lambda) - \varepsilon_b M_b(\lambda)] \tau_a \tau_o D^*(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

2.2 点源辐射源作用距离扩展方程

对于大多数热成像系统, 生产厂家往往只给出产品的 NETD 值。NETD 的计算值与测试值近似, 可以用计算值来近似替换产品的测试值。

热探测器 NETD 的计算公式如式(3)所示:

$$\text{NETD} = \frac{4F^2 \sqrt{\Delta f}}{\sqrt{ab} \tau_o D_{\lambda_p}^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \quad (3)$$

根据式(3), 将 $D_{\lambda_p}^*$ 转化为 NETD 代入式(2), 化简得非制冷热像仪探测距离公式:

$$R^2 = \frac{\delta A \tau_a}{\text{SNR} \cdot \text{NETD} \cdot \alpha \beta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{\lambda}(T)}{\partial T} \lambda d\lambda} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\varepsilon_t M_t(\lambda) - \varepsilon_b M_b(\lambda)) d\lambda \quad (4)$$

利用探测器探测率和 NETD 进行探测距离估算所受外界影响各有差异。探测器探测率是在特定频率下进行测量的, 所以系统频率变化较大时有影响; 而 NETD 是在环境温度下进行测量的, 所以背景温度变化较大时有影响。同时由于探测距离方程中包含的可变因素较多, 大气传输情况较为复杂, 因此预测距离与实际测试结果仍有差别, 但可以此作为热成像系统的设计参考。

3 探测距离实验室仿真

对于一些无法进行外场的试验, 我们给出了一种实验室近似测量的方式, 可将用户提出的战术指标客观、准确地转化为系统的技术指标; 可对

热成像系统设计方案进行模拟和评价; 可在热成像系统完成研制, 正式试验前, 进行战术指标评估。

假定目标与背景的比辐射率为 1, 由式(2)可知, 对于相同的热成像系统, 当 SNR、目标尺寸 A , 目标、背景温度、大气平均透过率相同时, 理论上可以获得相同的探测距离。

基于上述推导, 在实验室可利用变焦平行光管、靶标模拟目标尺寸 A , 利用温差黑体模拟点目标、背景能量差, 利用探测概率与 SNR 的关系计算 SNR。

在实验室进行仿真测试需要注意, 在不同背景温度下相同温差的目标产生的能量并不相同。因此针对不同环境温度的试验, 仿真测试选用的目标、背景温差值应根据能量差与温度差的关系曲线进行修正, 以提高测量精度。图 1 给出了背景温度为 260~320K, 目标温差为 10K 时, 光谱辐射出射度的变化关系。由图可知, 对于 8~12 μm 的热像仪, 环境温度 300K 与 260K 的辐射度相差 1.51 倍, 320K 与 300K 相差 1.17 倍^[3]。

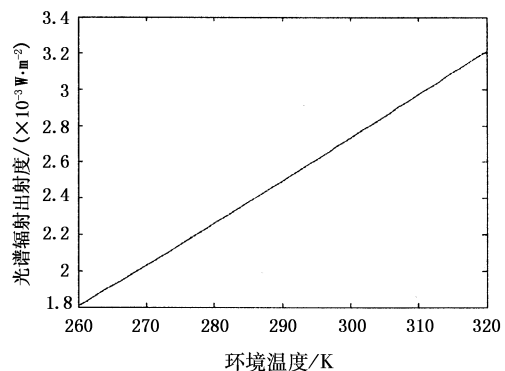


图 1 探测距离温度差-能量修正曲线

由于实验室采用温度均匀的目标、背景, 因此仿真目标与实际探测到的目标尚有区别, 通过上述分析可知试验结果接近实际情况。

4 探测距离辅助计算程序

传统点目标探测距离的计算方法为:

- 1) 计算各原始数据;
- 2) 绘制函数 $f(R) = R^2 \exp(R\sigma)$ 曲线图;
- 3) 求出等式右边值;

4) 在曲线图上画出等式右边值的直线, 其交点即为所求探测距离。

传统的计算方法在各参量发生变化时均需重新

进行计算,计算繁琐且精度不高。Matlab 具有强大的数学计算功能,给出计算公式即可方便地进行各种积分、微分等运算,从而能够快速求出探测距离值。因此利用 Matlab 编程可以简化计算工作量,提高计算精度,更有利于进行各种数据分析^[3]。

点目标探测距离计算程序流程图如图2所示,首先输入原始数据,接着选择所要计算探测距离的热成像系统,然后进行计算。

计算中所用到的拟合大气透过率曲线与实际透过率曲线非常吻合。图3给出了拟合曲线与实测曲线的比较,两条曲线1、2几乎重合,误差较小。其中横坐标为探测距离(km),纵坐标为探测概率。

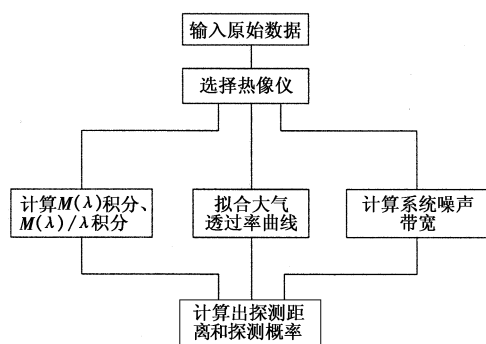


图2 探测距离仿真流程图

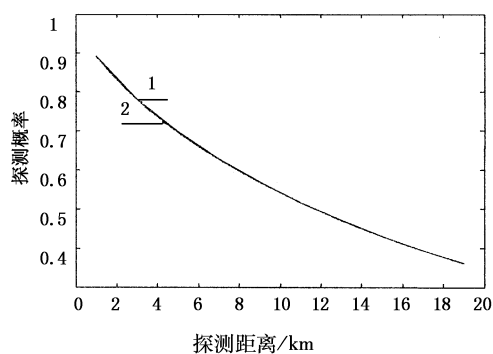


图3 透过率拟合曲线

5 结 论

根据本文推导公式,利用 C#^[4]与 Matlab^[3]的联合编程,给出了非制冷、制冷热成像系统点目标探测距离计算程序。非制冷、制冷热成像系统点目标探测距离计算值与实测值比较如表1、表2所示。

由于用公式估算探测距离时很难精确测量实测时的大气透过率,我们程序计算结果与实际热成像系统的测试结果是接近的。因此经过修正的点目标探测距离公式可以有效地用于探测距离的近似预测和评估中。

表1 非制冷热成像系统计算与实测探测距离比较

输入数据			
工作波长 $\lambda_1/\mu\text{m}$	8	光学系统有效孔径 D_0/cm	10
工作波长 $\lambda_2/\mu\text{m}$	12	探测器尺寸 a/cm	0.0045
背景温度 T_b/K	300	探测器尺寸 b/cm	0.0045
目标温度 T_t/K	302	峰值探测率 $D_{\lambda_p}^*/(\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1})$	1.00E+08
目标尺寸 $(\text{cm} \cdot \text{cm})$	10000	信噪比 SNR	3.5
目标比辐射率 ε_t	1	系统滞留时间 τ_d/s	0.02
背景比辐射率 ε_b	1	过程因数 δ	0.6
光学系统透过率 $\tau_o(\leq 1)$	0.8	透过率	0.8
计算结果			
计算探测距离:2km			
实测探测距离:1.5~1.8km			

表2 制冷热成像系统计算与实测探测距离比较

输入数据			
工作波长 $\lambda_1/\mu\text{m}$	8	光学系统有效孔径 D_0/cm	12
工作波长 $\lambda_2/\mu\text{m}$	12	探测器尺寸 a/cm	0.0025
背景温度 T_b/K	300	探测器尺寸 b/cm	0.0028
目标温度 T_t/K	302	峰值探测率 $D_{\lambda_p}^*/(\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1})$	2.00E+10
目标尺寸 $(\text{cm} \cdot \text{cm})$	10000	信噪比 SNR	3.5
目标比辐射率 ε_t	1	系统滞留时间 τ_d/s	6.45e-5
背景比辐射率 ε_b	1	过程因数 δ	0.6
光学系统透过率 $\tau_o(\leq 1)$	0.8	透过率	0.6
计算结果			
计算探测距离:8.9km			
实测探测距离:8~8.5km			

参考文献:

- [1] 张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社. 2004,6.
- [2] R T 科洛勃罗多夫,舒斯特. 红外热成像[M]. 航天工业总公司第三研究院三部、八三五八所联合翻译出版. 1994,10.
- [3] 龚剑,朱亮. MATLAB 与科学计算[M]. 北京:清华大学出版社. 2005,3.
- [4] 明寰资讯,赵立克. C#. NET 编程培训教程[M]. 北京:清华大学出版社. 2003,5.