

红外搜索跟踪系统作用距离等效折算

张 乐^{1,2}, 梁冬明², 姚 梅³, 张曼菊³, 张 雷²

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 63891 部队, 河南 洛阳 471003;
3. 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 传统的红外搜索跟踪系统作用距离方程存在一定的局限性, 没有考虑背景辐射的影响。为了完成红外搜索跟踪系统对天空背景下快速运动小目标, 在不同气象和飞行条件下作用距离的等效折算, 推导了考虑天空背景辐射的点目标红外搜索跟踪作用距离模型, 根据模型对不同气象条件下某型红外搜索跟踪系统对某型靶机的作用距离进行了推算, 并利用红外搜索跟踪系统对靶机的飞行试验实测数据对模型进行验证, 结果表明, 模型精度较高, 可以用于外场试验时红外搜索跟踪系统作用距离的等效折算。最后, 利用模型对某型红外搜索跟踪系统对特定气象条件、不同飞行条件下某型导弹的作用距离进行了等效折算。

关键词: 红外搜索跟踪系统; 作用距离; 等效折算

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0026-05

Equivalent calculation of operating range ofIRST

Zhang Le^{1,2}, Liang Dongming², Yao Mei³, Zhang Manju³, Zhang Lei²

(1. College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Unit 63891 of PLA, Luoyang 471003, China; 3. Unit 63892 of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: As the influence of background radiation is not considered, traditional operating range equation of infrared search and track system (IRST) has a limit. In order to complete the equivalent calculation of operating range of IRST on small dynamic target rapidly in various meteorological and flight conditions, the operating range model on point target of IRST was derived in the sky background. Based on the equation, the operating range of one IRST on the target drone in all kinds of meteorological conditions was calculated. In addition, the equation was validated by the data of target drone flight test and it is proved that the equation is correct and can be used to the equivalent calculation of operating range of IRST. Finally, the operating range of IRST on one kind of missile under different flight and specifically meteorological conditions was calculated based on the equation.

Key words: IRST; operating range; equivalent calculation

收稿日期: 2012-05-22; 修订日期: 2012-06-19

基金项目: 总装重大课题资助基金(2010sy3310401)

作者简介: 张乐(1977-), 男, 博士生, 主要从事事光电对抗试验方面的研究。Email: sdzl200800@yahoo.com.cn

导师简介: 姜宗福(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为高能激光技术及应用、气动光学等。

Email: jiangzongfu@yahoo.com

0 引言

随着军事高科技的飞速发展, 红外搜索跟踪系统以其被动工作方式, 不会被敌方电子干扰, 隐蔽性好, 图像直观, 易于观察, 精度高等特点得到了日益广泛的应用。从警戒系统、侦察系统到机载舰载车载火控系统、地面防空系统、导弹制导、舰艇近区防御系统, 红外搜索跟踪系统都扮演了重要的角色^[1]。探测概率、虚警率和作用距离是IRST系统的3大核心指标, 而在探测概率和虚警率一定的情况下, 作用距离对武器系统的可用性有举足轻重的地位^[2]。作用距离即系统对目标的极限搜索跟踪距离^[3], 其一般定义为规定气象条件下对某种特定目标的作用距离。但在产品制造或检验过程中, 规定的气象条件是极难遇到的, 而特定目标的要求(如外军现役导弹)有时也较难达到或配试起来试验花费较大, 效率不高。因此, 文中建立了符合工程实际的红外搜索跟踪系统作用距离模型, 并利用实测数据对模型进行了校验, 从而实现了将红外搜索跟踪系统对某型靶机的作用距离推算到特定气象条件下对某型导弹的红外作用距离。

1 红外搜索跟踪系统作用距离模型

传统的红外搜索跟踪系统的作用距离方程为^[4]:

$$R = \left[\frac{\pi \cdot D_0^2 \cdot D^* \cdot J \cdot \tau_a \cdot \tau_o}{4(A_d \cdot \Delta f)^{1/2} \cdot (V_s/V_n)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中: R 为设备作用距离; D_0 为系统光学口径; D^* 为波段探测率; J 为目标波段辐射强度; τ_a 为大气透过率; τ_o 为系统光学效率; A_d 为探测器光敏元面积, Δf 为信号带宽; V_s/V_n 为系统正常工作所需的最小信噪比。

传统方程存在一定的局限性, 主要表现在以下几个方面^[2]: (1) 在推导过程中, 假设了目标和背景都是黑体; 而实际观察的目标不是黑体, 至多是灰体, 灰体的辐射比各不相同; (2) 该算法只考虑目标到靶面上的辐射功率是否满足探测要求, 没有考虑背景辐射的影响; (3) 没有考虑成像弥散斑尺寸对作用距离的影响。参考文献[5]通过研究探测率温度特

性与背景影响对方程进行了修正, 参考文献[3]和参考文献[6]综合考虑了背景辐射和目标成像弥散的影响, 探讨了红外搜索跟踪系统对点目标的作用距离方程。参考文献[7]分别基于靶面照度、对比度、探测概率及虚警概率推导了红外搜索系统作用距离公式。参考文献[8]分析了大气对红外辐射的散射衰减以及总衰减, 在此基础上基于MRTD法和约翰逊准则给出了扩展源目标红外辐射作用距离的估算方程。文中以对空探测快速运动小目标的应用背景和易于对不同目标不同气象条件下作用距离等效折算的角度出发, 推导了红外搜索跟踪系统对点目标的作用距离方程。

对于点目标而言, 目标在探测器上的成像为一个点, 但由于目标未能充满整个像元, 该像元的部分面积仍被背景所辐照。设目标的有效面积为 A_t , 目标距红外系统的距离为 R , 目标对系统的张角为 $\alpha' \beta'$, 系统瞬时视场为 $\omega = \alpha\beta$, 且 $\alpha\beta > \alpha' \beta'$ 。这时目标与背景在距离 R 的探测器上的光谱辐照度 $H_t(\lambda)$ 为:

$$H_t(\lambda) = N_t(\lambda) \cdot \alpha' \beta' \tau_a(\lambda) + N_b(\lambda) \cdot (\alpha\beta - \alpha' \beta') + N_a(\lambda) \alpha' \beta' \quad (2)$$

式中: $N_t(\lambda)$ 为目标光谱辐射亮度; $N_b(\lambda)$ 为天空背景光谱辐射亮度; $N_a(\lambda)$ 为目标到红外系统之间的路径光谱辐射亮度; $\tau_a(\lambda)$ 为光谱大气透过率。

设光学系统通光口面积为 A_0 , 光学系统透过率为 $\tau_0(\lambda)$, 经光学系统聚焦, 会聚到探测器上的光谱辐射功率 $P(\lambda)$ 为:

$$P(\lambda) = H_t(\lambda) \cdot A_0 \cdot \tau_0(\lambda) = [N_t(\lambda) \cdot \alpha' \beta' \cdot \tau_a(\lambda) + N_a(\lambda) \alpha' \beta' + N_b(\lambda) \cdot (\alpha\beta - \alpha' \beta')] \cdot A_0 \cdot \tau_0(\lambda) \quad (3)$$

探测器的瞬时输出信号电压 V_1 为:

$$V_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [N_t(\lambda) \cdot \alpha' \beta' \cdot \tau_a(\lambda) + N_a(\lambda) \alpha' \beta' + N_b(\lambda) \cdot (\alpha\beta - \alpha' \beta')] \cdot A_0 \cdot \tau_0(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

式中: $R(\lambda)$ 为探测器电压响应率。当单元探测器的瞬时视场中仅有背景而无目标的时候, 探测器的瞬时输出信号电压 V_2 为:

$$V_2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_b(\lambda) \cdot \alpha\beta \cdot A_0 \cdot \tau_0(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5)$$

两相邻探测器瞬时的有效输出信号电压差 V_s 为:

$$V_s = V_1 - V_2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (N_t(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) + N_a(\lambda) - N_b(\lambda)) \alpha' \beta' \cdot A_0 \cdot \tau_0(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (6)$$

将 $\alpha' \beta' = A_t/R^2$, $R(\lambda) = V_n \cdot D^*(\lambda)/(A_d \cdot \Delta f)^{1/2}$ 代入公式(6),并整理可得:

$$\frac{V_s}{V_n} = \frac{A_t \cdot A_0}{R^2 (A_d \cdot \Delta f)^{1/2}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (N_t(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) + N_a(\lambda) - N_b(\lambda)) \cdot D^*(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (7)$$

令 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内,光学系统的平均透过率为 τ_0 , $D^*(\lambda)$ 的平均值为 D^* , $A_0 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4}$, D_0 为光学系统口径, $SNR = V_s/V_n$, 于是公式(7)又可表示为:

$$SNR = \frac{\pi \cdot D_0^2 \cdot D^* \cdot \tau_0 \cdot A_t}{4R^2 (A_d \cdot \Delta f)^{1/2}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (N_t(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) + N_a(\lambda) - N_b(\lambda)) d\lambda \quad (8)$$

用波段辐射亮度代替光谱辐射亮度,波段大气透过率 τ_a 代替光谱大气透过率 $\tau_a(\lambda)$,并引入信号衰减因子 δ ,红外告警设备的作用距离方程可以表述为:

$$R^2 = \frac{\pi \cdot \delta \cdot D_0^2 \cdot D^* \cdot \tau_0 \cdot A_t \cdot (N_t \cdot \tau_a + N_a - N_b)}{4(A_d \cdot \Delta f)^{1/2} \cdot SNR} \quad (9)$$

公式(9)是点目标红外搜索跟踪系统作用距离的计算公式。

2 作用距离等效折算方法

同一套红外搜索跟踪系统对不同目标的作用距离 R 仅与目标在视线方向的投影面积 A_t 、目标辐射亮度 N_t 、大气透过率 τ_a 、路径大气亮度 N_a 和背景辐射亮度 N_b 有关。引入探测系数 K ,可将公式(9)简化为:

$$R^2 = K \cdot A_t (N_t \tau_a + N_a - N_b) \quad (10)$$

用 $R_{\text{靶机}}$ 表示对某型靶机的作用距离, $R_{\text{导弹}}$ 表示对某型有动力导弹的作用距离, τ_{a1} 、 N_{a1} 、 N_{b1} 分别为靶机试验时对应的大气透过率、路径大气亮度和背景辐射亮度。 τ_{a2} 、 N_{a2} 、 N_{b2} 分别为导弹对应的大气透过率、路径大气亮度和背景辐射亮度。由公式(10)得:

$$R_{\text{靶机}}^2 = K \cdot A_{\text{靶机}} (N_{\text{靶机}} \tau_{a1} + N_{a1} - N_{b1}) \quad (11)$$

$$R_{\text{导弹}}^2 = K \cdot A_{\text{导弹}} (N_{\text{导弹}} \tau_{a2} + N_{a2} - N_{b2}) \quad (12)$$

将公式(11)与公式(12)相比,可得:

$$\frac{R_{\text{靶机}}^2}{R_{\text{导弹}}^2} = \frac{A_{\text{靶机}} (N_{\text{靶机}} \tau_{a1} + N_{a1} - N_{b1})}{A_{\text{导弹}} (N_{\text{导弹}} \tau_{a2} + N_{a2} - N_{b2})} \quad (13)$$

公式(13)即是不同气象条件和不同目标时红外搜索跟踪系统作用距离的等效折算公式。其中,路径大气亮度 N_{a1} 和 N_{a2} , 天空背景辐射亮度 N_{b1} 和 N_{b2} , 大气透过率 τ_{a1} 和 τ_{a2} 与气象条件(主要是温度、湿度、能见度) 和作用距离 R 有关,是作用距离 R 的隐函数,因此公式(13)是一个超越方程,需要用多次迭代的方法求解作用距离 R 。对于导弹和靶机等空中运动目标的红外辐射特性分析与测量,参考文献[9-12]等都有详细介绍,在此不再赘述,对于不同温度、湿度、能见度条件下的天空和背景辐射亮度及大气透过率可利用 Lowtran 软件计算。将气象条件(温度、湿度、能见度)、实测的对靶机的作用距离、靶机的辐射亮度和面积、假象作战对象导弹的辐射亮度和面积、代入公式(13),并编程调用 Lowtran 软件进行迭代运算便可得出对导弹的作用距离。

3 不同气象条件对某型靶机作用距离影响及模型校验

将某型装备红外侦察告警设备对靶机某次飞行试验的气象条件和作用距离实测值带入公式(11),可得到表示被试装备能力的 K 值,利用此 K 值和公式(11)分别计算了不同气象条件(温度、湿度、大气能见度)下某型装备对靶机的作用距离,如图 1-图 3 所示。

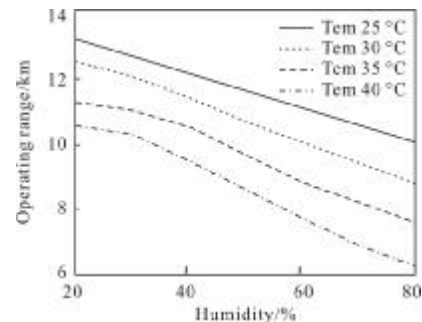


图 1 不同温度时作用距离随湿度变化曲线(能见度 10 km)

Fig.1 Curves of operating range vs humidity at different temperature (visibility 10 km)

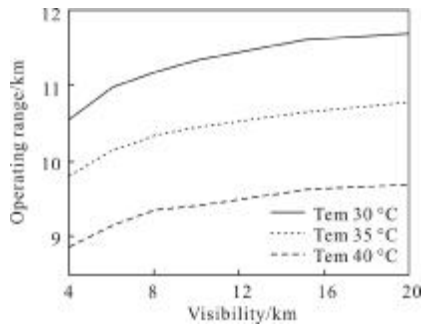


图 2 不同温度时作用距离随能见度变化曲线(湿度 40%)

Fig.2 Curves of operating range vs visibility at different temperature (humidity 40%)

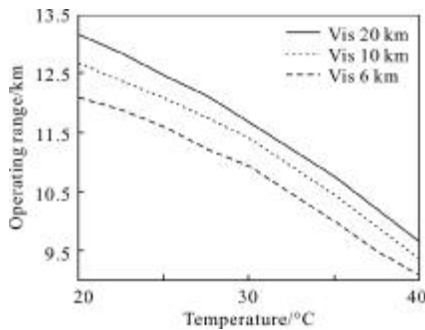


图 3 不同能见度时作用距离随温度变化曲线(湿度 40%)

Fig.3 Curves of operating range vs temperature at different visibility (humidity 40%)

由图 1~图 3 可以看出,温度、湿度和大气能见度对红外搜索跟踪系统作用距离有较大影响,湿度越大、温度越高、能见度越低则作用距离越小,湿度越低、温度越低、能见度越大则作用距离越大。其中湿度、温度对作用距离的影响较能见度的影响更为显著。

进行了两个架次的某型红外侦察告警设备对靶机的告警距离飞行试验,对比飞行试验数据和模型理论预测值,发现理论预测值偏大,考虑主要原因是:(1) 试验场区实际大气有较严重的污染,与 Lowtran 中纬度夏季大气模型的差异导致实际作用距离较理论值偏小。(2) 试验时复杂的天空背景,如云,鸟,湍流等对作用距离的影响。据此,对模型进行修正,将系统探测能力 K 值加一个修正系数,经修正后模型推算的第 3、4 架次 7 个有效航次的作用距离值与实测值如表 1 所示,可见修正后模型精度较高,最大误差不超过 7%。

表 1 理论计算作用距离值与实测作用距离值对比

Tab.1 Contrast of calculating operating range and test data

Order	Calculate data/km	Test data/km	Relative error
1	8.3	8.9	-6.7%
2	9.4	9.6	-2.0%
3	8.4	8.2	2.0%
4	8.2	8.4	-2.1%
5	7.9	7.7	2.3%
6	6.8	6.6	3.5%
7	6.5	6.7	-3.0%

4 对某型导弹作用距离的等效折算

基于对靶机的实测作用距离数据和修正后的模型,对某型红外侦察告警装备对某型导弹在不同条件下的作用距离进行了等效折算。图 4 是不同速度、不同导弹攻击角度情况下红外侦察告警装备对导弹告警距离的等效折算结果,图 4 对应的气象条件是:地面温度 34°C,湿度 35%,大气能见度 10 km。

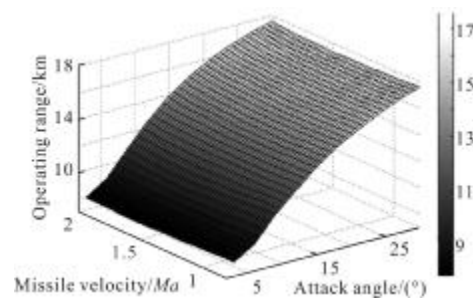


图 4 对导弹作用距离的等效折算

Fig.4 Equivalent calculation of operating range for missile

5 结 论

文中推导了红外搜索跟踪系统作用距离模型,利用实测数据对模型进行了校验,并将对某型靶机的红外告警距离数据等效折算到了不同气象条件和飞行条件下对某型导弹的红外告警距离。对红外搜索跟踪系统作用距离试验的方案设计和结果评定具有较大应用价值。由于目标和背景红外辐射的计算比较复杂,实际计算中对某些因素进行了忽略和简化。

参考文献:

- [1] Yu Changbin, Yang Kuntao, Jiang Hongbin. An equivalent calculating method of effect operating range of infrared imaging systems [J]. *Optical Optoelectronic Technology*, 2003, 1(3): 53-55. (in Chinese)
余常斌, 杨坤涛, 姜宏滨. 红外搜索跟踪系统作用距离等效折算方法[J]. *光学与光电技术*, 2003, 1(3): 53-55.
- [2] Li Fan, Liu Shangqian, Zhang Feng. Operating distance estimate ofIRST for infrared point target [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(9): 502-504. (in Chinese)
李凡, 刘上乾, 张峰. 点源目标的红外搜索与跟踪系统作用距离估算[J]. *红外技术*, 2008, 30(9): 502-504.
- [3] Mu Da, Wang Jianli, Chen Tao. Analysis on operating range of a starting infrared search and track system for high-speed aircraft[J]. *Optical Technique*, 2007, 32(3): 420-423. (in Chinese)
牟达, 王建立, 陈涛. 凝视型红外搜索跟踪系统对高速飞机作用距离的分析[J]. *光学技术*, 2007, 32(3): 420-423.
- [4] Richard D Hudson. *Principle of Infrared System* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1975. (in Chinese)
R.D 小哈得逊. 红外系统原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1975.
- [5] Wu Hanping. Operating distance equation for infrared point target detect system based on temperature characteristic of detectivity and background influence [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(6): 341-344. (in Chinese)
吴晗平. 红外点目标探测系统作用距离方程理论研究-基于探测器温度特性与背景影响[J]. *红外技术*, 2007, 29(6): 341-344.
- [6] Xing Qianglin, Huang Huiming, Xiong Rensheng. Detect-ability analyzing of IR FPA tracking system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7): 893-896. (in Chinese)
邢强林, 黄慧明, 熊仁生. 红外成像探测系统作用距离分析研究方法研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(7): 893-896.
- [7] Jia Qinglian, Qiao Yanfeng, Zheng Wenyuan. Analysis for point-target detection range of panoramic searching system [J]. *Acta Optocal Sinica*, 2009, 29(4): 938-942. (in Chinese)
贾庆莲, 乔彦峰, 郑文渊. 周视搜索系统对点目标的作用距离分析[J]. *光学学报*, 2009, 29(4): 938-942.
- [8] Gao Sifeng, Wu Ping, He Manli, et al. Estimation on the operating range of infrared system under complex atmosphere condition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 941-944. (in Chinese)
高思峰, 吴平, 何曼丽, 等. 复杂大气条件下红外系统作用距离的估算[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 941-944.
- [9] Chen Bingfeng, Fang Yihao, Xu Xiaogang. Study on the IR radiation of aero plane [J]. *Aero Weaponay*, 2005, 5: 30-32. (in Chinese)
陈炳峰, 方亦浩, 徐晓刚. 飞机的红外辐射特性研究[J]. *航空兵器*, 2005, 5: 30-32.
- [10] Hua Jianjun, Zhang Jianqiang. Calculation method of infrared signature of aerial target[J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(3): 166-169. (in Chinese)
华建军, 张建强. 空中目标红外特性的计算方法 [J]. *激光与红外*, 2001, 31(3): 166-169.
- [11] Hong Liu, Zhang Yinxi. Study on test technology of helicopter near field infrared radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(3): 1-8. (in Chinese)
洪流, 张荫锡. 直升机近区红外辐射特性测试技术研究[J]. *红外与激光工程*, 1999, 28(3): 1-8.
- [12] Mao Xia, Dong Xuyang, Diao Weihe. Calculation model of infrared radiation of cruise missile and atmospheric attenuation [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(8): 952-955. (in Chinese)
毛峡, 董旭阳, 刁伟鹤. 巡航导弹红外辐射及大气衰减计算模型[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, 34(8): 952-955.