

文章编号 2095-1531(2015)04-0636-08

采用多种红外视距模型的子弹辐射探测 系统作用距离分析

刘明奇,王思远,何玉青*,金伟其,王雪

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室,北京 100081)

摘要:本文基于子弹飞行过程中的红外辐射特性和热成像模型,结合大气对红外辐射吸收和散射衰减,在不同距离处将子弹热成像模型视为扩展源目标和点源目标,利用最小可探测温差(MDTD)、最小可分辨温差(MRTD)和噪声等效功率(NEP)分别给出了相应红外视距模型的估算方法。根据红外热像仪常用参数以3种蒙皮温度给出了3种不同模型下子弹辐射作用距离的计算实例及结果:MDTD模型下得到的作用距离最长,MRTD模型计算所得的作用距离约为MDTD模型的2/3,由NEP模型计算所得的作用距离最短,不到MDTD模型视距的1/2。研究表明,实际设计时应根据不同的系统性能选择作用距离模型。

关键词:子弹辐射;作用距离;MDTD;MRTD;NEP

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20150804.0636

Bullet radiation detection range analysis based on multiple infrared visual range prediction models

LIU Ming-qi, WANG Si-yuan, HE Yu-qing*, JIN Wei-qi, WANG Xue

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: yuqinghe@bit.edu.cn

Abstract: On the basis of analysis of the infrared radiation characteristics and the atmospheric absorption and scattering attenuation, bullet's thermal imaging model can be treated as the extended source target and point target in different distance. The minimum detectable temperature difference (MDTD), minimum resolvable temperature difference (MRTD) and noise equivalent power (NEP) models are used for estimating the corresponding bullet radiation detection range. Examples and results of the bullet radiation operating range under three kinds of models are given according to the specific thermal imager's parameters and three kinds of skin temperature. The operating range is the longest when calculated by MDTD model, and 2/3 of the longest operating range can be obtained with MRTD model. The operating range calculated with NEP model is the shortest, just less than 1/2 of the longest operating range. This study shows that the reasonable operating range model

收稿日期:2015-04-03;修订日期:2015-04-17

基金项目:“光电成像技术与系统”教育部重点实验室开放基金资助项目(No. 2013OEIOF03)

should be chosen based on the system performance in actual design.

Key words: bullet radiation; operating range; MDTD; MRTD; NEP

1 引言

在现今的军事战场中,狙击战术凭借其战法灵活、作战单位小、战斗效能大等特点得到了广泛的应用,从而对应用于维和、反恐等行动的反狙击探测系统的发展提出了迫切的需求。反狙击探测系统以被动或主动方式确定狙击手位置,可分为红外探测系统、声探测系统和激光探测系统。红外探测是通过探测枪口闪光或飞行弹丸的红外信号并反溯至发射点,来确定敌方狙击手位置^[1]。与声探测和激光探测系统相比,红外探测系统具有响应时间短、目标探测率大及探测精度高等特点。利用子弹轨迹红外成像对狙击手位置进行探测是近期出现的新型探测技术。系统的作用距离是反狙击手探测系统的一个重要参数,对作用距离进行有效分析,在探测系统理论模型设计与系统性能分析时具有指导意义。

目前针对飞行目标的辐射强度及目标检测等方面的研究^[2-4],但对于弹丸等高速红外小目标探测距离的分析研究较少。文献[5]以弹丸作为点目标,利用其辐射强度及红外探测器归一化探测率对探测距离进行了仿真。文献[6]研究了表观对比度模型表达的天空背景下红外点目标的探测距离估计方法。文献[7]利用最小可分辨温差(MRTD)计算红外热像仪作用距离。文献[8-9]基于噪声等效温差(NETD)对红外系统探测距离进行了分析。综合而言,红外系统的作用距离会受到外部环境以及系统的静态性能的共同影响,前人对于红外系统作用距离的研究一般使用一种计算模型或仅考虑了某一方面因素的影响。

由于作用距离的不同,子弹可以被视为点源或扩展源,某些情况下还需要考虑系统及环境噪声对作用距离的影响。本文综合考虑了大气衰减以及子弹成像模型等因素对作用距离的影响,针对不同情况分别使用MDTD、MRTD、噪声等效功率(NEP)3种视距模型逐一进行分析,并得出在这3种模型中作用距离的计算方法;然后辅以实

例计算,在实际系统中分别使用这3种模型进行计算并进行结果对比分析。

2 子弹作用距离的估算模型

系统的作用距离是指对于特定目标,系统能够探测到目标的最大距离(也被称为探测距离)。子弹发射离开枪口后由于与空气摩擦使温度升高,与环境温度存在明显温差,子弹的蒙皮辐射主要集中在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 两个大气窗口,可用红外热像仪在几千米外对其轨迹进行探测并溯源定位^[10]。由于子弹为高速红外小目标,结合大气对辐射的衰减,可以利用MDTD、MRTD、NEP等不同模式的视距模型估算分析其作用距离。

2.1 大气对红外辐射的影响

子弹的红外辐射以大气为传输媒介,其中气体分子和杂质颗粒对子弹的红外辐射吸收和散射作用而产生衰减,使得红外探测器接收的辐射降低或丢失,对红外热像仪的成像性能产生较大影响。因此在进行探测距离的分析时要考虑大气对红外辐射能量的吸收和散射作用。

大气对红外辐射的影响,主要考虑水蒸气和二氧化碳分子的吸收作用和大气分子及气溶胶粒子的散射作用,可得到大气的总透过率为:

$$\tau(\lambda) = \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{CO}_2}(\lambda) \cdot \tau_2(\lambda), \quad (1)$$

式中: $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ 和 $\tau_{\text{CO}_2}(\lambda)$ 分别是水蒸气和二氧化碳的吸收透过率, $\tau_2(\lambda)$ 为大气的散射透过率。

由于公式计算复杂,实际计算时可使用Lowtran软件得到大气透过率^[11-12]。

2.2 MDTD法视距模型

在红外热像仪的曝光时间内子弹飞行的距离在探测器焦平面上所成的像很小,以致目标的张角小于或等于红外热像仪的瞬时视场,这时可将子弹看作点目标。对于点目标的视距估算通常使用MDTD法。

MDTD法视距模型的基本思想为:对空间张角角频率为 f 的点目标,其与背景的实际等效温差在经过大气衰减到达热成像系统时,仍大于或

等于对应该频率的最小可探测温差 $\text{MDTD}(f)$, 即:

$$\Delta T = \Delta T_e \tau_a(R) \geq \text{MDTD}(f), \quad (2)$$

$$\frac{H}{R} = \theta = \frac{1}{2f}, \quad (3)$$

式中: ΔT 为经大气衰减后子弹蒙皮与背景的视在温差; ΔT_e 为子弹与背景的实际等效温差; $\tau_a(R)$ 为 R 距离上的平均大气透射比; H 为目标的高度。

MDTD 可表示为^[13]:

$$\text{MDTD}(f) = \sqrt{2} \text{SNR}_{\text{DT}} \frac{\text{NETD}}{I(x,y)} \left[\frac{\beta \Delta f_{\text{eye}}(f)}{t_e f_p \Delta f_n} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

式中, SNR_{DT} 为观察者刚好可探测的视觉阈值信噪比; NETD 为噪声等效温差; $I(x,y)$ 为振幅规格化为 1 的方块目标的像, 当目标张角小于系统张角时, 可简化为目标的立体角与探测器张角之比,

即 $I(x,y) = \frac{A_s}{\omega R^2}$, A_s 为目标的辐射面积, ω 为探测器的瞬时视场立体角; β 为垂直张角; $\Delta f_{\text{eye}}(f)$ 为考虑眼睛匹配滤波器作用的噪声带宽; t_e 为人眼的积分时间, $t_e \approx 0.2 \text{ s}$; f_p 为帧频; Δf_n 为系统的等效噪声带宽。

对 MDTD 式子进行 NETD 修正, 最终可表示为 R 的函数:

$$\text{MDTD} = \text{SNR}_{\text{DT}} \cdot \text{NETD} \cdot \frac{\omega R^2}{A_s} \cdot \left[\frac{R}{2H} \cdot \frac{\beta \Delta f_{\text{eye}}(f)}{t_e f_p \Delta f_n} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

2.3 MRTD 法视距模型

在红外热像仪的曝光时间内, 当子弹对系统的张角超过系统瞬时视场时, 可把子弹看作扩展源。对于扩展源的探测, 不仅要考虑目标能量的大小, 还要考虑目标的形状、大小及细节信息。目前对扩展源作用距离的估算, 主要是利用表征红外热像仪的 MRTD 。

MRTD 的一般表达式为^[14]:

$$\text{MRTD}(f) = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} \text{SNR}_{\text{DT}} f \cdot \frac{\text{NETD}}{\text{MTF}_s(f)} \left[\frac{\alpha \beta}{\tau_d t_e f_p \Delta f_n} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

式中: $\text{MTF}_s(f)$ 为热成像系统的调制传递函数; α 为瞬时视场的水平张角, β 为垂直张角; τ_d 为驻留时间。

人眼通过热成像系统能够观察目标的基本条件为:

$$\Delta T = \Delta T_e \tau_a(R) \geq \text{MRTD}(f), \quad (7)$$

$$\frac{H}{n_e R} \geq \Delta \theta = \frac{1}{2f}, \quad (8)$$

式中: H 为目标高度; n_e 为不同观察等级要求时目标的等效条带数(半周期数)。

在用于实际目标的观察时, 目标特性和环境条件并不满足标准条件, 因此在对作用距离进行估算时要对 MRTD 进行修正, 通过对目标形状和探测概率与视觉阈值信噪比的修正, MRTD 最终可表示为 R 的函数:

$$\text{MRTD}(R) = \frac{\pi^2}{8\sqrt{2}} \frac{n_e R}{H} \text{SNR} \cdot \frac{\text{NETD}}{\text{MTF}_s(R)} \left[\frac{\alpha \beta}{\tau_d t_e f_p \Delta f_n \varepsilon} \right]^{1/2}, \quad (9)$$

式中: n_e 表示要求的观察等级下所需的条带对数, ε 表示等效条带图案的高宽比, 可由 n_e 与目标的方向因子(高宽比) α_0 的关系求得:

$$\varepsilon = \begin{cases} n_e \alpha_0, & x \text{ 方向} \\ n_e / \alpha_0, & y \text{ 方向} \end{cases}. \quad (10)$$

2.4 NEP 法视距模型

对飞行子弹进行探测时, 红外探测器在接收到子弹红外辐射的信号同时, 还会受到环境噪声和探测器噪声的影响。噪声的存在会限制探测器对微弱辐射信号的探测能力。NEP 反映了包括环境噪声因素在内的各类噪声的大小, 可以在不同的实际应用环境中对红外系统的作用距离进行推算。红外探测系统的作用距离常以目标的辐射强度及探测器归一化探测率之间的关系进行表达, 普遍表达式为^[15]:

$$R^2 = \frac{A_0 J \tau_a \tau_0 D^*}{(V_s/V_n) (A_d \Delta f)^{1/2}}, \quad (11)$$

式中: A_0 为光学系统的入射孔径面积; J 为目标的光谱辐射强度; τ_a 为传感器到目标路程上的光谱透过率; τ_0 为光学系统的光谱透过率; D^* 为归一

化的探测率; V_s 为探测器输出信号电压的均方根值; V_n 为输出的噪声电压的均方根值; A_d 为探测器的面积。根据 D^* 的定义:

$$D^* = D \sqrt{A_d \Delta f} = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{\text{NEP}}, \quad (12)$$

式中: NEP 为噪声等效功率。因此,作用距离 R 可表示为:

$$R^2 = \frac{A_0 J \tau_a \tau_0}{\text{SNR} \times \text{NEP}}, \quad (13)$$

目标的光谱辐射强度 J 可以采用下面的方法确定。为了更好的分析目标的辐射特性,将目标看成灰体。设目标的温度为 T , 表面材料发射率为 ε_0 , 根据普朗克公式在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内目标辐射强度 J 为:

$$J = \frac{A_s \varepsilon_0}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda. \quad (14)$$

2.5 3种视距估算方法的比较

飞行过程的子弹的成像模型可分别看作点目标、扩展源目标,同时受到噪声的影响。因此,3种模型在一定程度上都能够估算红外成像系统对子弹的作用距离。MDTD 法视距模型主要适用于点目标情形,从目标的能量出发,目标经过大气的衰减后到达系统的能量只要大于系统的探测阈值,系统就可以对目标进行探测,从而可利用这种方式对作用距离进行估算。MRTD 法视距模型适用于扩展源目标,可对目标的细节信息进行探测,包含了目标的辐射特性和热像仪的性能,还涵盖了观察者的主观因素。NEP 法视距模型主要是考虑噪声因素对作用距离的影响,红外成像系统在对目标进行探测时都会存在噪声的干扰,故此方法可对各类不同辐射强度目标的作用距离进行估算。

3 子弹作用距离估算实例

以特定的红外成像系统对3种模型进行作用距离的计算,以对3种模型得到的结果进行分析对比。对飞行过程中的子弹的红外特性以及外观模型进行了分析,得到了计算探测距离时所需要的相关参数。以 FLIR-T425 型号红外热像仪作为

探测系统,其主要性能参数如表1所示。

表1 红外热像仪的性能参数

参数名称	参数值
探测器像素/pixel	320 × 240
像元边长/ μm	25
光谱响应/ μm	8 ~ 14
NETD/K	<0.05
F 数	1.7
通光孔径/nm	12.5
系统透过率	0.93
帧频/Hz	50
SNR	10
积分时间/ms	2

由于大气条件的多样性,计算时选用温度 29 °C, 相对湿度 23%, 能见距离 10 km, 海拔 0.031 3 km 的大气条件,利用 Lowtran7 软件计算可以得到大气的总透过率与工作距离的关系,如图1所示。

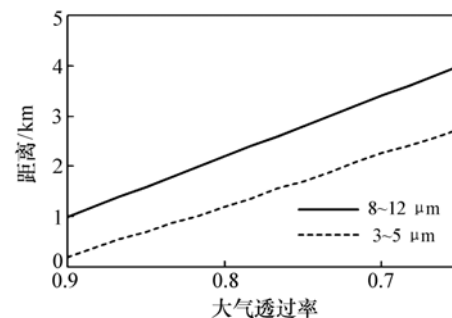


图1 大气的总透过率

Fig.1 Total atmospheric transmittance

计算时选择某狙击步枪,子弹高为 7.62 mm。计算时以子弹飞行方向垂直于热像仪的光轴进行分析,此状态对应的作用距离最大。子弹从枪膛出射速度为 700 ~ 1 000 m/s,计算时分别取子弹的速度为 700、850、1 000 m/s,由其对应的马赫数 M 及环境温度 T_a (取 300 K) 的关系 $T = (1 + 0.8M^2)T_a$ 计算^[10] 得到对应的表面温度分别为 500、600、700 K。

3.1 MDTD 法视距模型计算结果

在红外热像仪的积分时间内(一般为 1 ~

2 ms)子弹飞行的最大距离为2 m左右,当子弹轨迹在探测器上成像小于一个像元时,可以将其视为点目标。

对于点源目标,根据MDTD视距模型,考虑眼睛匹配滤波作用的噪声带宽,可得到 $\Delta f_{\text{eye}}(f) = \frac{f\alpha\varepsilon}{7\tau_d}$ 。代入上式到式(5)中,化简可得到探测条件式(15)

$$\text{SNR}_{\text{DT}} \cdot \text{NETD} \cdot \frac{\omega}{A_0 H} \cdot \left[\frac{\omega\varepsilon}{7\pi t_\omega f_p} \right]^{1/2} \cdot R^3 \leq \Delta T_e \tau_a(R) \quad (15)$$

结合资料, $\omega = 3.6 \times 10^{-7}$, $\text{SNR}_{\text{DT}} = 2.8$, $\text{NETD} = 0.05 \text{ K}$, 系统入射孔径面积 $A_0 = 1.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2$,子弹辐射面视为长2 m、高7.62 mm的矩形,则 $A_s = 1.52 \times 10^{-3} \text{ m}^2$,将这些数值代入,可以计算得到在该大气条件下的探测距离与大气透射率 τ 的函数关系。实际上,由于MDTD模型计算出的探测距离 R 是 τ 的函数(如图2),而Lowtran计算得到了 τ 根据距离 R 的变化的对应关系,因此,可将上述2个关系视为 R 和 τ 的二元方程组,则图中Lowtran计算得到的曲线与MDTD计算得出的曲线交点为所求探测距离。由图2的分析得出探测距离分别为 $R_{700} = 4.83 \text{ km}$, $R_{850} = 5.82 \text{ km}$, $R_{1000} = 6.29 \text{ km}$ 。

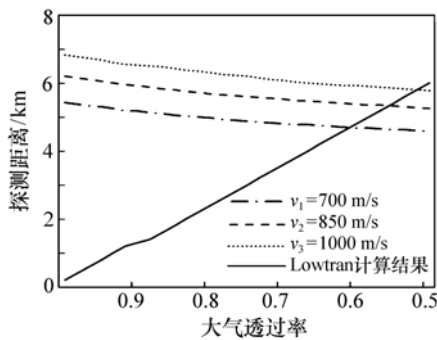


图2 MDTD模型下探测距离与大气透过率关系

Fig. 2 Relationship between the detection range and atmospheric transmittance under MDTD model

3.2 MRTD 法视距模型计算

系统瞬时视场为1.25 mrad,当子弹在一帧有效曝光时间内飞过的最大距离对系统的张角大于瞬时视场时,可将其视为扩展源。

对于扩展源目标, $\beta = 0.6 \times 10^{-3}$; $\tau_e = 0.2 \text{ s}$; $n_e = 1$; $f_p = 50 \text{ Hz}$; 目标的方向因子 $\alpha_0 = 7.62 \times 10^{-3}$ 。利用MRTD视距模型对作用距离进行估算,式(9)给出了定义修正后的MRTD的表达式。其探测条件为式(7)、式(8),将上述参数代入,由于将目标视为扩展源,设探测距离初值为2 km,利用Matlab编程进行迭代计算得到探测距离与MTF的函数关系如图3。对于红外探测器,系统的MTF要求在0.5以上,取 $\text{MTF} = 0.6$,可以得到探测距离约为 $R_{700} = 3.09 \text{ km}$, $R_{850} = 3.77 \text{ km}$, $R_{1000} = 4.27 \text{ km}$ 。

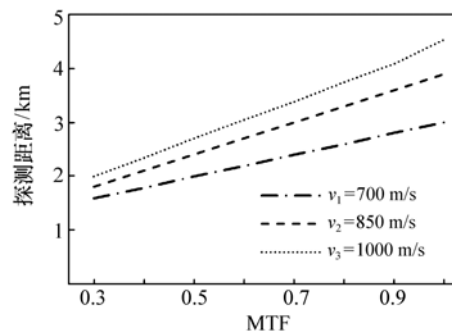


图3 MRTD模型计算出的不同MTF下的探测距离

Fig. 3 Relationship between the detection range and MTF under MRTD model

3.3 NEP 法视距模型计算

使用NEP模型计算时,系统的一些参数计算如下: $A_d = 4.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, $r_0 = 6.25 \text{ mm}$, $\tau_a = 0.93$, $\text{SNR} = 10$, $\text{NEP} = \frac{\pi}{4} \frac{A_d}{F} \times \text{NETD} = 0.005 \text{ W}$,在8 ~ 12 μm 范围内由式(14)得到500 K对应的子弹辐

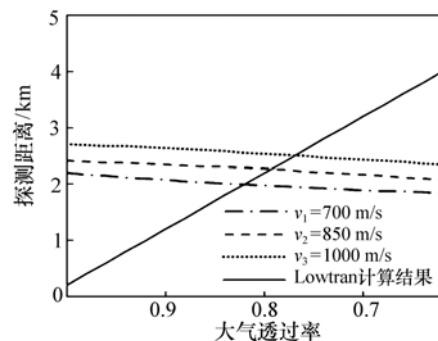


图4 NEP模型下探测距离与大气透过率关系

Fig. 4 Relationship between the detection range and atmospheric transmittance under NEP model

射强度 $J_{500} = 418.9 \text{ W/sr}$ 。子弹温度 T 取 600 和 700 K 时,分别可以得到 $J_{600} = 460.3 \text{ W/sr}$, $J_{700} = 509.9 \text{ W/sr}$ 。将计算结果代入式(13),可以得到探测距离 R 和大气透过率 τ_0 的函数关系,如图4。与 MDTD 模型计算时相似,NEP 模型计算出的探测距离也是 τ 的函数,由图中与 Lowtran 计算的曲线交点坐标可以得到在 NEP 视距模型下的探测距离。由图4的计算分析得出探测距离为 $R_{700} = 2.01 \text{ km}$, $R_{850} = 2.35 \text{ km}$, $R_{1000} = 2.52 \text{ km}$ 。

3.4 计算结果分析

在上述计算过程中,通过分析飞行子弹的红外辐射特性,结合其实际模型进行了一系列模拟仿真计算,得出了不同的作用距离的结果。同时,还将典型系统参数代入文献[5]的探测距离公式中计算得到了对应的结果,对比结果如表2所示。

表2 作用距离计算结果对比

Tab.2 Comparison of operating range results

子弹速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	MDTD/km	MRTD/km	NEP/km	文献 5/km
700	4.83	3.09	2.01	5.08
850	5.82	3.77	2.35	5.27
1 000	6.29	4.27	2.52	5.61

由于将目标视为点源,MDTD 模型计算所得的作用距离最大;MRTD 模型的计算结果是作用距离是关于 MTF 的函数,对于常规系统的 MTF 值,所得的作用距离约为 MDTD 模型计算结果的 2/3;而 NEP 模型考虑到噪声对探测的影响,计算所得的作用距离最小,不到 MDTD 模型视距的 1/2。与文献[5]的探测距离结果对比说明将子弹视为点目标的 MDTD 模型计算结果与参考文献结果最接近,说明常规弹丸探测距离的计算也多为点目标模式,未考虑扩展源与噪声等影响。常规的狙击步枪的有效射程一般在 1~2 km,从表2数据可以得出,不论采用哪种模型计算系统

参考文献:

- [1] KASTEK M, DULSKI R, TRZASKAWKA P, *et al.*. Sniper detection using infrared camera: technical possibilities and limitations[J]. *SPIE*, 2010: 76662E.
- [2] 袁轶慧, 张俊举, 陈佐龙. 飞行弹丸表面温度与红外辐射特性仿真研究[J]. *兵工学报*, 2010, 31(8): 1090-1094.
YUAN Y H, ZHANG J J, CHEN Z L. Simulation study on temperature and infrared radiation characteristics of flying projec-

的作用距离,都大于其有效射程,即探测系统均可在步枪射程之外对子弹辐射进行探测。

在实际设计时不能一概把子弹目标当作点源。由于利用不同的模型计算得出的作用距离存在较大的数值差异,应根据不同的系统性能、针对的系统工作距离选择合适的作用距离模型。通过计算结果可以得到在距目标足够远时,将目标视为点源,可以使用 MDTD 模型进行作用距离估算;若距离较近,将目标视为扩展源并需考虑目标形状等细节信息时选用 MRTD 模型估算;若系统信噪比 SNR 较小,即噪声对计算的影响较大时,选用 NEP 模型进行估算会更为准确。实际系统设计时,由于后端定位算法还需要对子弹在红外图像的像点进行提取分析^[10],考虑到红外图像点目标提取算法的困难和精度较低,扩展源目标相对而言较易提取,因此可以 MRTD 模型的作用距离估算结果或者取计算出的最小作用距离作为设计依据。

4 结论

本文针对利用子弹红外辐射轨迹探测并溯源的狙击手位置探测系统,综合考虑了大气对红外辐射的吸收和散射作用以及子弹的成像模型,结合 MDTD、MRTD、NEP 3 种红外视距模型,分别对子弹的作用距离公式进行了分析。通过特定参数红外成像系统的实例计算给出了 3 种不同模型下的作用距离计算结果,MDTD 模型下得到的作用距离最长, MRTD 模型计算所得的作用距离约为 MDTD 模型的 2/3,由 NEP 模型计算所得的作用距离最短,不到 MDTD 模型视距的 1/2,并分析了具体的适用条件,为系统设计提供了理论依据。在未来的研究工作中,将根据仿真计算结果指导探测系统参数的设计及对系统放置位置进行实验验证。

- tile[J]. *Acta Armamentarii*,2010,31(8):1090-1094. (in Chinese)
- [3] 李翰山,雷志勇.基于摄像法测量弹丸的空间炸点位置[J].*光学精密工程*,2012,20(2):329-336.
LI H SH,LEI ZH Y. Measurement of space burst location for projectile base on photography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(2):329-336. (in Chinese)
- [4] 孟祥龙,张伟,丛明煜.天基红外图像的点目标检测[J].*光学精密工程*,2010,18(9):2094-2100.
MENG X L,ZHANG W,CONG M Y. Detection of point targets in space-based infrared images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(9):2094-2100. (in Chinese)
- [5] 张宝辉,张俊举,常本康.红外探测器对飞行弹丸探测距离的仿真研究[J].*兵工学报*,2012,11(13):1319-1323.
ZHANG B H,ZHANG J J,CHANG B K. Simulation on detection range of infrared detector for flying projectile[J]. *Acta Armamentarii*,2012,11(13):1319-1323. (in Chinese)
- [6] 王刚,禹秉熙.基于对比度的空中红外点目标探测距离估计方法[J].*光学精密工程*,2002,10(3):276-280.
WANG G,YU B X. Approach to estimate infrared point-target detection range against sky background based on contrast [J]. *Opt. Precision Eng.*,2002,10(3):276-280. (in Chinese)
- [7] 李颖文,杨长城,洪韬.红外热像仪的自动 MRTD 测试和性能分析[J].*红外与激光工程*,2010,39:287-290.
LI Y W,YANG CH CH,HONG T. Automatic MRTD test and acquisition performance evaluation of infrared thermal imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2010,39:287-290. (in Chinese)
- [8] 黄静,刘朝晖,邓书颖.点源目标的红外成像系统探测距离分析[J].*科学技术与工程*,2007,7(18):4587-4590.
HUANG J,LIU CH H,DENG SH Y. Theoretical analysis of the detection range of infrared imaging system[J]. *Science Technology and Engineering*,2007,7(18):4587-4590. (in Chinese)
- [9] 白渭雄,付全喜,焦光龙.对 NETD 表达的红外热像仪探测距离的讨论[J].*激光与红外*,2007,37(12):1270-1273.
BAI W X,FU Q X,JIAO G L. Discussion on the detection range of the thermal infrared imager expressed by NETD[J]. *Laser & Infrared*,2007,37(12):1270-1273. (in Chinese)
- [10] HE Y Q,LIU F H,WU ZH,*et al.*. Counter sniper;a localization system based on dual thermal imager[J]. *SPIE*,2010, 7850:78500V.
- [11] 高思峰,吴平,何曼丽.复杂大气条件下红外系统探测距离的估算[J].*红外与激光工程*,2008,37(6):941-944.
GAO S F,WU P,HE M L. Estimation on the detection range of infrared system under complex atmosphere condition[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2008,37(6):941-944. (in Chinese)
- [12] 肖韶荣,汪坤,刘娟.大气气溶胶浓度检测及检测系统设计[J].*中国光学*,2011,4(6):633-639.
XIAO SH R,WANG K,LIU J. Detection of atmospheric aerosol concentration and detection system design[J]. *Chinese Optics*,2011,4(6):633-639. (in Chinese)
- [13] 高雅允.热成像系统用于小目标探测的探测距离估算[J].*北京理工大学学报*,1991,4(11):45-49.
GAO ZH Y. Determination of detection distance in thermal imaging systems for the detection of small objects[J]. *J. Beijing Institute of Technology*,1991,4(11):45-49. (in Chinese)
- [14] 金伟其,张敬贤,高雅允.热成像系统对扩展源目标的视距估算[J].*北京理工大学学报*,1996,16(1):25-30.
JIN W Q,ZHANG J X,GAO ZH Y. Visual range prediction for the extended source target in thermal imaging systems [J]. *J. Beijing Institute of Technology*,1996,16(1):25-30. (in Chinese)
- [15] HUDSON R D. 红外系统原理[M].北京:国防工业出版社,1975.
HUDSON R D. *Principle of Infrared System*[M]. Beijing:National Defence Industry Press,1975. (in Chinese)

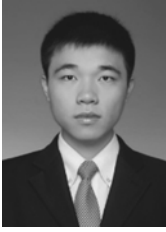
作者简介:



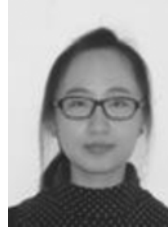
刘明奇(1963—),男,河南洛阳人,博士,研究员,1985年、1989年、2008年于北京理工大学分别获学士、硕士、博士学位,主要从事微光与红外夜视技术、光电成像技术、数字图像处理技术方面的研究。E-mail:liumingqi@bit.edu.cn



金伟其(1961—),男,云南人,博士,教授,1982年于北京工业学院获得学士学位,1990年于北京理工大学获得博士学位,主要从事微光与红外成像技术方面的研究。E-mail:jinwq@bit.edu.cn



王思远(1991—),男,江西上饶人,硕士研究生,2012年于北京理工大学获得学士学位,主要从事红外成像技术以及图像处理算法方面的研究。E-mail: wertq456@sina.com



王雪(1991—),女,吉林桦甸人,硕士研究生,2014年于北京理工大学获得学士学位,主要从事红外成像技术以及生物特征识别技术方面的研究。E-mail: 1529574455@qq.com



何玉青(1977—),女,河北无极人,博士,副教授,1998年、2003年于北京理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事红外成像技术、生物特征识别技术方面的研究。E-mail: yuqinghe@bit.edu.cn

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国出版政府奖期刊提名奖
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊
- * 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址:http://www.eope.net

定价:100.00 元/册