

基于靶标辐射元的 IR-JST 温度反演方法研究

张冬晓¹, 陈志斌², 肖程¹, 秦梦泽¹

(1. 陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

2. 中国人民解放军 32181 部队, 河北 石家庄 050003)

摘要: 红外成像干扰模拟靶标(JST)用以在红外成像导引系统(IRIGS)抗干扰性能测试中为IRIGS提供干扰源,目前普遍采用的数字仿真法受仿真精度的制约不能准确的模拟各类干扰源,为此本文提出了一种基于热电器件阵列的红外成像干扰模拟靶标生成方法。但是实验中发现热像仪温度反演过程中,利用传统的黑体定标方法将引入发射率补偿误差,并且随着工作时间的增加,热像仪发生温度漂移现象,严重的影响了热像仪温度反演精度。针对以上问题,提出了一种基于靶标敏感单元的热像仪标定方法及漂移补偿算法,实验结果表明,该方法能够使热像仪温度反演误差由7℃降低至0.5℃。

关键词: 红外成像制导系统;抗干扰性能;红外成像干扰模拟靶标;温度反演;靶标辐射元
中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.08.016

Research on the temperature inversion algorithm of IR-JST based on the target radiation element

ZHANG Dong-xiao¹, CHEN Zhi-bin², XIAO Cheng¹, QIN Meng-ze¹

(1. Department of Electronics and Optics, The Army Engineering University, Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang 050003, China; 2. 32181 Troops of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Infrared imaging jamming simulation target(JST) is used to provide interference source for IRIGS in the anti-jamming performance test of infrared imaging guidance system(IRIGS). at present, the digital simulation method is widely adopted, but it cannot simulate all kinds of interference sources accurately, because of the limitation of simulation accuracy. For this reason, a generation methods of the JST for IRIGS was proposed. But in the experiment, it is found that the emissivity error is introduced when using the traditional blackbody calibration method, and with the increase of operate time, the phenomenon of temperature drift occurs, it seriously affects the temperature inversion accuracy of thermal imager. In view of the above problems, a calibration method and a drift compensation algorithm for thermal imager based on target radiation element are proposed. The experimental result shows that This method can reduce thermal imager temperature inversion error from 7°C to 0.5°C.

Keywords: infrared imaging guidance system (IRIGS); anti-jamming performance; infrared imaging jamming simulation target (JST); target radiation element; temperature inversion

1 引言

红外成像制导以其高精度制导能力以及全天

候作战特点,逐渐成为信息化战场上不可或缺的打击手段。但是随着各种干扰技术的日趋成熟,

基金项目:国防科技项目基金项目(No. 2004053)资助。

作者简介:张冬晓(1991-),男,博士研究生,主要从事光电探测、处理与加密传输技术方面的研究工作。E-mail: zhang58452sc@163.com

收稿日期:2020-11-12

红外成像制导导弹的作战环境变得越来越复杂,使其高精度制导能力受到抑制^[1]。为使红外成像导引系统(IRIGS)在复杂作战环境中发挥最大的效能,必须在制导系统的研制和日常维护过程中,对导引系统的抗干扰性能进行实时检测和评估。

目前用于检测 IRIGS 抗干扰性能的方法主要有外场靶试法和数字仿真法^[2]。外场靶试法是在真实战场环境下进行导弹实弹测试,该方法测试精度高且最接近导弹的实战表现,但是缺点是成本高、不适用与日常检测;数字仿真法是目前国内外普遍采用的方法,其核心是用计算机生模拟战场环境及干扰源特征,利用红外景象投影系统将战场图像投射到红外成像导引头来完成评估。此方法的缺点是仿真环境与真实环境很大差别,使得评估结果带有误差。

本文针对数字仿真法的缺点,提出了一种基于热电器件阵列的红外成像干扰模拟靶标,采用热电器件阵列模拟各种干扰手段并置于真实环境中进行抗干扰性能的检测。

2 红外成像干扰模拟靶标生成方法

红外成像干扰模拟靶标用以模拟各类干扰手段,常见的干扰手段有,红外烟幕干扰、红外假目标干扰和红外隐身干扰等^[2]。这些干扰手段的核心均为改变目标的红外辐射强度或辐射分布,使得 IRIGS 丢失目标的外形信息。其中红外烟幕干扰本质是用红外烟幕掩盖目标红外辐射;红外假目标是模拟真目标的红外辐射特征,诱骗 IRIGS;红外隐身是模拟背景辐射分布,使目标与背景融为一体。根据上述分析可知,本文所提红外成像干扰模拟靶标必须具有改变红外辐射分布以及红外辐射强度的能力,由斯忒潘—波尔兹曼定律可知,红外辐射强度可通过温度和发射率进行控制。从目前已有的变发射率材料来看,其动态范围有限,不能适应温度变化较大的环境^[3]。所以一般采用变温材料,其中热电材料可通过加载在材料两端的电场对材料温度进行控制,成为干扰模拟靶标的首选材料。考虑到改变红外辐射分布的要求,将电致变温材料阵列化,每个变温材料单元可看作阵列中的一个辐射元,通过控制每个辐射元的红外辐射,即可形成不同的红外辐射分布。

比较上述几种干扰手段可知,红外烟幕干扰及红外假目标干扰只需模拟干扰源的红外辐射特征,相比于此,红外隐身干扰需要模拟复杂背景的红外辐射特征,并控制干扰模拟靶标自身红外辐射,使之与背景相一致^[4],是几种干扰手段中最为困难的一种。所以本文以红外隐身干扰为重点,分析红外成像干扰模拟靶标生成方法。

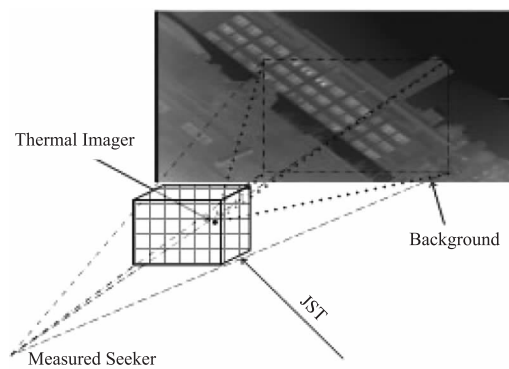


图1 红外隐身干扰模拟靶标工作原理

Fig. 1 The operating principle of the infrared stealth JST

红外隐身干扰模拟靶标的工作原理如图1所示,靶标位于被测导引头视场中,并遮挡了部分背景,这部分背景与靶标形成投影关系。位于靶标后方的红外热像仪实时探测背景红外辐射分布,并根据投影关系将遮挡的部分背景重投影到干扰模拟靶标上,此时热电器件阵列中的每一个辐射元分别对应遮挡背景的一部分。最后由遮挡背景的红外图像反演出热电器件各辐射元的控制温度,进而控制干扰模拟靶标复现被遮挡住的部分背景。最后由被测导引头接收隐身后的靶标图像,评估被测导引头的抗干扰性能。

2.1 遮挡背景重投影模型

由以上分析可知,生成红外隐身干扰模拟靶标的第一步是建立干扰模拟靶标与被遮挡背景之间的空间映射关系,这种空间映射关系以透视投影关系为基础,其特点在于坐标系的建立和转换^[5]。所以首先根据红外隐身干扰模拟靶标工作原理建立坐标系。

根据被测导引头、干扰模拟靶标以及红外热像仪三者的位置关系,建立三套坐标系,分别为:靶标坐标系 $O_b - X_b Y_b Z_b$;热像仪坐标系 $O_T - X_T Y_T Z_T$;导引头坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$,三套坐标系的定义方法如图2所示。

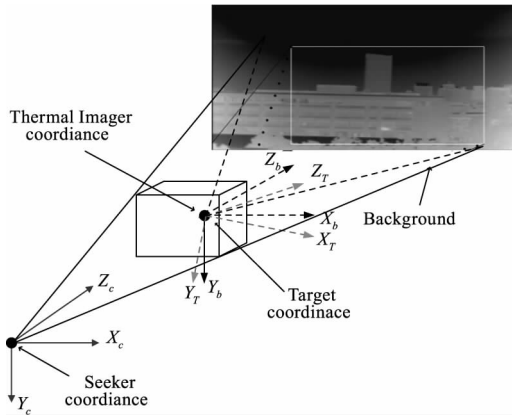


图 2 坐标系之间的关系

Fig. 2 The relation between coordinate systems

背景重投影模型的最终目的是在位于靶标后方的热像仪所拍摄的背景图像上定位被靶标遮挡的部分背景并与靶标上各辐射元相对应,模型的建立需用到摄像机模型以及坐标变换模型。

首先将靶标上各点坐标以导引头坐标系表示,并通过在导引头坐标系处建立虚拟摄像机,用摄像机模型求解出遮挡背景空间点与靶标上各点的空间映射关系,该过程可表示为:

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_3 & -t \\ 0_3^T & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, (X_b, Y_b, Z_b) 为靶标上的点在靶标坐标系下的坐标; (X_c, Y_c, Z_c) 为导引头在靶标坐标系下的坐标; $(X_e, Y_e, Z_e) = (X_b - X_c, Y_b - Y_c, Z_b - Z_c)$ 为导引头坐标系下各点坐标; $f = Z_e$; $0_3 = [0, 0, 0]^T$, $t = [X_e \ Y_e \ Z_e]^T$ 为平移量, I_3 为 3×3 的单位阵。然后利用上述过程的逆过程求得被遮挡背景点的坐标,如式(2)所示:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = z_c \begin{pmatrix} \frac{1}{f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{f} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $Z_c = Z - Z_e$ 为背景面与导引头之间的距离; Z

为靶标与背景间的距离; (x_c, y_c, z_c) 为遮挡背景点在导引头坐标系下的坐标。

接下来通过建立热像仪模型,将得到的遮挡背景空间点与热像仪拍摄的背景图像像素坐标联系起来,热像仪的成像模型可由式 3 表示^[6]:

$$Z_T \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_1 & t_1 \\ 0_3^T & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, (X_c, Y_c, Z_c) 为导引头坐标系下的坐标, (X_T, Y_T, Z_T) 为热像仪坐标系下的坐标; f_1 为热像仪焦距; dX 为热像仪像元在 X 方向的尺寸; dY 为热像仪像元在 Y 方向的尺寸, u_0, v_0 为图像平面中心对应的像素坐标, $\begin{pmatrix} R_1 & t_1 \\ 0_3^T & 1 \end{pmatrix}$ 为导引头坐标系转换到热像仪坐标系时的旋转和平移矩阵。

根据旋转矩阵的定义及运算法则^[7],热像仪相对于导引头坐标系的旋转矩阵可由式(4)表示:

$$R_1 = R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta & \cos\alpha & \sin\alpha\cos\beta \\ \cos\alpha\sin\beta & -\sin\alpha & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过对靶标上的点进行逐一求解,便可获取被靶标所遮挡住的背景,且与靶标各点一一对应,相关实验结果可参见作者发表的论文^[8],在此不再赘述。

2.2 热像仪温度反演模型

热像仪可将物体的红外辐射转化为红外图像进行显示,其中红外图像灰度与物体发射的红外辐射关系可由热像仪定标模型描述^[9-10]:

$$G = k_1 L(T) + C_1 \quad (5)$$

其中, G 为热像仪输出图像灰度值; $L(T)$ 为物体的入射辐射功率; T 为温度; k_1 为热像仪标定常数; C_1 为偏置项。由模型可知,在定标过程中,只需知道两对 (L, G) 值,便可确定此关系。

常用的定标方法是以标准辐射源为核心,通过

控制辐射源温度,产生不同功率的红外辐射,用热像仪接收标准辐射并转化为红外图像,再利用式 5 进行标定。

但是,由于标准辐射源是以温度为控制量,并不能直接获取入射辐射功率,所以还必须知道入射辐射功率与温度之间的关系。由普朗克公式可知,在某一波段范围内,红外辐射功率与温度的关系无法用精确的解析式描述,只能通过拟合的方式近似,根据文献[11],热像仪定标模型可表示为:

$$G = b_2 \left(\frac{c_2 T}{c_2 - \lambda T \ln \varepsilon} \right)^2 + b_1 \left(\frac{c_2 T}{c_2 - \lambda T \ln \varepsilon} \right) + b_0 \quad (6)$$

其中, b_0 、 b_1 、 b_2 为热像仪标定常数; c_2 为第二辐射常数; T 为温度; λ 为热像仪有效波长; ε 为物体发射率。由式 6 知,该定标模型中的 ε 误差将会影响温度反演精度,并且在实验中还发现,随着工作时间的增加,热像仪会产生温度漂移现象,极大的影响了温度反演精度。为此本文提出一种基于靶标辐射元的热像仪标定方法。

3 基于靶标辐射元的热像仪标定

如前文所述,若采用黑体定标,在计算靶标控制温度时还需进行发射率补偿,为消除发射率的影响,本文直接采用靶标辐射元进行标定。本文所采用的靶标辐射元结构如图 3 所示。

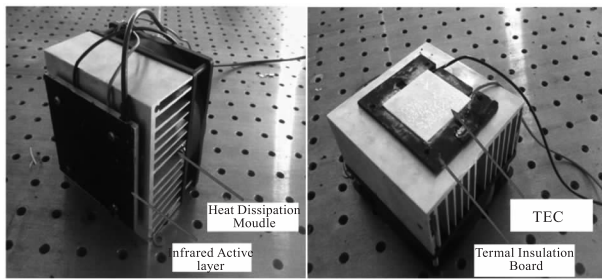


图 3 靶标辐射元结构图

Fig. 3 The structure diagram of the target radiation element

靶标辐射元作为靶标阵列的一部分,以半导体制冷器(TEC)为热源,外面加装金属变温层作为导热元件,在金属表面喷涂油漆作为红外发射材料,在 TEC 背面加装散热模块,增加 TEC 的变温效率。

以靶标辐射元为热源,对红外热像仪进行标定实验同时以黑体为热源重复进行实验,实验装置图如图 4 所示,标定曲线如图 5 所示。

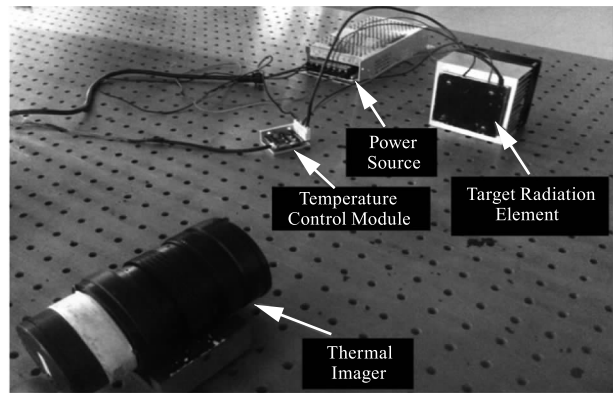
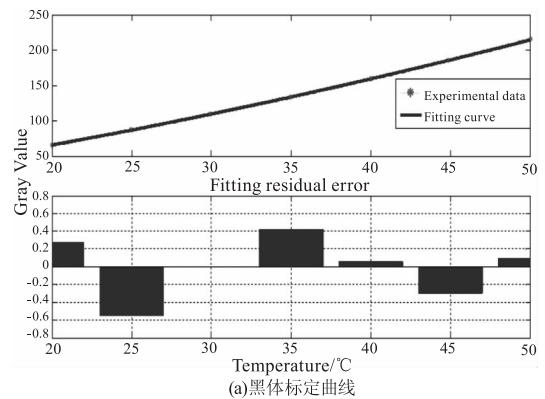
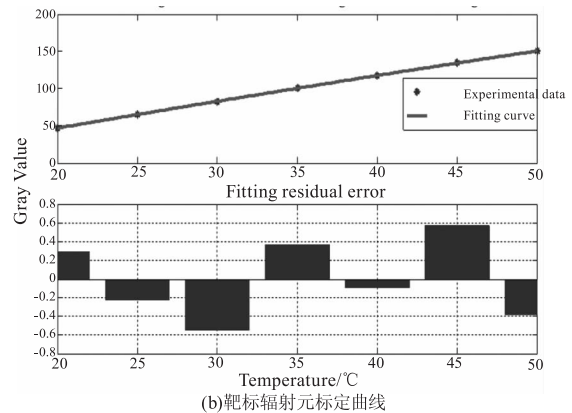


图 4 定标实验装置图

Fig. 4 The diagram of experimental device



(a)黑体标定曲线



(b)靶标辐射元标定曲线

图 5 热像仪标定曲线及残差图

Fig. 5 The diagram of the calibration curve and residual

通过将敏感单元标定曲线与黑体标定曲线对比发现,其规律与利用黑体作为定标源时完全一致,所不同的是曲线整体低于黑体定标曲线,这是由于发射率不同导致的,可见利用靶标敏感单元对热像仪进行标定是完全可行的。

4 基于敏感单元的漂移补偿算法

为找出热像仪灰度漂移规律,本文进行了三次连续的定标实验分析热像仪灰度漂移对定标曲线的影响,实验结果如图 6 所示。

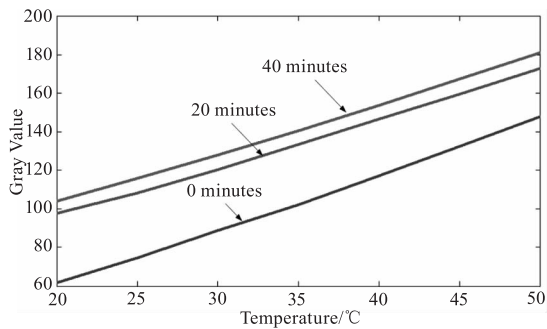


图 6 三次定标实验曲线

Fig. 6 The calibration curves of three experiments

从图中可以看到,三条曲线有着相似的规律,只是各自的起始点有差异。由此可以推断,热像仪的灰度漂移并不会对热像仪的增益造成影响。即热像仪工作温度所引起的灰度漂移是一个加性噪声。

热像仪输出图像灰度与温度之间的关系可由式(7)表示:

$$\begin{aligned} G &= \varepsilon [k_1(a_1 T^2 + a_2 T + a_3) + C_1] \\ &= b_1 T^2 + b_2 T + b_3 \end{aligned} \quad (7)$$

根据热像仪灰度漂移特点,可对上式进行修正,结果为:

$$G = b_1 T^2 + b_2 T + b_3 + G_s(T_s) \quad (8)$$

其中, T_s 为热像仪自身温度; $G_s(T_s)$ 为热像仪自身温度所带来的输出漂移。由式 8 可知,热像仪的漂移量仅与自身温度相关,而并不会对定标曲线的斜率造成影响。令热像仪定标时自身温度为 T_c , 当前温度为 T_n , 对于某一温度为 T_a 的目标来说, 在上面两个状态下的输出分别为:

$$\begin{cases} G_1 = b_1 T_a^2 + b_2 T_a + b_3 + G_c(T_c) \\ G_2 = b_1 T_a^2 + b_2 T_a + b_3 + G_n(T_n) \end{cases} \quad (9)$$

对于同一温度的目标来说,其热像仪响应部分是一致的,所不同的是由于热像仪温度不同而引起的那部分灰度漂移。将上两式进行差分消掉由目标本身辐射带来的响应,则可得到当前热像仪工作状态下的漂移量,如式(10)所示。

$$\Delta G = G_c(T_c) - G_n(T_n) \quad (10)$$

根据以上分析可知,在进行漂移补偿时,只需将定标源设定到固定温度下,在测量的间隙采集定标源的红外图像,将图像灰度与定标时的灰度作差分即可得到漂移量,在测量时减去该漂移量即可得到准确的反演温度。

为验证漂移补偿算法的有效性,采用课题组自

研的靶标敏感单元阵列为热像仪提供目标与背景,阵列结构如图 7 所示,将八块敏感单元固定于同一热沉上,由背面的温度控制系统为每个敏感单元提供驱动电流。



图 7 靶标敏感单元阵列实物图

Fig. 7 The structure diagram of target sensitive unit

实验以 3 号单元为温度反演目标,2、4、5、7 号单元作为背景,其中将 2 号和 4 号单元拆下作为自然背景,温度未知;5 号、7 号单元作为温度可控的背景。热像仪开机时首先进行温度标定,得到开机时刻的灰度-温度关系,将 3 号单元温度设置为 30 °C,记录此刻的灰度值,然后使热像仪保持开机状态 40 min 后,记录当前状态下 3 号单元灰度值,并与初始时刻灰度值差分得到漂移补偿量,然后将 5 号和 7 号背景设置为 19 °C,用以验证温度反演精度,最后通过反演 2 号和 4 号背景温度,控制 3 号单元温度与二者一致,并通过热像仪观察此时的红外图像。补偿前后的反演温度如表 1 所示。

表 1 温度反演结果

Tab. 2 The result of the temperature retrieval

	Gray value	Temperature before compensation/°C	Temperature after compensation/°C
Background No. 2 and No. 4	105	24.6	17.6
Background No. 5 and No. 7	110	26.5	19.5

按照表中温度调节 3 号单元温度,并用热像仪进行观察,其结果如图 8 所示,其中上图为补偿前的结果,下图为补偿后的结果。

由表 2 中的数据可知,在漂移补偿前后,反演温度的差别能够达到 7 °C,并且由 5 号和 7 号背景反演结果来看,经过漂移补偿后,反演温度误差降低到 0.5 °C。由图 8 可知,经过漂移补偿后,目标与背景之间的灰度差下降十分明显,说明本文提出的基于

靶标敏感单元的热像仪温度标定方法及漂移补偿算法是有效的。

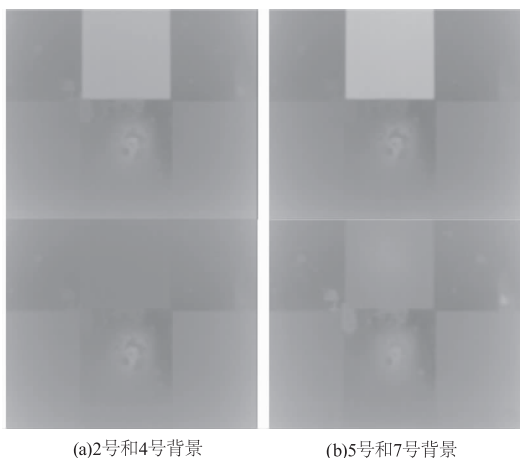


图 8 漂移补偿前后目标与背景的红外图像

Fig. 8 The infrared images of the target and background before and after drift compensation

5 结论

针对数字仿真法受精度的制约不能准确模拟各类干扰源的问题,提出了基于热电器件阵列的红外成像干扰模拟靶标生成方法。

本文以红外隐身干扰手段为研究对象,提出了以遮挡背景重投影模型和热像仪温度反演模型为核心的干扰模拟靶标生成方法。通过建立遮挡背景重投影模型,实现了干扰模拟靶标与遮挡背景各点之间的空间对应;提出了基于靶标敏感单元的热像仪温度标定方法及漂移补偿算法,解决了遮挡背景各点灰度到靶标单元控制温度之间的转换。为红外成像制导系统抗干扰性能测试靶标的生成奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] Zhao Chao, Yang Hao. A survey on development trends and key technologies of infrared guidance systems [J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(5): 48 - 53. (in Chinese)
赵超,杨号. 红外制导的发展趋势及其关键技术[J]. *电光与控制*, 2008, 15(5): 48 - 53.
- [2] Han Peijun, Jiang Changsheng, Xu Youping. Anti-jamming performance evaluation of infrared imaging guidance systems [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(5): 82 - 86. (in Chinese)
韩培俊,姜长生,许友平. 红外成像导引系统抗干扰性能评估研究[J]. *电光与控制*, 2012, 19(5): 82 - 86.
- [3] Rong Hua, Yang Meijian, Wu Xiuqin. A jamming technology of IR imaging guided weapons [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(supplement): 454 - 457. (in Chinese)
戎华,杨美健,吴秀琴. 用于干扰红外成像制导武器相关技术探讨[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(增刊): 454 - 457.
- [4] Liu Dongqing, Cheng Haifeng, et al. Application of variable infrared-emissivity materials to spacecraft thermal control [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(2): 145 - 149. (in Chinese)
刘东青,程海峰,等. 红外发射率可变材料在航天器热控技术中的应用[J]. *国防科技大学学报*, 2012, 34(2): 145 - 149.
- [5] Li Peiqing, Tian Ying, Cao Jiafeng, et al. Research progress of adaptive infrared stealth technology [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(10): 5 - 12. (in Chinese)
李佩青,田英,曹嘉峰,等. 自适应红外隐身技术研究进展[J]. *传感器与微系统*, 2013, 32(10): 5 - 12.
- [6] He Yuanjun. Perspective and its projection transformation [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(4): 734 - 739. (in Chinese)
何援军. 透视和透视投影变换—论图形变换和投影的若干问题之三 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(4): 734 - 739.
- [7] Yu Changan. Study on position and attitude tracking technology of single camera vision based on cooperate aim [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
于长安. 基于合作目标的单目视觉位姿跟踪技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [8] Zhang Dongxiao, He Yongqiang, Hu Wengang, et al. Background projection modeling in the self-adaptive infrared stealth system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0304001 - 1 - 7. (in Chinese)
张冬晓,何永强,胡文刚,等. 自适应红外隐身系统的背景投影建模 [J], *红外与激光工程*, 2016, 45(3): 0304001 - 1 - 7.
- [9] Kruse P W. Uncooled IR focal plane arrays [J]. *proceeding of SPIE - the International Society for Optical Engineering*, 1995, 2552(27): 556 - 563.
- [10] Kruse P W, Skadrud D D. Uncooled infrared imaging arrays and system [J]. *Semiconductor and Semimetal*, 1997, 47(1): 12 - 14.
- [11] Zhang Dongxiao. Research on the matching technology of object and background in adaptive infrared stealth [D]. Nanjing: Ordnance Engineering College, 2015. (in Chinese)
张冬晓. 自适应红外隐身中目标与背景匹配技术研究 [D]. 南京: 军械工程学院, 2015.