

半实物仿真中红外干扰机的模拟设计

田晓飞, 马丽华, 洪 华, 李冯敬
(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:介绍了不同类型的红外干扰机,分析了其干扰机理,提出了模拟逼真度原则,在此基础上研究了红外干扰机的模拟方式,设计了干扰模拟发射器和干扰注入方案,最后进行了干扰模拟发射器的仿真分析。

关键词:红外干扰机;逼真度;模拟

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.10.013

Ddesign of infrared jammer in hardware-in-the-loop simulation

TIAN Xiao-fei, MA Li-hua, HONG Hua, LI Feng-jing
(Telecommunication Engineering Institute, AFEU, Xi' an 710077, China)

Abstract:The paper introduces different kinds of IR jammer, analyzes their jamming mechanisms and put forward the fidelity principle of simulation. On the basis of that, the simulation mode of IR jammer is studied and the schemes of jamming simulation emitter and jamming firing pattern are designed. At last, the paper makes an analysis based on the simulation system of jamming emitter.

Key words:IR jammer; fidelity; simulation

1 引言

半实物仿真在武器装备的研制开发、效能评估以及性能改进中发挥着重大作用,能为地空、空空红外制导导弹提供重要的实验数据。红外目标模拟器作为红外制导半实物仿真的关键设备,需要在实验室内为红外制导导引头提供与实战过程相似的红外目标环境,因此直接决定着半实物仿真的效果。

直升机和大型飞机由于飞行高度低、速度慢、机动性较差,容易受到红外制导导弹的攻击。为了提高战场生存能力,武装直升机和军用大型飞机都积极装备一体化红外对抗系统,其中红外干扰机得到了十分广泛的应用。为了在半实物仿真中更好地检验和评估红外制导导弹攻击这些目标时的性能,本文进行了红外干扰机的模拟设计研究。

2 红外干扰机分类

传统的红外干扰机是全向辐射红外干扰机,现在已逐渐向定向红外干扰机和大功率红外干扰机方向发展。

2.1 全向辐射红外干扰机

传统的红外干扰机是一种红外有源欺骗干扰设备,对抗对象主要是红外点源制导武器,广泛应用于作战飞机平台自卫。它根据红外点源制导武器的导引体制,全向发射经过调制编码的红外干扰信号,扰乱红外导引头的正常工作,使来袭导弹产生虚假跟踪信号,偏离目标而脱靶。

2.2 定向红外干扰机

为了提高干扰效率和增加干扰距离,定向红外干扰机将红外干扰能量集中到狭窄的波束中,当侦察告警系统侦察到来袭目标后,就将红外干扰波束引导到来袭导弹的红外导引头上,进行集中干扰,使其工作混乱而脱靶^[1],干扰示意图如图1所示。目前西方军事发达国家正在迅速发展和装备定向红外对抗系统。

作者简介:田晓飞(1987-),男,硕士研究生,研究方向光电对抗及红外制导半实物仿真。E-mail:tianxiaofei2011@163.com
收稿日期:2011-03-21;修订日期:2011-05-09

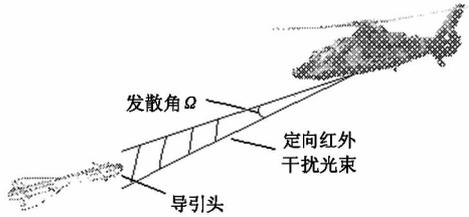


图1 定向红外干扰机干扰示意图

2.3 大功率红外干扰机

大功率红外干扰机利用高强度红外激光束直接损伤红外导引头,从而一举消除威胁,是红外对抗的发展方向。相比定向红外干扰机,它采用更高功率的红外激光辐射源,光束发散角更小,能量更集中,能对各种光电导引头进行压制干扰,其关键问题是大功率红外激光器的研制。

3 红外干扰机模拟逼真度原则

为了更有效地检验红外制导系统、分系统和红外导引头的抗干扰作战性能,要求红外制导半实物仿真必须提供一个逼近实战的红外干扰环境。本文以实战中应用的红外干扰机为模拟对象,提出了红外干扰机模拟逼真度概念以及逼真度最大化原则,以此来引导红外干扰机模拟的设计与评估。

模拟逼真度定义^[2]:模拟设备对模拟对象某个侧面或者整体的外部形态和行为的复现程度。红外干扰机模拟逼真度主要受模拟器性能、模拟器干扰作战设置、目标干扰相互关系以及导弹干扰相互关系这些分项目的影 响,同时这些分项目包含的指标又跟具体的模拟对象有密切关系,下面给出红外干扰机模拟逼真度的层次划分图,如图2所示。

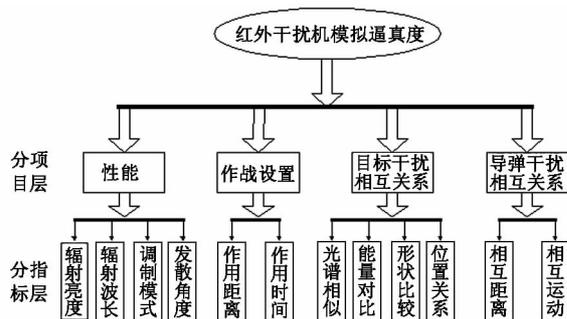


图2 红外干扰机模拟逼真度的层次划分图

分项目层,根据红外干扰机模拟逼真度的影响因素,总结出模拟分项目,设分项目集合为 $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$,则红外干扰机模拟逼真度为:

$$F(S) = \sum_{i=1}^4 \alpha_i F(S_i) \quad (1)$$

式中, α_i 为分项目的加权值。

分指标层,根据各个分项目细分对应的模拟指标,设第*i*分项目对应的分指标集合为 $\{I_1, \dots, I_{n_i}\}$,则分项目逼真度为:

$$F(S_i) = \sum_{j=1}^{n_i} \beta_j F(I_j) \quad (2)$$

式中, β_j 为分指标的加权值。

因此,红外干扰机模拟的整体逼真度为:

$$F(S) = \sum_{i=1}^4 \alpha_i \sum_{j=1}^{n_i} \beta_j F(I_j) \quad (3)$$

逼真度值的计算过程中要注意:半实物仿真的很多指标是通过“相对等效”原理^[3]来达到与实战环境逼真的,因此逼真度指标的值也必须经过“相对等效”原理转化之后才能得到。

模拟逼真度最大化原则:逼真度越高的模拟,置信度越高,试验结果越可靠。

因此,在红外干扰机模拟的设计过程中就要选择有利的技术和方案,使上述红外干扰机模拟整体逼真度 $F(S)$ 最大化,从而更有效地检验红外制导系统、分系统和红外导引头的抗干扰作战性能。此外,还能利用上述逼真度模型进行红外干扰机模拟器评估。

4 红外干扰机模拟

4.1 干扰机理分析

4.1.1 全向干扰机理

对于带有调制盘的红外导引头,红外目标通过光学系统会在其焦平面上形成一“热点”,调制盘和“热点”作相对运动使热点被扫描调制,目标视线与光轴的偏角信息就包含在调制后的红外辐射信号中,如图3所示为典型的调制盘。当红外干扰机介入后,其干扰信号也聚集在目标“热点”附近,并随目标“热点”一起被调制,同时被探测器接收形成电信号,然后经过信号处理后得出目标视线与寻的器光轴线的夹角偏差或该偏差的角速度变化量,作为制导修正依据。

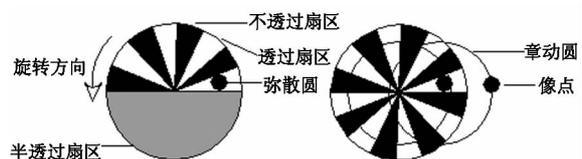


图3 典型调制盘

只要干扰机调制频率和辐射功率控制合理,就可以使夹角偏差信号产生错误,致使舵机偏转错乱,从而达到干扰的目的^[4]。

4.1.2 定向干扰机理

在定向红外干扰机辐射端,假设红外辐射源为朗伯辐射源,辐射亮度为 L ,且在发射孔径表面均匀,则发射孔径总的辐射功率为:

$$P = \pi L S \sin^2 \frac{\sigma}{2} \quad (4)$$

其中,辐射亮度 L 主要与红外辐射光源的物理特性有关,发射孔径的面积 S 与反射器的设计结构有关,立体发散角 Ω 在垂直平面内的投影角 σ 与光源以及光学发射系统有关。

定向红外干扰光束投射过程如图4所示,假设在导引头投影平面上红外照射均匀,则导引头投影面的平均辐射照度为:

$$E = \frac{\cos \theta' \alpha P}{\pi \left(r + l \tan \frac{\sigma}{2} \right)^2} \quad (5)$$

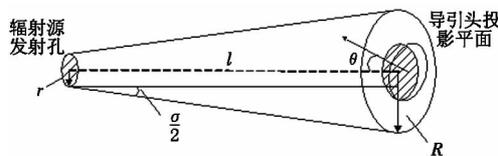


图4 定向红外干扰机投射原理

以正在使用的非相干光源氙弧光灯为例,其直径5~8 cm,束宽5°,如果是相干红外激光源,其发射孔半径 r 、发散角 Ω 就会更小,因此将式(3)代入并简化上式得:

$$E \approx \frac{L S \alpha \cos \theta' (1 + \cos \sigma)}{2 l^2} \quad (6)$$

其中, α 为大气传输系数。

到达导引头上的红外辐射照度直接反映导引头接受到的能量密度,决定定向红外干扰机对红外导引头的干扰、破坏效果。因此必须提高导引头上的红外辐射照度,从而要求对式(6)中相关影响因素进行合理控制。此外,要达到最佳的干扰对抗效果,还要求:

(1) 定向红外干扰机与红外导引头模式要匹配,辐射波长要处于红外导引头的工作波段内;

(2) 采用合适的调制编码;

(3) 干扰距离要适当、时间要充分。

4.2 干扰源模拟分析

在实战应用中,红外干扰机与被保护平台是一体的,并且由上述干扰机理分析可知:在导引头探测端,红外干扰信号聚集在目标“热点”附近,即二者在红外导引头上的热成像位置一致。因此,根

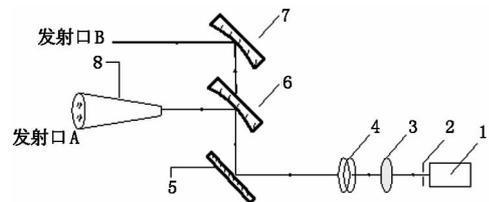
据模拟逼真度原则,红外干扰机模拟产生的红外辐射应该与被保护目标模拟产生的红外辐射融为一体。

全向干扰时,为了达到有效干扰,红外干扰与目标的能量比要达到1.5~5倍,干扰机输出的红外辐射载频和调制频率要与导引头调制系统的载频和调制频率相适应;定向干扰时,要求在很小的发散角内,发射高能量的红外辐射,去扰乱导引头工作,从而达到干扰目的。因此,红外干扰机的模拟要求与红外点源目标以及红外成像目标的模拟要求是不同的,必须设计独立的红外干扰发射器,进行干扰指标的有效控制。

综上所述,红外干扰机模拟中需要设计单独的红外干扰模拟发射器,然后把发射出的红外干扰信号有效地注入到红外点源目标模拟器或者红外成像目标模拟器中,实现红外干扰辐射与目标辐射融为一体。

4.3 干扰机模拟发射器设计

红外干扰辐射源是红外干扰机最重要的组成部分,因此全向红外干扰和定向红外干扰的区别也主要表现在所使用红外光源的不同上。全向干扰的红外光源一般为加热辐射源,采用机械调制,到达红外导引头的辐射能量小,发散角度大;定向干扰的红外光源包括弧光灯和激光器,采用光源内部调制,到达红外导引头的辐射能量大,发散角度小。为了模拟不同模式红外干扰机对红外制导导弹的干扰,文中设计了一种通用的红外干扰发射器方案,如图5所示。



1 - 多波段红外激光器;2 - 光阑;3 - 可调滤光片;4 - 衰减片组;5 - 反射镜;6 - 可调抛物镜位置I;7 - 可调抛物镜位置II;8 - 扩束系统

图5 红外干扰模拟发射器光学系统原理图

设计原理:由多波段红外激光源发出不同波段的经过调制编码的红外辐射,经过光阑实现光斑大小控制,然后通过滤光片选择透过红外波段,再经过衰减片组实现能量控制,之后经过反射镜进入位置可供选择的抛物镜系统,当光路经过可调抛物镜位置I时,继续通过组合扩束系统实现光束发散,模拟全向红外干扰;光路经过可调抛物镜位置II时,直接

输出平行红外光束,模拟定向红外干扰。

指标要求:

(1)多波段红外光源^[5]要求产生 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的红外辐射,并且采用预设的干扰代码进行光源内部调制编码,来对抗不同工作波段的红外导引头;

(2)可调光阑能够在有限的红外光束内微调光斑大小,实现光斑大小随距离变化的控制;

(3)可调滤光片根据需要设置 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 两个透过波段;

(4)衰减片组根据光源、传输衰减以及导引头上的照射强度进行能量控制;

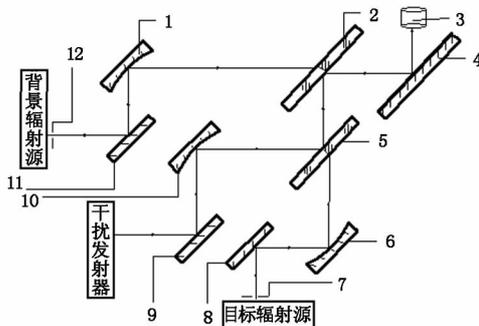
(5)可调抛物镜根据需要使用需要选择 I 或 II 位置,实现全向或定向干扰模拟;

(6)扩束系统要组合设置恰当,达到全向干扰时有效发散光束的目的。

4.4 干扰注入设计

4.4.1 红外点源目标模拟器注入方案

为了在已有的红外点源目标模拟器系统^[6]中实现红外干扰机模拟辐射和目标模拟辐射融为一体,本文设计了干扰注入方案,如图6所示。



1-抛物面镜1;2-合成镜1;3-红外导引头;4-二维反射镜;5-合成镜2;6-抛物面镜2;7-光阑1;8-反射镜1;9-反射镜2;10-抛物面镜3;11-反射镜3;12-光阑2

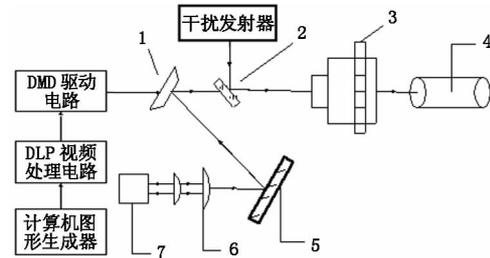
图6 红外点源目标模拟器的干扰注入原理图

干扰注入的原理:干扰发射器发出的红外干扰辐射,经由反射镜2和抛物面镜3注入到合成镜2,与经由光阑1、反射镜1和抛物面镜2到达合成镜2的红外目标辐射进行合成,保证目标、干扰辐射融为一体,然后合成的目标、干扰辐射与背景辐射在合成镜1上再次合成,最后经由二维反射镜投射给导引头。

关键问题是控制合成镜2的受光面积、放置角度以及反射透射比,实现干扰、目标辐射既融为一体,又能有效控制二者的辐射能量比。

4.4.2 红外成像目标背景模拟器注入方案

红外景象生成技术是目前广泛采用的红外目标背景模拟手段,能够为红外成像导引头提供有效的红外场景模拟。本文在基于DMD的微光阵列投影系统(MAPS)^[7]的基础上,设计的干扰注入方案,如图7所示。



1-DMD;2-可调半透半反射镜;3-准直光学系统;4-导引头;5-反射镜;6-中继光学系统;7-黑体辐射源

图7 红外景象生成目标模拟器的干扰注入原理图

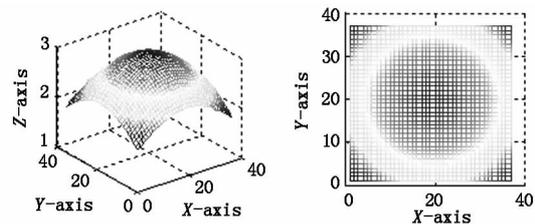
干扰注入原理:根据计算机生成红外目标背景图像信息,获得红外目标的大小以及在整幅红外图像中的位置,然后再依据DMD器件的发射面积,以及DMD投射向准直光学系统的光束范围,控制半透半反射镜的位置和大小,实现半透半反射镜有效透射模拟目标的红外辐射;干扰发射器发出的红外干扰投射半透半反射镜上,实现红外干扰与景象生成目标的融合,然后经过准直光学系统投射给红外导引头。

关键问题就是通过计算机获取图形信息、DMD面积信息以及DMD投射光束范围,实现半透半反射镜位置的有效控制以及大小的选择。

4.5 仿真分析

首先对红外干扰模拟发射器各模块进行建模组成仿真系统,然后给系统注入模拟的激光源辐射进行仿真分析。

以 z 轴的幅度表示激光点的场分布大小,以 x,y 轴平面的范围为光斑区域,则激光源输入的辐射光斑为能量高斯分布的圆,如图8所示。



(a)光源输出的光斑幅度 (b)光源输出的光斑形状

图8 输入激光光斑

经过红外干扰模拟发射器的光阑、衰减片组以及

扩散系统的处理,输出的激光光斑分别如图9所示。

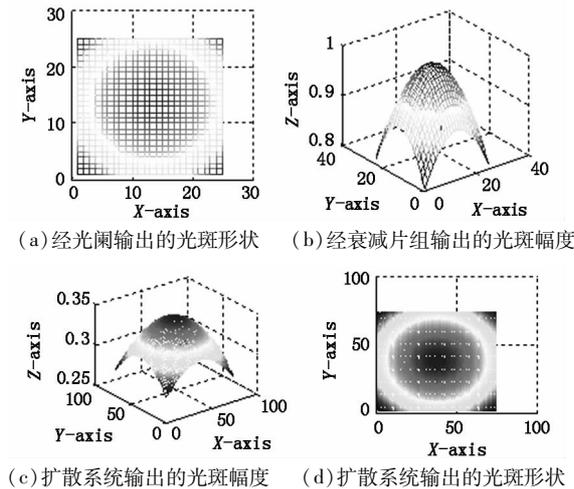


图9 光阑、衰减和扩散系统模块处理结果

分析上述光斑图像可知:通过对红外干扰模拟发射器各模块的合理设置,可以实现激光辐射能量、形状以及发散度的有效控制,从而满足全向和定向两种干扰模式的辐射源要求,进而注入到红外目标背景模拟器中与红外目标融合,实现干扰机对抗环境的逼真模拟。

5 结束语

随着定向红外干扰系统(DIRCM)的迅速发展,很有必要加强红外干扰机模拟技术的研究,以便在红外制导半实物仿真中更好地检验和提高红外制导导弹对抗DIRCM的作战性能。本文通过在已有的红外目标背景模拟器中加入独立的红外干扰机模拟发射器,实现红外干扰机对抗环境的逼真模拟,是红外干扰机模拟方式的一种探索尝试,但同时还存在红外干扰的能量设置^[8]以及闭环模式控制等具体工作需要开展。

参考文献:

- [1] Fu Wei. Technique and present state of cdircm[J]. *Leser & Infrared*, 2001, 31(5): 259 - 261. (in Chinese)
- [2] Hua Anxiang. Advanced emulation technology and engineering design of modern battleplans [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006. (in Chinese)
黄安祥. 现代军机先进仿真技术与工程设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] Liu Xingtang. Precision guide & control and simulation technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006. (in Chinese)
刘兴堂. 精确制导、控制与仿真技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [4] Wu Dan, Ma Chaojie. Jamming theory and technology of IR jammer [J]. *Shipboard Electr Nic Counter-Measure*, 2006, (3): 6 - 9. (in Chinese)
吴丹, 马超杰. 红外干扰机干扰原理及相关技术[J]. *舰船电子对抗*, 2006, (3): 6 - 9.
- [5] Victor Karaganov, Margaret Law, Mick Kaesle. Engineering development of a directed IR countermeasure laser [J]. *SPIE*, 2004, 5615: 48 - 53.
- [6] Ma Lihua, Qiao Weidong, Zhao Shanghong. Infrared seeker hardware-in-the-loop simulation and target simulator [J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(6): 42 - 44. (in Chinese)
马丽华, 乔卫东, 赵尚弘. 红外制导半实物仿真及目标模拟器研究[J]. *计算机仿真*, 2007, 24(6): 42 - 44.
- [7] Shan Jiayuan, Meng Xiuyun, Ding Yan. Hardware-in-the-loop simulation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008. (in Chinese)
单家元, 孟秀云, 丁艳. 半实物仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [8] Chai Dong, Tong ZHongxiang, Lu Yanlong. Simulation and technique of airborne directional laser IR countermeasure system [J]. *Leser & Infrared*, 2010, 40(9): 981 - 984. (in Chinese)
柴栋, 童中翔, 芦艳龙. 机载定向激光红外对抗技术及仿真研究[J]. *激光与红外*, 2010, 40(9): 981 - 984.