

机载定向激光红外对抗技术及仿真研究

柴 栋,童中翔,芦艳龙,王超哲
(空军工程大学工程学院,陕西 西安 710038)

摘 要:随着红外制导导弹制导与抗干扰能力的不断提高,常规的被动红外干扰载荷的干扰效能逐渐降低。为了减弱敌方红外制导导弹的攻击效果,机载定向激光红外对抗武器系统化被动防御为主动进攻,以其独特的性能成为对抗红外制导导弹的理想武器。设计了激光定向红外对抗系统总体框架,分析了该系统各部件的功能及技术途径,建立了数据流程。通过仿真计算,得出结合载机机动,干扰效果更佳。

关键词:激光;定向红外;红外对抗;干扰

中图分类号:TN976 **文献标识码:**A

Simulation and technique of airborne directional laser IR countermeasure system

CHAI Dong, TONG Zhong-xiang, LU Yan-long, WANG Chao-zhe
(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The infrared guided missile's anti-jamming ability is becoming incessantly stronger, the interference effect of routine passive IR decoy is gradually decreased. To deal with the IR guided missile and reduce its attack effect, the countermeasure tactics are changing from passive defense to active attack with airborne directional laser IR countermeasure system (ADLIRCMS). Lots of studies show that ADLIRCMS is an ideal weapon against IR guided missile with unique performance. ADLIRCMS's general scheme is presented in the paper. Function and performance of each part are analyzed. Data process and transfer are introduced. The analysis and simulation show that the jamming effect of the system is excellent, especially when the host plane is maneuvering.

Key words: laser; directional IR; IR countermeasure; interference

1 引 言

定向红外对抗技术是20世纪90年代由美国率先发展起来的一种新型红外对抗技术。定向红外对抗系统红外干扰源可以采用常规的红外光源,也可以采用激光。最重要的要求是干扰能量要足够大,以便使聚焦在红外导引头探测器上的能量尽可能高,还要求干扰光源的效率高、体积小、质量轻、寿命长、发射波长与导弹的工作波长匹配。相干的定向激光干扰光源能很好地满足上述要求。因此,以激光作为定向红外干扰源是必然趋势。本文提出激光定向红外对抗系统的总体框架,并对系统的关键技术进行了分析。

2 定向激光红外干扰机理

定向激光红外干扰技术是指将红外干扰能量集中到狭窄的光束中,当红外制导导弹逼近时将光束指向来袭导弹方向,通过红外干扰能量(强激光束)照射来袭导弹的导引系统^[1-2]。红外制导导弹的探测器的灵敏度高,又工作在一个高度会聚的光学系统和较高放大倍率的电路系统之中,所以很易遭受红外干扰能量(强激光)的饱和、致盲和摧毁或

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60772162)资助。

作者简介:柴 栋(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为飞行器设计与红外对抗。

收稿日期:2010-03-30;**修订日期:**2010-06-23

破坏。探测器的激光损伤阈值要比导弹、飞机外壳材料的激光损伤阈值低几个数量级。利用中功率或高功率激光直接致盲,可使光电探测器饱和、迷茫或损伤。即使不是完全损伤红外探测器,也能使其工作性能有所下降,如使其工作距离降低、目标识别能力变差,或者暂时失效。

3 定向红外干扰系统组成

机载定向激光红外对抗系统由复合全向导弹告警系统、数据融合处理系统、综合控制系统、瞄准跟踪系统(激光瞄准跟踪器、激光目标指示器、激光信号处理器、自适应补偿器)和激光干扰系统(激光发射器)组成,如图1所示。

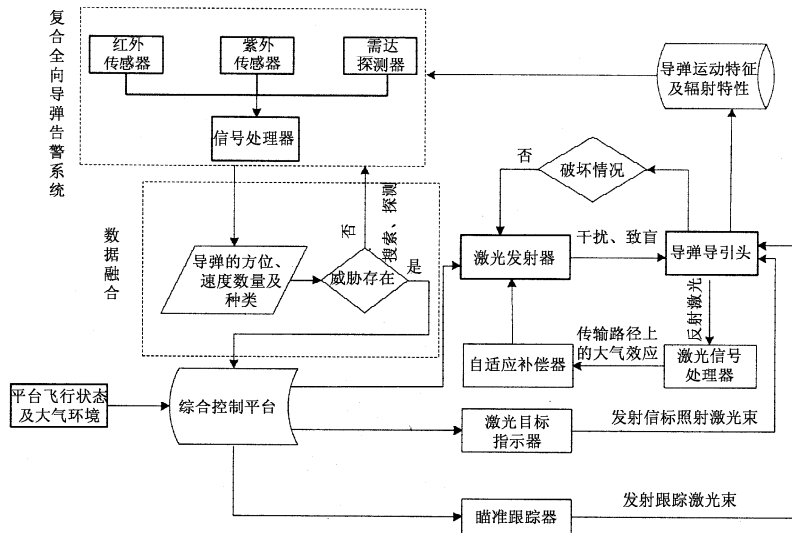


图1 机载定向激光红外对抗系统数据流程图

Fig. 1 data transfer process of ADLIRCMS

(1) 全向复合导弹告警系统

全向复合导弹告警系统用来搜索、发现来袭导弹,ADLIRCMS进入粗跟踪阶段。告警系统采用复合光电侦查告警技术。复合告警技术是根据战术需求对红外、紫外等不同波段的光电威胁信息进行复合探测、综合处理,在传感器结构上有机结合,在数据上有效融合,并充分利用信息资源,实现优化配置,功能相互支援及任务综合分配^[3]。

复合告警系统包括探测单元和信息融合处理单元,负责对威胁探测识别,当有来袭导弹时及时发出警报,并提供威胁的方位、速度等信息。探测单元包括数个探测器,组合起来以构成大方位角和大空域的覆盖探测。探测器探测到的信号经光电转换后送至信息处理单元。

(2) 数据融合处理系统

经信号处理单元预处理的信号,送入计算机依据目标特征及预定算法对输入信号做出统计判决即数据融合处理,确定有无威胁源,若有,则解算其角方位、速度数量、种类,若有多个威胁源,进行威胁程度排序,确定出最大威胁源;若无,指示告警系统继续搜索、探测。

(3) 综合控制系统

由数据融合系统传来的数据结合平台大气数据计算机获得的大气环境参数以及平台飞行状态,综合决策,对精密瞄准/跟踪系统和激光干扰系统进行控制。

(4) 精密瞄准/跟踪系统

综合控制系统接收到告警系统传来的告警信号后,将工作指令和相关数据传送给瞄准/跟踪系统,系统进入精跟踪阶段。瞄准/跟踪系统用于提供精确的瞄准点,缩小激光束的光斑大小,使发射望远镜能始终瞄准/跟踪导弹的导引头。跟踪精度通常优于 $10\ \mu\text{rad}$ ^[4]。

精密瞄准/跟踪系统采用闭环技术,通过分析反射激光对发射系统进行光学补偿。其工作原理是:激光器发射激光束照射来袭导弹导引头,激光信号处理器接收反射回来的激光,并进行分析得出传输路径上的大气效应,通过自适应补偿系统对激光发射器进行调制。同时,系统必须对飞机的各种运动进行补偿,包括相对于地面的整体运动、慢速摇摆、快速振动及由气流和湍流所引起的颠簸。

(5) 激光干扰系统

激光干扰系统是 ADLIRCMS 的核心,是产生破坏作用的关键部分。激光干扰系统由调 Q 激光器、发射望远镜和自适应光学系统组成,其中核心是激光器。综合控制系统实时将瞄准/跟踪系统得到的导弹导引头的精确位置传给激光干扰系统,激光干扰系统通过分析反射回波对激光波段进行调制,调制后的激光被自适应光学系统补偿后辐照在导弹导引头上一定时间,实现对导弹导引头的干扰。一般来说,固体激光器体积小,使用电力作为动力源,战斗机的发动机除产生推力外,还可提供强大电力,因此非常适合战斗机装载。

4 定向激光红外对抗过程建模

ADLIRCMS 对来袭导弹的作用过程:当复合全导弹告警系统锁定来袭导弹,激光束以光速或接近光速射向目标,且控制射束可快速改变攻击方向,反应灵活。一旦准确瞄准、跟踪目标,其作用过程主要是激光对被照射目标材料的光学作用和大气对激光束的衰减作用。

4.1 激光对目标的作用机理

(1) 激光破坏阈值与材料性能关系

激光辐照固体材料时,通过激光能量的吸收和热扩散,引起材料边界和内部的热流运动,使得各处的温度不同程度地上升。激光加载条件、材料形状、初始和边界条件以及材料的热物理性质决定了材料温度场的时空变化。激光照射下材料吸收能量密度为^[5]:

$$\Delta Q(x) = E_s(t)(1-R)(1-e^{-\alpha x}) \quad (1)$$

式中, $E_s(t)$ 是入射激光能量密度; R 是材料表面反射率; α 为吸收系数; x 是深度。设 c_p 为材料的比定压热容, ρ 为材料的密度,则吸收激光引起的表面层温升为:

$$\Delta T \approx \frac{\Delta Q(x)}{\rho c_p x} \quad (2)$$

ΔT 为温度增加量,即激光照射产生损伤时损伤处的温度和初始工作温度之差。当材料的表面温度达到材料的极限温度,则发生损伤,这个极限温度可能是材料的熔点,也可能是热应力损伤温度。此外,当光电探测器受到强度不十分高的激光照射时,温升很高但介质没有融化,晶格整体结构未遭破坏,但可能在某些局部或整体晶体中产生了微小的结构性改变,使探测器性能变坏并且不可逆转。

(2) 辐照时间对探测器阈值的影响

辐照时间对探测器材料的热破坏激光强度阈值有影响,在激光器功率密度一定的条件下,能量积累与激光束在目标上的驻留时间有关。国外对材料的激光破坏做了大量的工作。Bartoli、Kruer 等工作比较深入,给出了某几个波段处几种探测器材料热破坏的激光强度阈值与辐照时间的关系曲线^[6-7],如图2所示。由图2可知,探测器材料热破坏的激光强度阈值随辐照时间有递减的趋势。激光波长:曲线1,2,3,4,7为 $10.6 \mu\text{m}$;5为 $5.2 \mu\text{m}$;6为 $1.06 \mu\text{m}$ 。

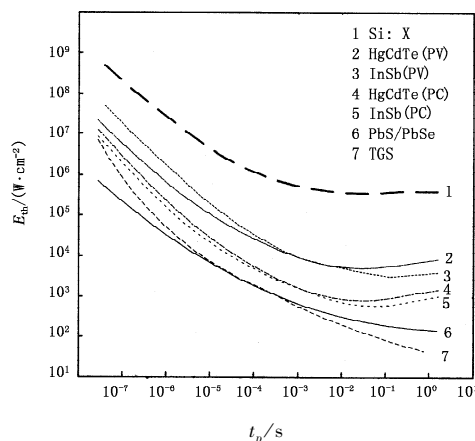


图2 激光破坏红外探测器材料的实验阈值 E_{th} 与辐照时间 t_p 的关系曲线

Fig2 laser breakage threshold of IR detector material vs irradiation time

4.2 激光传输衰减

激光在大气中的传输过程中受到大气分子吸收作用以及气溶胶的散射,同时,还受大气湍流的影响。因此,大气的透射率为^[6]:

$$\tau_1(\lambda) = \tau_a(\lambda)\tau_y(\lambda) \quad (3)$$

式中, $\tau_a(\lambda)$ 为大气吸收所产生的透射率; $\tau_y(\lambda)$ 为大气散射所产生的透射率。

激光在大气中的传输除受吸收、散射、折射作用同时还受到光学元件的吸收、折射作用,因此投射到光学探测器上的激光功率为:

$$P = \frac{4P_1\tau_1\tau_2A_c}{\pi\theta^2r^2} \quad (4)$$

式中, P_1 为发射激光功率,单位 W; θ 为激光发散角,单位 rad; τ_1 为大气传输衰减系数; τ_2 为光学系统透过率; A_c 为目标的有效集光面积,单位 m^2 ; r 为激光源到目标距离,单位 m。而 $E_s(t)$ 为光学探测器上的入射激光能量密度,单位 J/cm^2 。

$$E_s(t) = P \times t / (10^4 \times A_c) \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可知,致使探测器失效所需发射激光功率:

$$P_1 = \frac{E_s(t) \pi \theta^2 r^2 \times 10^4}{4 \tau_1 \tau_2 \times t} \quad (6)$$

4.3 运动平台建模

目标机和导弹的运动模型要对空气动力特性进行仿真,解算六自由度非线性全量运动方程,并且进行大气环境对飞行影响的模拟。关键是模拟导弹的导引工作过程,通过激光实时照射导引头,造成导引头制导精度的降低,通过计算导弹爆炸时导弹与目标机的距离得到脱靶量。

5 仿真实验

设定大气条件相同的情况下,大气紊流强度 6 m/s,大气紊流尺度 533.4 m,取激光发散角 $\theta = 0.1$ mrad,大气透过率 $\tau_1 = 0.8$,光学系统透过率 $\tau_2 = 0.7$,目标的有效集光面积 $A_e = 10$ cm²,激光源到目标距离 $r = 1000$ m,激光波长 $\lambda = 10.6$ μ m,作用时间 $t = 1$ s,能量密度 $E_s(t) = 138.2$ J/cm²,发射功率 $P_1 = 1.94 \times 10^3$ kW。

以某型导弹为例,进行数字仿真。配合载机机动规避战术对抗来袭导弹,即载机通过复合全向导弹告警系统检测到导弹威胁及来袭导弹的运动状态参数,应迅速做相应的机动,使得载机速度方向与导弹速度方向相同,综合控制平台控制瞄准跟踪器发射跟踪激光束跟踪来袭导弹导引头并使激光目标指示器发射信标照射激光束,通过对导引头反射激光信号进行处理,得到传输路径上大气效应,由自适应补偿器对激光器发射光束进行补偿、校正,照射来袭导弹导引头。在初始条件相同的情况下,多次仿真得出导弹脱靶量如图3所示。

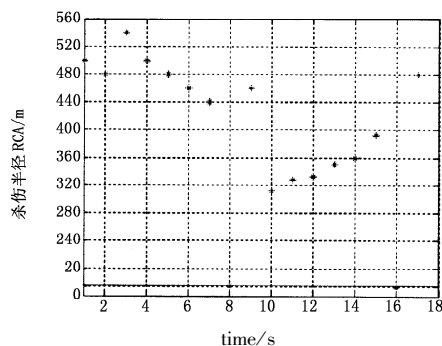


图3 仿真导弹脱靶量分布图

Fig.3 undershoot value distribution

6 结论

由仿真实验得出的导弹脱靶量可以看出,定向红外干扰战术融合方法与通常的干扰方法相比,使定向红外干扰系统的干扰效能大大提高,并且降低了激光发射功率。因此,该定向激光红外干扰战术融合方法有效。

参考文献:

- [1] 付伟. 定向红外对抗技术发展综述[J]. 飞航导弹, 2002, (9): 41-43.
- [2] 黄庆, 车宏, 陈洪亮, 等. 定向红外对抗系统构型设计[J]. 红外与激光工程, 2008, (9): 319-321.
- [3] 王江安, 宗思光, 赵坤. 海空背景下红外-紫外双色探测技术研究[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(3): 56-59.
- [4] 王永仲. 现代军用光学技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] 胡永钊, 赵铭军, 沈严, 等. 激光技术在主动红外对抗中的应用研究[J]. 激光与红外, 2004, 34(2): 62-64.
- [6] 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [7] 张红, 薛建国, 成斌, 等. 10.6 μ m CO₂ 激光对 HgCdTe 探测器破坏阈值的实验研究[J]. 光电工程, 2006, (5): 41-44.