

# 激光对天基红外系统预警卫星光电探测器的干扰效能研究

高桂清<sup>1</sup>, 向进<sup>1</sup>, 李勇翔<sup>1</sup>, 周勇<sup>2</sup>

(1. 第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025; 2. 青州士官学院, 山东 青州 262500)

**摘要:**从分析预警卫星光电探测系统入手,在介绍了激光干扰光电探测器机理的基础上,研究了激光在大气传输中的衰减效应及远场激光光斑尺寸估算,建立了激光辐照星载光电探测器的远场能量密度模型,并以1.06 μm激光辐照星载HgCdTe探测器为例,通过仿真计算,定量地评估了激光武器对天基红外系统预警卫星光电探测器的干扰效能。

**关键词:**激光;预警卫星;光电探测器;干扰效能

**中图分类号:**TN972 **文献标识码:**A

## Efficiency research of laser jamming photoelectric detector in early-warning satellite of infrared system based on the sky

GAO Gui-qing<sup>1</sup>, XIANG Jin<sup>1</sup>, LI Yong-xiang<sup>1</sup>, ZHOU Yong<sup>2</sup>

(1. The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China;

2. The second artillery sergeant School, Qingzhou 262500, China)

**Abstract:** This paper set up an energy density model of the laser irradiation on the satellite-borne photoelectric detector. Attenuation effect of the laser beam propagating through atmosphere and far-field laser size estimation was studied, the jamming mechanism of detector by laser was introduced, based on the brief depiction of early-warning satellite photoelectric detector. 1.06 μm laser irradiating HgCdTe detector was by laser given as an example. Analyzed the saturated jamming ability of laser weapons to the photoelectric detector of early-warning satellite of infrared system on the sky quantitatively based on emulation calculation.

**Key words:** laser; early-warning satellite; photoelectric detector; jamming efficiency

### 1 引言

随着激光技术的发展,强激光对卫星及其光电探测系统的干扰和破坏引起了广泛的重视。20世纪70年代以来,美国、前苏联等国家先后进行了多次反卫星激光武器的研究和试验,为实战提供了较完整的数据资料。例如,1997年10月,美国进行了用地基激光照射卫星光电探测器的实验,实验中500 kW连续式化学激光器配以1.5 m的发射望远镜对427 km远的卫星光电探测器进行照射,未能实现对探测器的损伤;但30 W激光却实现了对探测器的有效干扰。由于卫星与地面之间的距离相对较远,如低轨道侦察预警卫星轨道高度为400~1000 km,利用激光直接破坏卫星主体所需激光能量

很大,而作为卫星“视觉系统”的光电探测系统是一种弱光探测系统,且光学系统对激光具有较大的光学增益,因此激光辐照卫星极易造成光电探测系统的有效干扰。

### 2 天基红外系统预警卫星探测器简介

天基红外系统(SBIRS)预警卫星是由高轨道卫星、低轨道卫星组成。高轨道卫星包括4颗地球同步轨道卫星(轨道高度35780 km)以及2颗大椭圆轨道卫星(用于对两极地区进行探测),卫星上带有扫描型和凝视型两种光电探测器,主要用于对被动

作者简介:高桂清(1969-),男,教授,研究方向为导弹作战指挥运筹。

收稿日期:2009-09-14

段导弹所喷出的尾焰进行探测、跟踪。低轨道部分将由约 24 颗部署在 1600 km 左右高度的小型、大倾角卫星组成,每一颗卫星也由捕获探测器和跟踪探测器组成,主要用于对主动段弹头的红外辐射进行跟踪探测,确定弹头的速度和位置,最后结合数据库已有信息预报导弹的落点和时间。星载探测系统主要采用 PbS, HgCdTe 探测器,高轨卫星探测器主要工作波段为 2.7  $\mu\text{m}$  和 4.3  $\mu\text{m}$ ,而低轨卫星探测器工作频谱较宽,探测四个波段:可见光(0.3 ~ 0.7  $\mu\text{m}$ ),短波红外(1 ~ 3  $\mu\text{m}$ ),中波红外(3 ~ 6  $\mu\text{m}$ ),长波红外(6 ~ 16  $\mu\text{m}$ )。

### 3 激光对光电探测器的干扰机理分析

激光干扰是目前对抗光电探测器的重要手段之一。激光对光电探测器的破坏机理主要有三种效应,即光学效应、热学效应和力学效应。

星载光电探测器为了远距离探测信号,在设计这种探测系统时必须想方设法提高探测器的探测灵敏度,并选择线性工作范围,一般的光电探测器只有 3 ~ 4 个数量级的动态范围,在强光照射特别是激光照射下极易饱和,超过光电探测器的线性工作范围,使光电探测器暂时失效,这就是激光对光电探测器的光学效应,达到这种效应所需的激光能量通常很低。

然而,本文研究的是利用激光对处于 1600 km 及 35780 km 轨道高度的预警卫星的探测器进行干扰,同时考虑到大气对激光的吸收、散射等效应,入射到探测器表面的激光能量非常有限,因此,很难利用激光对星载探测器实现类似热学效应和力学效应的硬破坏,本文主要研究激光对星载探测器的光学效应干扰。

### 4 激光干扰效能估算

#### 4.1 大气的衰减效应

激光束在大气中的衰减主要是由大气中分子及气溶胶粒子的吸收与散射造成的。激光在大气中的衰减与激光波长、海拔高度(大气稠密度)及大气的气象条件(晴、雾、霾、降雨、云层及战场烟尘)等密切相关。

激光在大气中传输时,大气分子及气溶胶微粒中的分子转动-振动跃迁能量如果与入射光能量相当,则会引起对入射光线的吸收,这就是大气吸收效应。激光在大气中传输时,当大气分子或微粒遇到入射的光线时,会受激而向四面八方发射出频率与

入射光相同的光线,这种现象就是散射。散射并不能引起电磁辐射能量的减少,而是引起入射辐射强度分布的改变,即散射通常可以引起入射辐射在其原传播路径上能量的减少。

大气对激光传输的能量衰减,可根据大气透过率进行计算。大气透过率是大气吸收和大气散射共同作用的结果,满足 Beer-Bouguer-Lambert 定律,计算大气透过率的表达式为:

$$\tau = \tau_a \cdot \tau_s = \exp[-(\sigma_a + \sigma_s) \cdot L] \quad (1)$$

确定吸收衰减系数  $\sigma_a$  和散射衰减系数  $\sigma_s$  是一项十分复杂的工作,目前已有 LOWTRAN, MODTRAN 和 FASCODE 等专用计算机程序,可对大气透过率进行计算。在实际应用中,通常可采用一种利用气象学距离的工程方法对大气透过率进行估算,该方法将大气透过率表示为波长和可见光能见度的经验公式,其表达式如下<sup>[1]</sup>:

$$\tau = \exp\left\{-\frac{k}{R_v \cdot \sin a}(1 - e^{-0.835 H})\right\} \quad (2)$$

式中,  $H$  为激光传输的垂直高度,  $H = L \sin a$ ;  $R_v$  为能见度;  $a$  为激光传输路径与水平的仰角;  $k$  为经验常数,与气溶胶类型有关,对于波长为 1.06  $\mu\text{m}$  激光,其具体数值如表 1 所示。

表 1 不同地区的  $k$  值

地区	农村	城市	海洋	沙漠
$k$	2.828	3.132	4.543	2.496

文献[1]中指出,国内研究人员分别利用激光雷达的目标漫反射法和后向散射法以及利用阳光以求取大气光学厚度的“长法”在合肥市郊区测量了 1.06  $\mu\text{m}$  波长的斜程大气透过率,实验测量结果同公式(2)和 LOWTRAN 7 的结果进行比较发现:公式(2)无论同实测结果相比,还是同计算机软件相比,都相当符合,平均相对偏差对前者约 2%,后者在 1% 以下。

#### 4.2 远场激光光斑尺寸估算

设空间探测器距地面高度为  $H$ ,激光发射处距空间探测器的斜距为  $L$ ,激光束垂直于空间探测器表面的光束半径为  $R$ ,则<sup>[2]</sup>:

$$R = L\theta/2 \quad (3)$$

式中,  $\theta$  为光束发散角,包括光束衍射角发散  $\theta_y$ , 大气湍流所引起的光束扩展  $\theta_l$  及激光光源抖动  $\theta_d$  的影响,  $\theta_d$  与其具体激光发射跟瞄设备结构有关,则:

$$\theta = [\theta_y^2 + \theta_l^2 + \theta_d^2]^{1/2} \quad (4)$$

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D_0} \beta' \quad (5)$$

式中,  $\lambda$  为激光波长;  $D_0$  为激光发射望远镜口径;  $\beta'$  为光束质量因子, 本文设  $\theta_t = \theta_d = \theta_y/2$ 。

### 4.3 激光远场功率密度分布

在进行激光干扰时, 首先要对经过远程大气传输后再经跟踪系统前端光学系统聚焦到达光敏面的激光能流密度进行预估。这样一方面可以为设计激光对抗武器时所需采用的激光器提供参照依据, 另一方面也可以预知干扰效果。激光干扰星载扫描探测器如图1所示。

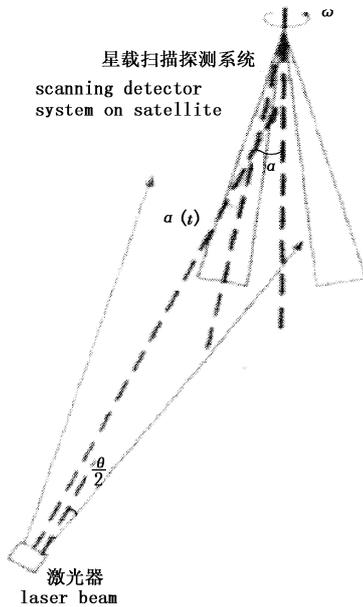


图1 激光干扰星载扫描探测器示意图

如图1所示, 假定激光光束与探测器光学系统中轴线夹角为  $\alpha(t)$ , 探测器扫描角速度为  $\omega$ , 激光光束与探测器光学系统旋转中心轴线夹角为  $\alpha$ , 光学系统轴线与旋转中心夹角为  $\beta$ , 光学系统自身角度为  $\gamma$ , 设激光器的输出功率为  $P_0$ , 激光束发散角为  $\theta$ , 激光传输路径与水平的仰角为  $a$ , 卫星距地面的高度为  $H$ , 激光束照射探测器表面的光束半径为  $R$ , 激光的大气透过率为  $\tau_1$ , 探测器前端光学系统的透过率为  $\tau_2$ ; 卫星探测器光学接收镜头表面接收到的功率为  $P_1$ , 对应功率密度为  $\rho_1$ , 镜头直径为  $D$ , 探测器光敏元等效直径为  $\Phi$  (设每个像元分辨率即瞬时视场大于激光发散角, 可保证会聚的激光能够聚焦在单个像元上), 光敏面的功率密度为  $\rho$  (设为连续激光辐照), 则<sup>[2-6]</sup>:

$$P_1 = P_0 \tau_1 \cos(a(t)) \quad (6)$$

$$\rho_1 = \frac{0.838 P_1}{\pi R^2} \quad (7)$$

$$\rho = \rho_1 \tau_2 \left(\frac{D}{\Phi}\right)^2 \quad (8)$$

综合以上可得:

$$\rho = \frac{0.838 P_0 \tau_1 \tau_2 \cos(a(t)) \left(\frac{D}{\Phi}\right)^2}{\pi (H \theta / 2)^2} \sin^2 a \quad (9)$$

式中,  $a(t) = \cos\alpha \cdot \cos\beta + \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos(\omega t)$ , 0.838为分布在 Airy 斑第一暗环内部的激光能量占总入射总能量的百分比。

### 4.4 干扰效能分析

光电探测器在激光的辐照下达到饱和时, 探测器的饱和效应可以造成探测信号的丢失。为了实现激光对探测器的干扰, 要求到达探测器光敏面处的激光功率密度  $\rho$  需满足:

$$\rho' < \rho < \rho'' \quad (10)$$

式中,  $\rho'$  为探测器的饱和阈值,  $W \cdot \text{cm}^{-2}$ ;  $\rho''$  为探测器的损坏阈值,  $W \cdot \text{cm}^{-2}$ , 满足上式的探测器处于饱和状态。探测器的饱和阈值不仅与入射激光波长有关, 还与探测器本身工作参数有关。文献[7]中指出实验所用的三个 HgCdTe 光电探测器, 其中两个为光伏型器件, 一个为光导型器件, 用 1#, 2# 来分别代指两个 PV 形 HgCdTe 探测器, 用 3# 来代指 PC 型 HgCdTe 探测器。三个探测器的主要参数及 1.06  $\mu\text{m}$  激光辐照时的饱和阈值 (实验中辅照时间为 1 s) 如表 2 所示。

表2 探测器的主要参数及饱和阈值的对应关系

探测器名称	1#	2#	3#
工作温度/K	77	77	77
工作方式	pv	pv	pc
光敏元大小/mm	$\Phi 2$	$\Phi 2$	0.26 × 0.26
饱和阈值/( $W \cdot \text{cm}^{-2}$ )	0.15 ~ 0.35	0.21 ~ 0.57	2.8 ~ 5.3

### 4.5 仿真计算

设地面激光器辐照高轨卫星的输出功率为  $P_0 = 100 \text{ kW}$ , 辐照低轨卫星的输出功率为  $P_0 = 100 \text{ W}$ , 波长  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ , 光束质量因子  $\beta' = 3$ , 激光发射口径  $D_0 = 1 \text{ m}$ , 大气能见度为  $R_v = 21 \text{ km}$ , 经验常数  $k = 2.828$ , 激光传输路径与水平的仰角  $\alpha = \pi/3$ , 高轨卫星距离地面  $H = 35780 \text{ km}$ , 低轨卫星距离地面  $H = 1600 \text{ km}$ , 探测器光学系统透过率为  $\tau_2 = 0.6$ ,  $\alpha = \pi/12$ ,  $\beta = \pi/24$ ,  $\omega = 2 \cdot \pi$  (rad/s), 探测器光学系统口径  $D = 1 \text{ m}$ , 光敏元等效直径  $\phi = 2 \text{ mm}$ ,

由以上模型可知,入射到探测器上的激光能量密度与时间关系如图2、图3所示。

由仿真计算结果可以看出,100 kW 功率的地基激光武器可以实现对天基红外系统高轨卫星光电探测器的有效干扰,同样 100 W 的功率的地基激光武器也可以实现对低轨卫星光电探测器的有效干扰,使其达到饱和。

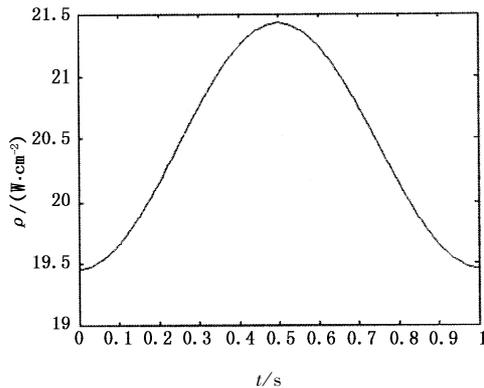


图2 激光武器照射高轨卫星的功率密度与时间的关系

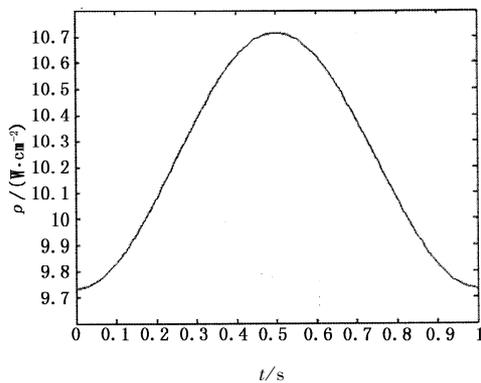


图3 激光武器照射低轨卫星的功率密度与时间的关系

#### 4.6 讨论

本文在推导中建立了激光辐照星载探测器的功率密度模型,通过研究表明,到达探测器光敏元的功率密度不仅与激光发射功率、发射口径、发射倾角、发散角及光束质量有关,还与能见度、激光光束与探测器轴线夹角及探测器光学系统口径、光敏元等效直径等紧密相关。要想提高激光对星载探测器造成

有效干扰的概率,一是可以通过进一步提高激光发射功率;二是可以采用在天气晴朗能见度高的条件下发射激光;三是压缩激光发散角;四是提高激光瞄准跟踪精度;另外,还可以通过在高空或外太空发射激光以减少传播距离和大气的影晌。

#### 5 结束语

通过以上分析及仿真结果可知,利用激光对天基红外系统预警卫星进行干扰是实现卫星致盲的有效可行途径,而且所需的激光武器并不需要很高的功率,与实际相符。其关键要解决好以下两个技术:

(1)精密跟踪瞄准技术。由于预警卫星具有一定的机动能力,同时探测器的光学系统始终处于运动状态,因此,所用的激光设备必须具有很高的跟踪瞄准精度,才能将激光能量辐照到探测器表面。

(2)自适应光学技术。大气对激光的湍流效应不容忽视,考虑到这种影响,必须采用自适应光学技术,对这种影响进行部分处理和补偿,可使大气对激光传输的影响减少到最低限度。

#### 参考文献:

- [1] 宋正方. 1.06  $\mu\text{m}$  激光的斜程大气衰减[J]. 激光技术,1997,21(6):24-26.
- [2] 李海燕. 激光对红外成像制导系统干扰效能研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005.
- [3] 王世勇,付有余,郭劲. 远场光电探测器系统受激光干扰与损伤效果估计[J]. 光学技术,2002,(1):28-30.
- [4] 牛燕雄. 强激光对星载光电探测系统的干扰与破坏研究[J]. 光子学报,2004,33(7):793-796.
- [5] 高桂清,刘刚,刘凤林. 激光对DSP卫星探测器干扰效能研究[J]. 激光与红外,2007,37(5):452-456.
- [6] 周建民. 激光对光电制导武器跟踪系统的干扰技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2005.
- [7] 李修乾. 激光辐照碲镉汞光电探测器实验研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2002.