

卫星光电载荷的激光威胁及防护分析

赵书林, 胡进军, 柴利飞, 陈旭, 李晓林

中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州

收稿日期: 2026年6月22日; 录用日期: 2026年8月17日; 发布日期: 2026年8月25日

摘要

激光武器的快速发展对卫星光电载荷构成了严重威胁, 在研究光电载荷激光威胁机理的基础上, 开展了激光对不同轨道卫星光电载荷的威胁分析, 提出激光威胁告警、激光防护薄膜、光学开关的一体化激光防护措施, 提升卫星光电载荷激光防护能力。

关键词

卫星, 光电载荷, 激光威胁, 激光防护

Analysis of Laser Threats and Protection for Satellite Optoelectronic Payloads

Shulin Zhao, Jinjun Hu, Lifei Chai, Xu Chen, Xiaolin Li

The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou Henan

Received: June 22, 2026; accepted: August 17, 2026; published: August 25, 2026

Abstract

The rapid development of laser weapons poses a serious threat to satellite photoelectric payloads. Based on a study of the laser threat mechanisms against these payloads, an analysis of laser threats to photoelectric payloads on satellites in different orbits was carried out. Laser protection measures integrating laser threat warning, laser protection films and optical shutters are proposed to enhance the laser protection capability of satellite photoelectric payloads.

Keywords

Satellite, Photoelectric Payloads, Laser Threat, Laser Protection



1. 引言

激光武器作为一种定向能武器,具有攻击速度快、可连续发射、效费比高的优点,近年来获得了长足的发展,已成为反卫星选用的重要手段[1]。卫星光电载荷具有探测灵敏度高、防护能力弱的特点,受到激光打击后可能出现软硬损伤,严重影响任务执行。需要深入开展卫星光电载荷的激光威胁分析,采取多种手段实现卫星光电载荷的激光防护。

2. 卫星光电载荷激光威胁机理

卫星光电载荷通常由光学系统和光电探测器两部分组成,分别进行激光威胁机理分析。

2.1. 光电探测器的激光威胁机理

光电探测器是卫星光电载荷的核心器件,激光对光电探测器的损伤效应分为软损伤和硬损伤两种。

软损伤指光电探测器暂时失效或者功能退化,出现光饱和、暗电流增加、电阻率降低、击穿电压降低以及响应度损失等现象。激光辐照消失后,光电探测器仍然可以正常成像,但是信噪比会降低从而影响成像质量[2]。

硬损伤指光电探测器的材料或结构产生了永久性损坏,如热熔融、断裂以及击穿等,这是因为激光入射到光电探测器产生的热效应,使器件发生了不可修复的物理性损伤,光电探测器不能正常输出信号[3]。

激光对 CCD 光电探测器的损伤效果如图 1 所示。

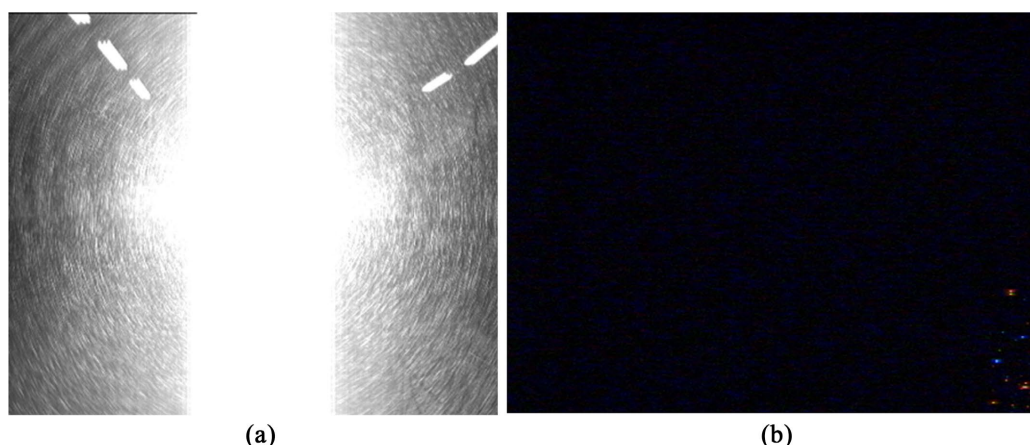


Figure 1. Laser-induced damage effects on CCD photodetectors. (a) soft damage effects; (b) hard damage effects

图 1. 激光对 CCD 光电探测器的损伤效果。(a) 软损伤效果; (b) 硬损伤效果

影响光电探测器损伤阈值的因素很多,与材料热传导率、热容和热吸收系数等有关,还与激光脉冲宽度、频率、形状、光斑大小等激光参数有关,而且不同的实验条件下,光电探测器损伤阈值也不同[4]。

连续激光辐照下,光电探测器的损伤主要是热效应作用引起,脉冲激光辐照下,光电探测器的损伤是热效应和光学击穿效应共同作用引起[5],激光脉宽越长,热效应造成的损伤越多,激光脉宽越短,光

学击穿造成的损伤越多。

王昂、郭锋、王金宝等人采用 1064 nm/1080 nm 连续激光对 CCD、CMOS 探测器的损伤效应进行了研究[5]-[7]，得到的典型损伤阈值见表 1。

Table 1. Typical damage threshold of continuous-wave laser on photodetectors
表 1. 连续激光对光电探测器的典型损伤阈值

光电探测器	软损伤阈值	硬损伤阈值
CCD	$2.60 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$	$1.19 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$
CMOS	$5.87 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$	$1.62 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$

林均仰等人采用 1064 nm 脉冲激光(脉宽 5 ns、重复频率 10 Hz)对 CCD、CMOS 探测器的损伤效应进行了研究[8]，在真空和常压两种条件下，得到的典型损伤阈值见表 2。

Table 2. Typical damage threshold of pulsed laser on photodetectors
表 2. 脉冲激光对光电探测器的典型损伤阈值

光电探测器	工作条件	软损伤阈值	硬损伤阈值
CCD	常压	$1.5 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$	0.29 J/cm^2
CCD	真空	$1.9 \times 10^{-4} \text{ J/cm}^2$	0.27 J/cm^2
CMOS	常压	$7.7 \times 10^{-2} \text{ J/cm}^2$	0.5 J/cm^2
CMOS	真空	$7.7 \times 10^{-2} \text{ J/cm}^2$	0.5 J/cm^2

2.2. 光学系统的激光威胁机理

按照激光损伤形式划分，光学系统的激光损伤分为体损伤和面损伤两种[9]。面损伤是指激光辐照光学材料时造成光学材料表面的损伤，体损伤是指激光辐照光学材料时造成光学材料炸裂破坏。光学系统的面损伤阈值低于体损伤阈值，最大相差一个数量级。

光学系统激光损伤的主要表现形态见表 3。

Table 3. Manifestations of laser-induced damage in optical systems
表 3. 光学系统激光损伤的表现形态

面损伤表现形态	体损伤表现形态
表面形貌变化	体软化
膜和表面相变	体裂纹
表面颜色变化	体结构变化
表面产生波纹	颜色变化
膜剥层或脱落	气泡
表面裂纹	细丝、条纹
表面熔化	熔化
表面炸裂	爆炸性碎裂

光学系统激光损伤会导致材料变形和折射率系数变化，使光束弥散、偏转、波阵面畸变，产生像差

畸变、双折射和热透镜效应等，从而影响光学系统的成像质量。苏雷开展了不同光学材料的 1064 nm 连续激光损伤研究[10]，典型激光损伤阈值见表 4。

Table 4. Typical laser-induced damage thresholds of different optical materials
表 4. 不同光学材料的典型激光损伤阈值

光学材料	激光损伤阈值	损伤现象	损伤时间
Si	$3.2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$	烧蚀破坏	1 s
GaAs	$1.8 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$	烧蚀破坏	1 s
ZnSe	$2.5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$	中心烧熔	0.3 s

3. 激光对卫星光电载荷威胁分析

3.1. 激光武器发展现状分析

2010 年前，激光武器研究以化学激光武器为主，包括用于开展反卫试验的 MIRACL/SLBD 中红外先进化学激光武器、用于开展“空间控制”试验的 COIL 氧碘化学激光武器、鸚鵡螺激光武器(THELACTD)等，实现了超过 2 MW 的激光输出功率[11]。COIL 激光武器主要性能参数见表 5。

Table 5. Main performance parameters of COIL laser weapons
表 5. COIL 激光武器主要性能参数

主要组成	参数名称	典型指标	备注
高能激光	波长	1.315 μm	化学激光器
	模式	连续	
	功率	大于 2 MW	
	单次射击时间	不小于 10 s	
	发射间隔时间	不小于 15 min	
照明激光	波长	1.05~1.1 μm	固体激光器
	模式	脉冲或连续	
信标激光	波长	0.589 μm	固体激光器
	模式	连续	
ATP 望远镜	有效口径	2 m	
	跟瞄精度	优于 1 μrad	

近年来，以固体板条、光纤激光器为光源的固体激光武器发展迅速，相较于化学激光武器，固体激光武器具有小型化、模块化和通用化的性能特点，2030 年前有望实现 MW 级输出功率[12]。典型固体激光武器主要性能参数见表 6。

3.2. 卫星光电载荷激光威胁分析

分析激光武器对卫星光电载荷是否构成威胁及威胁大小，需要计算激光照射到卫星或探测器靶面处的激光功率密度是否超过光学系统、光电探测器损伤阈值，涉及以下参数计算：

Table 6. Typical performance parameters of solid-state laser weapons
表 6. 典型固体激光武器性能参数

主要组成	参数名称	典型指标	备注
高能激光	波长	1.0~1.1 μm	固体激光器
	模式	连续	
	功率	1 MW	
	连续发射时间	数小时	
照明激光	波长	1.0~1.1 μm	固体激光器
	模式	连续或脉冲	
ATP 望远镜	有效口径	2 m	
	跟瞄精度	优于 1 μrad	

(1) 光电载荷光学增益

强激光评估用光电载荷光学增益公式[13]:

$$G = \frac{S_p}{S_s} = \frac{(D_p)^2}{(D_s)^2} = \frac{(D_p)^2}{(\beta_s \times D_a)^2} = \frac{(D_p)^2}{\left(\beta_s \times \frac{2.44\lambda f}{D_p}\right)^2} = \frac{(D_p)^4}{(2.44\beta_s \lambda f)^2} \quad (1)$$

式中: S_p 表示光电载荷入瞳面积, S_s 表示光电载荷焦面实际光斑面积, D_p 表示光电载荷入瞳直径, D_s 表示光电载荷焦面实际光斑直径, D_a 表示艾里斑直径, β_s 表示成像光斑修正因子, λ 是激光波长; f 是光电载荷光学焦距。

D_s 为像差、离焦、衍射、振动等效效应叠加后的实际光斑直径, 在工程应用中, 卫星光电载荷 D_s 通常为 D_a 的十倍至百倍量级, 即成像光斑修正因子 β_s 取值通常在 10~100 范围。

(2) 卫星处激光光斑直径

地基激光武器打击卫星时, 卫星处激光光斑直径公式为:

$$d = \theta \times L = \theta_d \times \beta_f \times L = \frac{2.44\lambda}{D_f} \times \beta_f \times L \quad (2)$$

式中: θ 为激光发散角, L 为激光武器与卫星之间距离, θ_d 为激光武器发射望远镜衍射极限发散角, β_f 为远场光束质量修正因子, D_f 为激光武器发射口径。

激光发散角 θ 为包含衍射极限发散角、高斯光束固有发散角、大气湍流等效发散角等因素的实际发散角, 在工程应用中, 激光发散角 θ 通常为衍射极限发散角 θ_d 的几倍至几十倍, 远场光束质量修正因子 β_f 取值为几至几十。

(3) 卫星处激光光斑功率密度

卫星处激光光斑功率密度为:

$$W_0 = \tau_a \times \frac{P_0}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (3)$$

式中: τ_a 是大气透过率; P_0 为激光发射功率。

大气透过率 τ_a 的影响因素主要包括气体分子的吸收、气溶胶的散射、气象条件造成的衰减[14]，极佳条件下(晴空、高海拔、极干燥)，大气透过率可达 0.8~0.95，一般晴朗条件下(低海拔、轻度气溶胶)，大气透过率约为 0.5~0.7。

(4) 探测器靶面激光光斑功率密度

入瞳处激光光斑经光电载荷光学聚焦、光学衰减后，入射到探测器靶面，探测器靶面激光光斑功率密度 W_1 为：

$$W_1 = W_0 \times G \times \eta \times \tau \tag{4}$$

式中： W_0 是卫星处激光光斑功率密度； G 是光电载荷光学增益； η 是光电载荷滤光片截止深度； τ 是光学系统透过率。

光电载荷滤光片截止深度 η 用来衡量工作波段外光信号抑制能力，用“光密度”(OD 值)表示，根据不同任务需求，滤光片截止深度通常在 OD2 至 OD4，对应工作波段外光信号透过率为 1%~0.01%。光学系统透过率 τ 取决于工作波段、光学系统设计复杂度和制造工艺，通常在 50%至 95%范围。

说明：地基激光打击空间目标时，大气湍流效应直接影响激光打击效果，主要表现为功率密度降低、瞄准脱靶、波前畸变等效应[15]，激光武器通常采用自适应光学系统、高海拔台站、多光束合成、波长优化等措施，降低大气湍流的影响。本文采用的模型是理想条件下的上限估计。

3.2.1. 激光对低轨卫星光电载荷威胁分析

选取典型场景：卫星轨高 L 为 500 km，光电载荷入瞳直径 D_p 为 1 m，光电探测器材质为 CMOS，地基激光武器工作波长 λ 为 1.06 μm ，发射功率 P_0 为 1 MW，激光武器发射口径 D_f 为 2 m。激光对低轨卫星光电载荷威胁分析见表 7。

Table 7. Laser threat analysis for optoelectronic payloads on low-orbit satellites
表 7. 低轨卫星光电载荷激光威胁分析

参数名称	影响因子	参数取值	计算结果
光电载荷 光学增益 G	λ	1.06 μm	$G = 4.2 \times 10^7$
	D_p	1 m	
	f	6 m	
	β_s	10	
到卫星处 激光光斑直径 d	λ	1.06 μm	$d = 8.5 \text{ m}$
	D_f	2 m	
	β_f	10	
	L	500 km	
到卫星处 激光功率密度 W_0	τ_a	0.7	$W_0 = 1.24 \text{ W/cm}^2$
	d	8.5 m	
	P_0	1 MW	
探测器靶面 激光功率密度 W_1	W_0	1.24 W/cm^2	$W_1 = 3.61 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$
	G	4.2×10^7	
	η	1%	
	τ	0.7	

分析表明，地基激光到达低轨卫星的激光功率密度 $W_0 = 1.24 \text{ W/cm}^2$ ，低于光学系统的损伤阈值，激光到达光电探测器的激光功率密度 $W_1 = 3.61 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ，高于 CMOS 光电探测器的激光硬损伤阈值 $1.62 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ，将会导致光电载荷不可逆损伤。

3.2.2. 激光对高轨卫星光电载荷威胁分析

选取典型场景：卫星轨高 L 为 36,000 km，光电载荷入瞳直径 D_p 为 3 m，光电探测器材质为 CMOS，地基激光武器工作波长 λ 为 $1.06 \text{ }\mu\text{m}$ ，发射功率 P_0 为 1 MW，激光武器发射口径 D_f 为 2 m。激光对高轨卫星光电载荷威胁分析见表 8。

Table 8. Laser threat analysis for optoelectronic payloads on high-orbit satellites
表 8. 高轨卫星光电载荷激光威胁分析

参数名称	影响因子	参数取值	计算结果
光电载荷 光学增益 G	λ	$1.06 \text{ }\mu\text{m}$	$G = 4.7 \times 10^8$
	D_p	3 m	
	f	16 m	
	β_s	10	
到卫星处 激光光斑直径 d	λ	$1.06 \text{ }\mu\text{m}$	$d = 467.6 \text{ m}$
	D_f	2 m	
	β_f	10	
	L	36,000 km	
到卫星处 激光功率密度 W_0	τ_a	0.7	$W_0 = 0.0004 \text{ W/cm}^2$
	d	467.6 m	
	P_0	1 MW	
探测器靶面 激光功率密度 W_1	W_0	0.0004 W/cm^2	$W_1 = 1.35 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$
	G	4.7×10^8	
	η	1%	
	τ	0.7	

分析表明，地基激光到达高轨卫星的激光功率密度 $W_0 = 0.0004 \text{ W/cm}^2$ ，远低于光学系统的损伤阈值，激光到达光电探测器的激光功率密度 $W_1 = 1.35 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ ，低于 CMOS 光电探测器的激光硬损伤阈值 $1.62 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ，高于 CMOS 光电探测器的激光软损伤阈值 $5.87 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ ，将会导致卫星光电载荷暂时性能下降或失效。

4. 卫星光电载荷激光防护分析

针对卫星光电载荷面临的激光威胁，需要采用激光威胁告警、激光防护薄膜、光学开关等技术手段，实现光电载荷的激光防护。

4.1. 激光威胁告警

激光威胁告警技术能够截获、测量、识别、定向激光威胁信号并迅速产生告警信号，提升对激光威胁的探测感知能力，使卫星光电载荷有充裕时间采取防御措施[16]。

激光威胁告警主要性能指标选取分析:

(1) 告警波段: 根据卫星轨道高度和光电载荷工作波段综合选取。对于低轨卫星, 地基激光武器具备光电载荷软、硬损伤能力, 激光告警波段需要覆盖 $0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 、 $3.6\sim 4.2\ \mu\text{m}$ 波段硬损伤激光以及光电载荷工作波段激光。对于高轨卫星, 地基激光武器仅具备光电载荷软损伤能力, 告警波段覆盖光电载荷工作波段即可。

(2) 告警视场: 地基激光武器为降低大气吸收和湍流效应影响, 实现打击效能最大化, 通常以较大的攻击仰角对卫星实施打击, 低轨卫星告警视场 $\geq 90^\circ$ 能够满足地基激光探测需求。高轨卫星告警视场需要覆盖 4π 空间, 满足地基、天基激光武器威胁告警需求。

(3) 测角精度: 激光告警载荷要能够为卫星受到激光攻击采取应对措施和威胁源溯源查证提供支持。对于低轨卫星, 激光告警测角精度通常优于 1° , 引导卫星调姿使威胁激光偏离光电载荷视场, 并实现威胁源 $10\ \text{km}$ 级溯源定位。对于高轨卫星, 4π 空间内测角精度通常优于 5° , 地球立体角空间内测角精度通常优于 0.1° 。

(4) 告警灵敏度: 激光告警载荷的灵敏度设计要兼顾威胁激光的到靶功率密度以及环境杂光抑制需求。对于低轨卫星, 地基激光武器具备光电载荷软、硬损伤能力, 告警灵敏度要比光电载荷光电探测器软、硬损伤阈值高 1 个数量级。对于高轨卫星, 告警灵敏度要比光电载荷光电探测器软损伤阈值高 1 个数量级。

(5) 告警响应时间: 激光告警载荷需要具备对威胁激光的快速响应能力, $0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 、 $3.6\sim 4.2\ \mu\text{m}$ 波段硬损伤激光的告警响应时间应优于 $0.1\ \text{s}$, 软损伤激光的告警响应时间应优于 $1\ \text{s}$ 。

4.2. 激光防护薄膜

按照防护原理不同, 激光防护薄膜主要分为基于线性光学原理、非线性光学原理和热致相变原理三类。

基于线性光学原理的激光防护薄膜只对激光波长敏感, 对激光强度不敏感, 平等吸收或反射同一波长的强光和弱光。线性激光防护薄膜的优点是易于制备, 阈值较高; 缺点是对入射角度敏感, 且当激光波长与光电载荷工作波长相同时, 不能兼顾信号探测与激光防护[17]。

基于非线性光学原理的激光防护薄膜主要利用三阶非线性光学效应实现激光防护, 典型代表如 C_{60} 光限幅器, C_{60} 薄膜材料受到弱光照射时, 输出光强与输入光强成正比线性关系; 当受到强光照射时, 输出光强出现饱和, 几乎不随输入光强变化。非线性激光防护薄膜的优点是反应速度快, 能兼顾信号探测与激光防护两种功能; 缺点是损伤阈值较低, 对强光衰减不足[18]。

基于热致相变原理的激光防护薄膜主要利用材料吸收激光热量发生相变实现激光防护。 VO_2 热致相变材料室温呈半导体态, 温度上升到 68°C 后呈金属态, 可作为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 光电载荷的激光防护材料[19]。稀土钽/钛酸盐相变材料熔点较高, 采用等离子喷涂制备的 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$ 涂层, 可承受 $1000\ \text{W}/\text{cm}^2$ 激光 $3\ \text{s}$ 照射不损坏, 有潜力用于光电载荷高能激光防护[20]。

超材料代表了一种从“被动遮挡”向“智能光谱调控”演进的技术方向, 通过设计亚波长结构, 实现自然材料不具备的光学特性。基于介质超表面的“反射性”防护膜, 通过在透明基底上排列高折射率的介质“小柱子”, 利用 Mie 谐振效应, 可以使特定波长(如 $1064\ \text{nm}$)的反射率高达 95% 以上, 同时保持可见光波段的高透过率[21]。

等离激元器件利用局域场增强效应实现“智能”光限幅, 通过金属纳米颗粒的表面等离激元共振, 弱光下高透, 确保光电载荷正常工作; 一旦遭受强激光照射, 其局域电场被极度增强, 诱导强烈的双光子吸收等非线性效应, 瞬间将透射率从 85% 以上降至 1% 左右, 从而阻断强光[22]。优点: 速度极快, 响应时间可达飞秒至皮秒级。缺点: 损伤阈值需要提高。

4.3. 光学开关

光学开关激光防护技术的工作原理是：当激光来袭时，通过切断激光传输通道或控制激光偏离传输通道，实现对卫星光电载荷的激光防护。

美国的多型光学遥感卫星采用了“眼睑”式激光防护装置，该装置一端是固定在镜头上的不透明聚合物薄膜，薄膜外侧镀制金属电极作为阴极，镜头玻璃表面镀制透明导电膜作为阳极。当两个电极间施加电压时，静电力将不透明的阴极板吸引至闭合状态，实现激光防护。激光威胁消失时，“眼睑”在薄膜弹性力作用下恢复至打开状态，该装置的最小响应时间可达 0.25 ms [23]。

快速转发微镜阵列将光路中的激光反射镜做成数字微镜阵列器件，微镜阵列的每个单元由铁磁性金属光栅和铝电极组成，由铝电极产生的磁场控制金属光栅的闭合，阵列中的每个微镜单元分别对应光电探测器的每个像元。微镜单元能在+12°到-12°范围旋转，当视场中出现高能激光时，调节相应微镜单元的倾斜程度来滤除激光，实现光电载荷激光防护[24]。

4.4. 卫星光电载荷激光防护策略探讨

4.4.1. 一体化激光防护协同工作策略

针对激光对卫星光电载荷的威胁，可以通过构建“威胁告警 - 防护薄膜 - 光学开关”一体化协同防护系统，提升激光防护效能，核心思路是各防护手段协同工作、分级响应。

激光威胁告警设备通过激光到靶功率密度测量，结合卫星光电载荷的软硬损伤阈值，进行激光威胁等级判定。激光威胁等级分类及判定准则见表 9。

Table 9. Laser threat level classification and judgment criteria
表 9. 激光威胁等级分类及判定准则

威胁等级	严重性	判定准则
一级威胁	一般	激光到靶功率密度低于光电载荷软损伤阈值，不影响光电载荷工作。
二级威胁	严重	激光到靶功率密度高于光电载荷软损伤阈值，低于光电载荷硬损伤阈值，激光照射期间会导致光电载荷暂时失效。
三级威胁	致命	激光到靶功率密度高于光电载荷硬损伤阈值，会导致光电载荷不可逆损伤。

一体化激光防护工作流程如图 2 所示。激光信号判定为一级威胁时，激光威胁告警信息上报，卫星平台无需采取防护措施，适时对威胁源区域进行详查。激光信号判定为二级威胁时，防护薄膜自主响应衰减激光功率，使激光到靶功率密度低于光电载荷软损伤阈值。激光信号判定为三级威胁时，防护薄膜自主响应衰减激光功率，激光告警立即向光学开关发出闭合指令，光学开关执行光路物理阻断，实现光电载荷安全防护。

4.4.2. 激光防护工程应用探讨

卫星具体采取的激光防护方案，需要根据光电载荷特点、卫星平台资源和激光威胁态势进行工程代价与防护性能的综合权衡。

激光威胁告警是进行激光防护的前提条件，小型化和低功耗是激光告警星载工程应用的重点，如何在小型化条件下实现高测角精度、宽告警波段等性能指标具有重要价值。激光防护薄膜的优点是低成本、高可靠，星载工程应用中需要进一步提升抗激光损伤阈值和响应时间。光学开关的优点是抗激光损伤阈值高，能够物理隔绝高能激光，星载工程应用中需要重点关注光学开关的高可靠性设计。

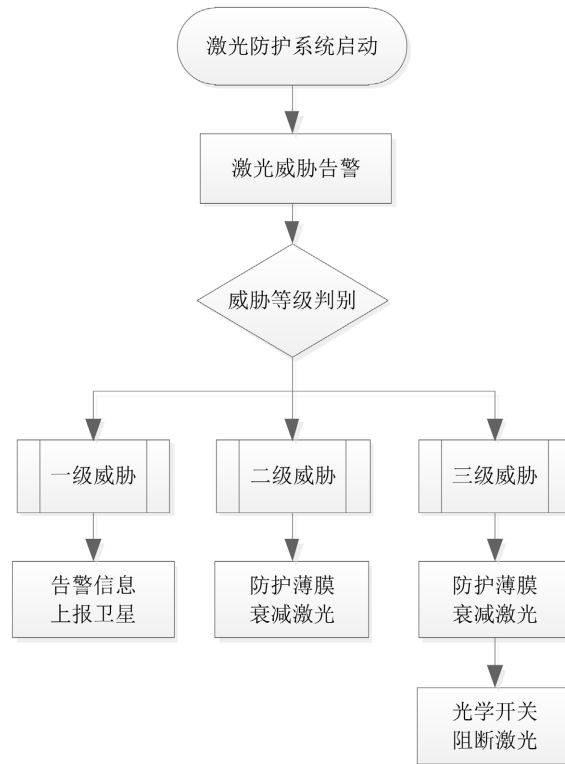


Figure 2. Integrated laser protection workflow
图 2. 一体化激光防护工作流程

5. 结论

地基激光能够对低轨卫星光电载荷构成软硬损伤，对高轨卫星光电载荷构成软损伤，通过综合采用激光威胁告警、激光防护膜、光学开关等一体化协同防护措施，能够实现卫星光电载荷的激光防护。

参考文献

- [1] 李伟, 余志锋, 邓晓智. 美国激光武器发展建设研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(11): 1637-1643.
- [2] 郎晓萍, 张亚男, 李晓英, 等. 激光干扰探测饱和面积非线性效应研究[J]. 激光技术, 2021, 45(1): 93-98.
- [3] 程相正, 邵铭, 曲卫东, 等. 大功率激光对 CCD 探测器损伤研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(11): 1743-1749.
- [4] 胥杰, 赵尚弘, 占生宝, 等. 光电探测器激光损伤因素及其成因分析[J]. 激光杂志, 2006, 27(5): 43-44.
- [5] 王昂. 可见光 CMOS 图像传感器的激光辐照效应研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [6] 郭锋. 激光对 CMOS 和 CCD 的辐照效应对比研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [7] 王金宝. 激光辐照可见光面阵 Si-CCD 探测器实验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
- [8] 林均仰, 舒嵘, 黄庚华, 等. 激光对 CCD 及 CMOS 图像传感器的损伤阈值研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(6): 475-478.
- [9] 赵元安, 邵建达, 刘晓风, 等. 光学元件的激光损伤问题[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(1): 1-10.
- [10] 苏雷. 光学材料和薄膜激光热效应损伤研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [11] 丁宇, 姜锋, 郑荣山, 等. 美国高能激光武器发展概况[J]. 光电技术应用, 2021, 36(6): 1-9.
- [12] 林亦水, 徐东昕, 吴启, 等. 高能激光武器的战场应用与未来展望[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 945-957.
- [13] 张乐, 赵威, 王非. 光电探测器受强激光干扰与损伤风险分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S2): 711-713.
- [14] 陈芳芳, 耿蕊, 吕勇, 等. 激光红外大气传输透过率模型研究[J]. 红外技术, 2015, 37(6): 496-501.

-
- [15] 耿兴宁, 刘政, 李武周, 等. 激光在动态大气湍流中的传播特性研究[J]. 激光与红外, 2024, 54(1): 40-47.
- [16] 周冰洁, 王永志, 张大庆, 等. 星载激光告警载荷应用需求与发展趋势[J]. 制导与引信, 2022, 43(4): 51-56.
- [17] 车进喜, 王东, 张恒伟, 等. 激光参数对红外成像系统干扰效果影响的实验研究[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 992-997.
- [18] 崔云, 贺洪波, 范正修, 等. 高能激光武器的发展及卫星激光防护膜的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(6): 1-5.
- [19] 赵瑞瑞, 杨明庆, 牛春晖, 等. 二氧化钒薄膜的制备及光电性能研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(4): 353-360.
- [20] Zhu, J., Ma, Z., Gao, Y., Gao, L., Pervak, V., Wang, L., *et al.* (2017) Ablation Behavior of Plasma-Sprayed $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$ Coating Irradiated by High-Intensity Continuous Laser. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 35444-35452. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b11034>
- [21] He, Z., Hu, Z., Yang, J., Chen, W., Duan, Z., Wang, N., *et al.* (2025) Enhanced Reflection Laser Protection Thin Films Compatible with Visible Light Stealth. *Chinese Optics Letters*, **23**, Article 012602. <https://doi.org/10.3788/col202523.012602>
- [22] Huang, J., Lu, Y., Dong, B., Liu, Y. and He, C. (2024) Reflective Nonlinear Optical Limiter Design Based on Coupled Tamm Plasmon Polaritons and Optical Kerr Effect. *Results in Physics*, **56**, Article 107316. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.107316>
- [23] Wu, D. (2005) High-Power Laser Beam Weapons & Protection Technique. *Aeronautical Science and Technology*, No. 2, 13-15. (In Chinese)
- [24] 佟洋, 徐熙平. 基于数字微镜阵列光调制的激光防护系统[J]. 发光学报, 2015, 36(11): 1325-1329.