

文章编号:1004-4213(2011)03-0388-5

# 太阳对成像型天基激光告警系统的影响

董红军,周中亮

(军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003)

**摘 要:**针对成像型天基激光告警系统中的太阳背景辐射问题,通过理论分析和数值计算研究了太阳与系统探测器不同空间位置关系时直射太阳光和地球反射太阳光对系统成像信噪比、威胁激光检测、探测器自身安全的影响.结果表明:太阳光是天基激光告警系统的主要背景辐射,地球反射太阳光是系统红外探测器成像的主要背景光;反射太阳光辐照在探测器像面上的最大能量密度为  $0.97 \text{ mJ/cm}^2$ ,反射太阳光背景下,攻击激光成像信噪比在  $10^3$  以上,信标激光信噪比小于 1,反射太阳光对攻击激光检测没有影响,对信标激光成像是强背景干扰;直射太阳光辐照探测器是系统不可避免的情况,太阳成像光斑功率密度最大时约  $20 \text{ W/cm}^2$ ,将导致探测器像元饱和甚至损坏;太阳成像光斑特征与入射激光相似,会造成系统严重虚警.

**关键词:**光电对抗;激光告警技术;光斑;信噪比

**中图分类号:** TN977

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114003.0388

## 0 引言

随着反卫星武器的发展,尤其是激光武器的日趋成熟,为提高卫星的生存率,各国对激光威胁的侦察、探测和告警工作都极为重视<sup>[1-3]</sup>.卫星的轨道相对固定,机动性差,自身防护能力较弱,很容易受到激光武器的攻击.为了有效保护卫星资源,非常有必要开展天基威胁激光探测告警技术的研究.

由于反卫星激光的立体式全向攻击特点和“零”延时优势,天基告警系统通常采用成像型设计,利用大视场鱼眼光学系统覆盖整个告警区域以克服扫描型系统不可避免的漏警问题,并给卫星采取防护措施提供尽可能长的反应时间<sup>[4-6]</sup>.

告警系统工作在近地轨道环境,太阳辐射、地球反射太阳辐射和地球自身辐射是系统短波红外探测器主要的背景干扰辐射源,月球、大气辉光等辐射相比要小几个数量级,不做考虑.地球的峰值辐射在  $10 \mu\text{m}$  处,在小于  $2 \mu\text{m}$  的波段,地球辐射相对于太阳背景很小,可以不考虑;而太阳光谱在  $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$  范围内辐射较强,是系统工作波段主要的背景辐射.

本文针对天基激光告警系统中的太阳辐射问题,分别研究了反射太阳光对系统目标成像信噪比和威胁激光检测的影响情况,直射太阳光成像光斑对威胁激光判定和系统探测器自身安全的问题.

## 1 系统结构

天基激光告警系统的探测目标为对卫星实施攻击的激光,反卫星激光可以分为两类:一类是攻击前的信标激光(用于瞄准和测距),通常为脉冲型;另一类是实施攻击的强激光,一般采用连续性.针对卫星的主要威胁激光有<sup>[6]</sup>: COIL ( $1.315 \mu\text{m}$ )、HF ( $2.7 \mu\text{m}$ )、DF ( $3.8 \mu\text{m}$ )、CO<sub>2</sub> ( $10.6 \mu\text{m}$ ).综合考虑激光器输出功率、光束准直难度、大气传输效率等多方面因素,目前技术较为成熟的是  $1.315 \mu\text{m}$  COIL.

成像型天基激光告警系统的结构如图 1.

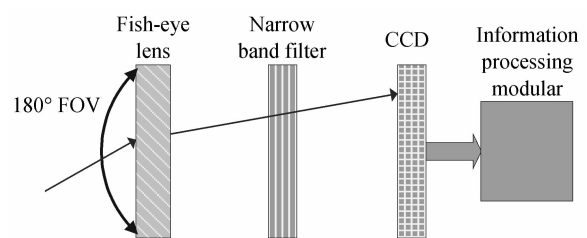


图 1 告警系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of the laser warning system

鱼眼透镜的超大视场,可覆盖半球空域,实现凝视探测,收集半球空域内任意方位的来袭激光并发出受攻击告警;窄带滤光片滤除杂散光,降低虚警率,实现对特定波长的告警;成像探测器像元密度

基金项目:国防 XX(No. 513210XXX)项目资助

第一作者:董红军(1986—),男,工程师,博士研究生,主要研究方向为光电对抗及红外图像处理. Email: dhjoptics@126.com

收稿日期:2010-10-12;修回日期:2010-11-21

大,单像元尺寸小,通常为微米量级,可以实现对激光威胁源的精确定向.本文探测系统告警波长  $1.315\ \mu\text{m}$ ,宿主卫星轨道高度  $420\ \text{km}$ ,系统短波红外鱼镜头视场为  $180^\circ$ ,镜头的平均光谱透过率约  $70\%$ ,探测器光学轴向正对地心.滤光片中心波长  $1.315\ \mu\text{m}$ ,峰值透过率约为  $85\%$ .CCD 响应区域面积  $9.6\ \text{mm} \times 7.68\ \text{mm}$ ,单个像元尺寸  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ .

## 2 攻击激光成像分析

攻击激光经过大气传输达到卫星位置,在卫星处的光斑远大于镜头的集光孔径,镜头可认为完全被强度均匀分布的平面波充满,通过圆形孔径光阑接收符合夫琅禾费衍射理论,入射光通过光阑后聚焦形成艾里斑.攻击激光束的发散角极小,成像焦斑是大气湍流效应和镜头聚焦的综合结果,焦平面上象点的大小主要由衍射角弥散、大气湍流和鱼镜头象差决定.

衍射角弥散值:  $\sigma_d = 1.22\lambda/D$ ,  $\lambda$  为入射激光波长,  $D$  为系统入瞳直径.

光学系统像差:鱼镜头属于大像差系统,其像差  $\sigma_a$  一般为衍射角弥散值的 4 倍.

大气湍流影响<sup>[7-8]</sup>:湍流对光束的扩展是瞬时光束扩展和光束漂移的综合效应.考虑中等湍流情形,湍流引起光斑漂移造成的倾斜方差  $\sigma_t$  约为  $7.25 \times 10^{-6}\ \text{rad}$ ,大气湍流引起瞬时光束扩展产生的视宁度  $\sigma_s$  为  $1.6 \times 10^{-5}\ \text{rad}$ .

则入射激光像点的角半径为

$$\delta = \sqrt{\sigma_d + \sigma_a + \sigma_t + \sigma_s} \quad (1)$$

入射激光像点直径为

$$d_1 = 2f \cdot \delta \quad (2)$$

式中,  $f$  为镜头焦距,代入数据得入射激光像点直径为  $26.5\ \mu\text{m}$ .攻击激光在轴向正入射的理想情况下,激光束被告警系统接受后聚焦到直径  $26.5\ \mu\text{m}$  的光斑范围,小于 CCD 面阵单个像元尺寸,考虑到入射激光能量较大时,像点中心所在像元的灰度逐渐饱和并向四周扩散,引起周围像素灰度值的变化,最终在探测器像面上形成的是一定大小的弥散斑<sup>[9]</sup>.

## 3 太阳辐射对告警系统影响分析

### 3.1 太阳与告警系统位置关系研究

一般情况下,星载对地探测器较小的视场保证了其能够避免太阳光的直接照射.而对于本文的探测系统,由于鱼镜头  $180^\circ$  的大视场,在卫星运行轨道的部分时间内,太阳能够进入系统视场,直射太

阳光辐照探测器将是不可避免的情况.太阳、告警系统相对位置关系如图 2.

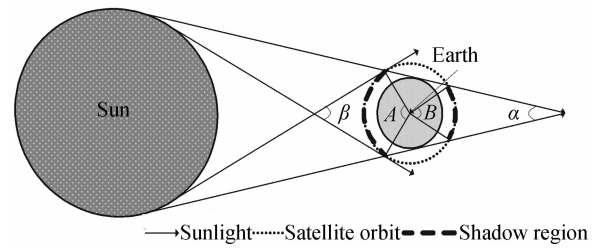


图 2 太阳与告警系统相对位置关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram for relative position of sun and laser warning system

探测器光学轴向正对地面,当卫星运行到地球阴影区即  $\angle B$  对应轨道区域时,太阳完全被地球遮蔽,直射太阳光和地球反射太阳光均不在系统视场内,太阳对系统探测器没有影响.卫星运行到  $\angle A$  对应轨道时,探测器位于地球和太阳的中间且视场背向太阳,由于卫星自身所遮挡,直射太阳光不能进入探测器视场,地球反射太阳光在视场内.卫星在  $\angle A$  和  $\angle B$  之外的轨道区域,直射太阳光和反射太阳光都在探测器视场范围.通过几何关系可知

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{R_s - R_e}{R_{se}} \quad (3)$$

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{R_s + R_e + R_h}{R_{se}} \quad (4)$$

式中,  $R_s$  为太阳半径,  $R_e$  为地球半径,  $R_h$  为卫星轨道高度,  $R_{se}$  为日地平均距离,代入数据计算可得:  $\alpha = 9.22\ \text{mrad}$ ,  $\beta = 9.44\ \text{mrad}$ ,  $\angle A = 179.5^\circ$ ,  $\angle B = 138.6^\circ$ .

### 3.2 太阳辐照度计算

由普朗克黑体辐射公式和斯蒂芬-波尔兹曼定律可得,在波段  $(\lambda_1, \lambda_2)$  内宿主卫星处太阳的辐照功率密度为<sup>[10]</sup>

$$W_{ss} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \left(\frac{R_{se}}{R_s}\right)^2 \cos \theta d\lambda \quad (5)$$

$c_1$ 、 $c_2$  分别为第一第二辐射常量,  $T$  为太阳黑体温度,  $\theta$  为太阳天顶角.

天基短波红外系统的主要背景辐射是反射太阳光.反射太阳光主要是指地球大气的云层和尘埃对太阳光的反射,通常认为是均匀的漫反射,一般以地球大气对太阳辐射的反射率来表示.以全球平均而言,地球大气系统对太阳光谱的反射率通常取  $0.3$ <sup>[11]</sup>,由此得到探测器带宽内地球反射太阳光在入瞳处的辐照度为

$$W_{es} = 0.3W_{ss} \left[ \frac{R_e}{R_e + R_h} \right]^2 \quad (6)$$

当卫星运行在  $\angle A$  对应轨道区域到达日地连线

位置时,太阳天顶角为 $0^\circ$ ,此时探测器接收到的反射太阳光辐照度最强,由式(5)、(6)计算可得此时太阳辐照度为 $11.1\text{ mW/cm}^2$ .

### 3.3 反射太阳光对目标探测和成像信噪比的影响

卫星在地球阴影区之外的轨道位置时,地球反射太阳光是系统主要的背景辐射.通过系统光学窗口的漫反射太阳光辐照在探测器像面上,将均匀增加探测器成像的背景灰度值,降低目标成像对比度.探测器自身噪音相比背景太阳光噪音要小的多,其对信噪比的影响忽略<sup>[12-13]</sup>.系统带宽内的反射太阳光是影响天基激光告警系统信噪比的主要因素,探测器自身的噪音相比太阳辐射要小的多.

鱼眼镜头入瞳面积

$$S_D = \pi D^2 / 4 \quad (7)$$

根据实测的鱼眼镜头成像关系,若镜头的最大入射角为 $\omega_{\max}$ ,可以确定鱼眼镜头在CCD焦面上成像视场区域 $S_i$ 的直径 $d_i$ 为

$$d_i = 2f \sin \omega_{\max} \quad (8)$$

若镜头对太阳光透射率与激光相同,反射太阳光辐照在探测器上的能量密度为

$$E_n = W_{es} S_D \tau_t t_{int} / S_i \quad (9)$$

反射太阳光区域太阳天顶角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化, $0^\circ$ 时辐照最强,由式(9)计算可得反射太阳光辐照在探测器像面上的最大能量密度为 $0.97\text{ mJ/cm}^2$ .

威胁激光在探测器积分时间内的辐照能量密度为

$$\begin{cases} E_i = W_1 S_D \tau_t t_{int} / S_i & (\text{attack laser}) \\ E_i = E_d S_D \tau_t / S_i & (\text{beacon laser}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, $W_1$ 为攻击激光在相机入瞳处的功率密度, $E_d$ 为信标激光在入瞳处的能量密度, $S_i$ 为成像光斑面积, $\tau_t$ 为镜头的光谱透过率, $t_{int}$ 为CCD积分时间.

若CCD对入射激光和太阳光的量子效率相同,入射激光在探测器上成像的信噪比为

$$\text{SNR} = E_i / E_n \quad (11)$$

可见文献报道信标激光在卫星处的能量密度约 $10^{-1}\text{ }\mu\text{J/cm}^2$ ,致盲激光和毁伤激光对卫星的功率密度为 $10\text{ mW/cm}^2$ 、 $10\text{ W/cm}^2$ ,代入数据分别计算入射激光为信标激光、致盲激光和毁伤激光时的探测器成像信噪比,结果见表1.

表1 不同入射激光和天顶角时的成像信噪比  
Table 1 SNR of imaging spot for different threaten laser and solar zenith angle

Solar zenith angle/ $^\circ$	0	30	45	60	85
Beacon laser	0.037	0.043	0.052	0.074	0.42
Blinding laser	$7.4 \times 10^3$	$8.5 \times 10^3$	$10^4$		
Damage laser	$7.4 \times 10^6$	$8.5 \times 10^6$	$10^7$		

由分析计算可知,对于攻击激光而言,即使是能量较低的软杀伤性致盲激光,其在卫星处的功率密度和太阳辐照度也处于同一量级.再考虑系统对入射激光的光学增益约为 $10^4$ ,对反射太阳光增益为1,最终辐照在探测器像面上的激光能量密度要比反射太阳光大得多,天顶角 $0^\circ$ 时成像信噪比也在 $10^3$ 以上,反射太阳光产生的背景对攻击激光的探测基本没有影响.但对于信标激光,其通过光学系统后辐照在探测器像面上的能量密度在 $\text{mJ/cm}^2$ 量级,在太阳天顶角为 $85^\circ$ 时仍然略小于反射太阳光,成像信噪比始终小于1,反射太阳光产生的背景噪音将给信标激光探测造成很大的困难.本系统设计时在镜头之后添加了窄带滤光片,以目前商用窄带滤光片的性能指标,最多能够降低背景太阳光强度至十分之一,为了提高系统探测灵敏度和准确性,仍然需要采取有效的背景抑制措施进一步降低反射太阳光背景强度.

### 3.4 直射太阳光饱和问题及探测虚警

由3.1节的分析计算可知,在卫星轨道约九分之一的时间,太阳在探测器视场范围内,直射太阳光将在探测器像面上形成像斑.

太阳在卫星轨道位置对探测器的平均张角为: $\varphi = R_s / D_{se} = 9.3\text{ mrad}$ ,再考虑镜头像差和衍射角弥散,则直射太阳光通过鱼眼镜头聚焦在探测器上成像光斑的角半径为

$$\varphi = \sqrt{\sigma_d + \sigma_a + (\varphi/2)^2} \quad (12)$$

太阳成像光斑直径

$$d_s = 2f \cdot \varphi \quad (13)$$

计算得光斑直径为 $34.7\text{ }\mu\text{m}$ ,成像面积约 $1 \sim 2$ 个像元.与攻击激光成像光斑尺寸数据进行对比可知,太阳在探测器上的成像光斑与攻击激光相似.

考虑系统的光学增益和光谱透过率,太阳辐射通过鱼眼镜头聚焦在探测器上的光斑功率密度为

$$W_D = W_{ss} S_D \tau_t / S_s \quad (14)$$

由图2及 $\angle A$ 、 $\angle B$ 数据可知,直射太阳光在探测器视场内时,太阳天顶角 $\theta$ 的变化范围为 $69^\circ \sim 90^\circ$ ,代入数据计算可得 $69^\circ$ 时成像光斑功率密度达到 $20\text{ W/cm}^2$ ,探测器将饱和甚至出现像元损坏,必须要采取光谱滤波等措施抑制直射太阳光辐照能量,系统设计中的窄带滤光片对太阳辐射有一定的抑制效果,但并不能有效解决太阳光直射时的探测器饱和问题.

太阳成像光斑与攻击激光成像光斑形状和大小相似,与致盲性激光的功率密度也差不多,太阳辐照的连续性特征与攻击激光也一致,这使得在检测攻击激光光斑时无法通过帧相减的方式对太阳和入射

激光加以区分,将对攻击激光判定造成严重干扰,引起系统虚警.系统需要采取有针对性的虚警抑制措施区分太阳光斑和攻击激光光斑,消除直射太阳光成像对系统探测的影响.

## 4 结论

大视场成像型天基激光告警系统的研制是当前光电对抗技术发展和卫星防护课题的迫切要求,它能够实现对潜在卫星威胁激光的全向凝视感知与定向,提高卫星的生存能力.本文分析了太阳对天基激光告警系统结构设计及目标探测的影响,通过太阳与告警系统位置关系研究、攻击激光成像分析、太阳辐照度及系统成像信噪比计算,得到:1)太阳辐射是天基激光告警系统的主要背景辐射,地球反射太阳光是系统的主要成像背景光噪音,反射太阳光辐照在探测器像面上的最大能量密度为  $0.97 \text{ mJ/cm}^2$ . 反射太阳光背景下,攻击激光在探测器上的成像信噪比在  $10^3$  以上,反射太阳光对攻击激光光斑检测基本没有影响;对于信标激光,成像信噪比始终小于 1,反射太阳光是强背景,需要采取有效的背景抑制措施和目标检测方法提高成像信噪比和探测概率. 2)太阳光直射探测器是大视场天基激光告警系统不可避免的情况,在卫星轨道约九分之一的时间内,太阳进入探测器视场范围.太阳成像光斑功率密度最大时约  $20 \text{ W/cm}^2$ ,将导致探测器像元饱和甚至损坏,需要采取相应防护措施;太阳成像光斑特征与入射激光相似,会造成系统虚警,需要采取有效措施克服,确保告警准确性. 3)信标激光和攻击激光入射能量密度及成像信噪比差异很大,要求系统有很宽的探测动态范围.合理设计系统的探测灵敏度和损伤阈值,既能有效探测威胁激光,同时又保障激光探测告警系统本身的安全,是天基激光告警系统优化设计的关键问题.

### 参考文献

- [1] HILLAND D H, PHIPPSET G S, JINGLE C M. Satellite threat warning and attack reporting[C]. *Proceedings IEEE Aerospace Conference*, 1998: 207-217.
- [2] YI Ming, WANG Xiao, WANG Long. Status quo and trend of American army of electro-optic countermeasure technology and equipment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5): 601-607.  
易明,王尧,王龙.美军光电对抗技术、装备现状与发展趋势初探[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(5): 601-607.
- [3] 王永仲. 现代军用光学技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 355-380.
- [4] WU Xin-yu, CHENG Yong-jun, ZHANG Hua-da, et al. Large field laser detection and warning technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(7): 5-7.  
吴新宇,陈拥军,张华达,等. 大视场激光探测与告警技术[J]. *光电工程*, 2004, **31**(7): 5-7.
- [5] XU Yuan-nan, ZHAO Yuan, JIN Chen-fei, et al. Design of the imaging satellite-borne laser warning system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(S3): 357-360.  
许元男,赵远,靳辰飞,等. 一种成像型星载激光告警系统的设计[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(S3): 357-360.
- [6] LI Fa-quan, CHENG Xue-wu, YANG Yong, et al. Technique requirement analysis of satellite borne threat laser detecting warning[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(S3): 331-334.  
李发泉,程学武,杨勇,等. 星载威胁激光探测告警的技术需求分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(S3): 331-334.
- [7] 苏毅,万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 135-143.
- [8] WANG Ren-li, HAO ZHEN-chun, CHEN Bo, et al. Effect of atmospheric turbulence on image ground-resolution of space-based remote sensing system [J]. *Journal of Geomatics Science And Technology*, 2009, **26**(2): 114-117.  
王仁礼,郝振纯,陈波,等. 大气湍流对天基遥感系统地面分辨率的影响[J]. *测绘科学技术学报*, 2009, **26**(2): 114-117.
- [9] YING Jia-ju, WANG YONG-zhong, HE Yong-qiang, et al. An algorithm for laser spot precise locating in omni-directional laser warning system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, **16**(12): 53-56.  
应家驹,王永仲,何永强,等. 全向激光告警系统中激光光斑精确定位方法[J]. *电光与控制*, 2009, **16**(12): 53-56.
- [10] ZHANG Hai-hong, WANG Jian-yu, Shu Rong, et al. Effects of solar radiation on the receiver of near infrared laser altimeter[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **25**(4): 426-428.  
张海洪,王建宇,舒嵘,等. 太阳辐射对近红外激光高度计接收系统的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(4): 426-428.
- [11] WU Zhen-sen, DOU Yu-hong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1250-1254.  
吴振森,窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1250-1254.
- [12] ZHANG Ji-long, WANG Ming, TIAN Er-ming, et al. Analysis and experimental verification of sensitivity and snr of laser warning receiver [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(1): 20-23.  
张记龙,王明,田二明,等. 激光告警接收机灵敏度和信噪比分析及实验验证[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(1): 20-23.
- [13] XU Meng, FENG Qi, WEI Jun. The calculation of SNR in SWIR detector system for applications remote sensing [J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(10): 588-590.  
徐蒙,冯旗,危峻. 遥感应用中短波红外探测器系统的信噪比计算[J]. *红外技术*, 2006, **28**(10): 588-590.

## Effects of Sun on Imaging Space-Based Laser Detection System

DONG Hong-jun, ZHOU Zhong-liang

(*Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China*)

**Abstract:** In view of the problem of solar radiation in the imaging space-based laser warning system, the effects of sunlight on the infrared detector of warning system were studied by theoretical analysis and numerical calculation. On the basis of analysis of the different spatial relationship of sun and detector, the influences of direct sunlight and sunlight reflected by earth to the signal to noise ratio (SNR) of infrared image, laser threat detection, the detector safety were investigated respectively. The results show that the sunlight is the mainly background radiation to space-based laser warning system. The sunlight reflected by earth is the main imaging background light of system's near infrared detector, and the maximum energy density of reflected sunlight exposing the CCD is  $0.97 \text{ mJ/cm}^2$ . In the reflected sunlight background, the SNR of attack laser image exceeds  $10^3$ , for the beacon laser is always below 1. While the reflected sunlight has no effect on attack laser detection, but it is strong background interference to the beacon laser detection. The sunlight direct exposure detector is unavoidable to the warning system. As the maximum energy density of the sun imaging spot is about  $20 \text{ W/cm}^2$ , it will lead to the pixel of CCD saturation or even damaged. Since the imaging spot of sun is similar to the laser, direct sunlight will cause serious false alarm.

**Key words:** Electro-optic countermeasure; Laser warning technology; Spot; Signal to noise ratio