

天基激光探测厘米级空间碎片建模仿真研究

康博琨,金星,常浩

(装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室,北京 101416)

摘要:厘米级空间碎片激光探测技术逐渐成为研究热点。利用天基平台搭载激光探测系统,建立了激光探测空间碎片基本模型,通过选择特定波长激光、天基平台轨道及探测器定位方式,将背景噪声的影响降低在可实现单次探测成功的范围内;研究了探测距离、碎片尺寸随系统探测概率的变化规律,以及可实现的最小探测功率和最远探测距离;通过改变空间碎片直径与发射激光平均功率,研究其对探测距离的影响。研究表明,在现有条件下,通过对环境噪声的过滤与天基平台轨道的选择,可实现 50 km 处厘米级空间碎片的激光探测,而探测概率可达 90% 以上。通过上述基本问题的研究,为进一步实现空间碎片激光探测系统全过程仿真分析及清除过程建模仿真研究奠定基础。

关键词:空间碎片; 天基激光; 探测概率; 探测距离

中图分类号: V416.5; TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.S229003

Modeling and simulation of space based laser centimeter orbital debris detection

Kang Bokun, Jin Xing, Chang Hao

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Using the way of laser in centimeter orbital debris detection has been the hot research topic. According to space based laser detection system, a basic model of centimeter orbital debris detection was established, with selecting a particular wavelength laser, space-based platform orbital parameter and position mode of detector to reduce background noise realizing once successful detection. The relationship between the detection range, the size of debris and detection probability, the minimum detection power and the furthest distance of the system was discussed. By changing the diameter of orbital debris and laser average power, the study of effect on detection range was discussed in detail. The researches show that under the existing conditions, it can be realized that 50 km distance detection of centimeter space debris with exceeding 90% detection probability, through the filtering of environment noise and selecting of space-based platform parameter. Based on above discussion, it can provide solid basis for the future modeling and simulation research of space based laser centimeter orbital debris detection and removal.

Key words: orbital debris; space based laser; detection probability; detection range

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(11502301)

作者简介: 康博琨(1992-), 男, 硕士生, 主要从事激光探测空间碎片技术方面的研究。Email: kangbokun@126.com

导师简介: 金星(1962-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光航天应用技术方面的研究。Email: jinxing_beijing@sina.com

0 引言

空间碎片作为人类航天的产物,伴随着一次次发射任务而产生,与航天技术的更新换代一样一直受到广泛关注。随着航天事业的发展,空间碎片的分布和数量也与日俱增,根据最新数据显示,对航天器威胁最大的厘米级空间碎片数量已达 670 000 个,严重威胁到在轨航天器的安全^[1]。

激光光源具有准直性强、相干性好、功率密度大的特点,在空间碎片的清除中发挥了重要作用。通过激光辐照空间碎片,烧蚀并产生反喷物质推动碎片离开原有轨道,一般情况下使其降轨并进入大气层烧毁^[2-3]。为实现空间碎片清除,对其进行探测定位与跟踪瞄准是第一步^[4-6],对于能够使用激光清除的厘米级空间碎片,实现清除的前提是发现并对碎片的轨道进行预估,通过激光参数的设定使碎片能够按照预定的速度增量变轨,达到最佳的清除效果。

目前针对空间碎片的激光清除,国外有 ORION 计划^[7]、CLEANSPACE 计划^[8]、ICAN 计划^[9],其中都对如何探测定位做了说明,不论是地基大功率激光器直接探测还是天基小功率激光器与光学观测结合,对空间碎片的探测定位都包括三个步骤:一是大范围扫描与定位阶段,对空间视场进行扫描,通过接收回波信号判断是否存在空间碎片;二是追踪瞄准阶段,一方面探测器将扫描范围缩小至碎片周边的小范围,进行实时跟踪,另一方面通过激光辐照该区域,开始激光清除过程;三是毁伤评估阶段,一般跟随清除激光发射,目的是探测碎片是否按照预定方向运动预定距离,即是否进入预定区域。

目前已有天基探测空间非合作目标的模型基础^[10],Phipps 给出了可能进行空间碎片激光探测的天基平台轨道参数^[11-12],Quinn 等人模拟了天基平台的载荷分布并给出了参数设计^[13-14],而针对天基激光探测空间碎片的模型与仿真分析还亟待解决。文中在分析激光探测空间碎片过程的基础上,分别选择了激光器、探测器与系统参数,对可能影响探测效果的参数进行了分析,完成了激光单次探测空间碎片仿真,为进一步完成空间碎片天基激光探测系统全过程仿真分析建立了基础。

1 仿真模型建立

1.1 激光雷达基本方程

假设激光发射通过半径为 r 的镜面,激光出射时横截面直径与发射/接收天线孔径相同,则可以认为辐射源为圆盘,距离为 R 处空间碎片所受到的激光辐照密度为:

$$E_s = \frac{P \cos \theta}{S} T_a \quad (1)$$

式中: P 为发射激光平均功率; θ 为辐射源法线与目标反射法线所夹角; S 为一定距离处激光辐照面积; T_a 为发射激光路径透过率,太空中可认为 $T_a=1$ 。

若发射激光的远场发散半角为 i ,则

$$S = \pi(r + R \tan i)^2 \quad (2)$$

目标为球体,但距离较大时可认为激光在目标表面的辐照与形状无关,假设在激光辐照范围内的空间碎片为极微小平面,满足余弦漫反射定律,反射率为 ρ ,则探测器接收孔径的激光辐照功率为:

$$E_r = \frac{\rho E_s \cos \theta}{\pi} dS_1 \quad (3)$$

假设探测器有效接收截面积为 A ,目标面积元对激光雷达接收望远镜所张立体角为:

$$\Omega = \frac{A}{R^2} = \frac{\pi r^2}{R^2} \quad (4)$$

由以上各式可得目标面积元的漫反射回波信号功率为:

$$dP_r = T_r \cdot T_a \cdot dI \cdot \Omega = \frac{\rho \cdot \Omega \cdot \cos \theta \cdot E_s}{\pi} \cdot T_r \cdot T_a \cdot dS_1 \quad (5)$$

式中: T_r 为激光雷达光学系统透过率。

假设激光在距离为 R 处的远场光斑截面 $S > S_1$,且空间碎片侧表面均处在激光辐照范围内,沿目标漫反射表面 S_1 积分,得到激光雷达接收的信号光功率为:

$$P_r = \frac{D^2 \cdot T_r \cdot \rho \cdot S_1 \cdot \cos^2 \theta}{4\pi R^2 (r + R \tan i)^2} \cdot T_a^2 \cdot P \quad (6)$$

1.2 系统探测噪声计算

天基平台激光器探测空间碎片,其噪声来源主要包括两个方面,一是由探测器自身引起的噪声,包括散弹噪声和热噪声,二是由于背景光在目标碎片辐射而产生的反射光被探测器接收产生的噪声。

(1) 散弹噪声

$$i_d = M^{\frac{n}{2}} \sqrt{2e(\mathcal{R}_i P_r + i_D) B_N} \quad (7)$$

式中： B_N 为噪声等效带宽； i_D 为探测器的暗电流； n 为与探测器材料有关的系数，对于硅材料雪崩二极管 $2.3 < n < 2.5$ 。

(2) 热噪声

电子元件中电子热运动产生的噪声，起主要作用的是光电二极管的负载电阻的热噪声，计算公式为：

$$i_{nt} = \sqrt{\frac{4kTB_N}{R_1}} \quad (8)$$

式中： k 为波尔兹曼常数； T 为探测器负载电阻温度； R_1 为探测器负载电阻。

(3) 背景噪声

$$i_B = \mathcal{R}_i W_s \quad (9)$$

式中： W_s 为背景光功率，包括太阳辐射功率与地球-大气系统反射太阳光功率，由于背景光噪声与发射激光波长、天基平台轨道有关，将在下节中具体描述。

探测器信号电流可由下式计算

$$i_s = \frac{MP_r \eta e}{h\nu} \quad (10)$$

式中： P_r 为探测光敏面接收到的功率； η 为探测器量子效率； h 为普朗克常数； ν 为激光频率； M 光电探测器的倍增因子，令 $\mathcal{R}_i = \frac{\eta e}{h\nu}$ ，定义其为电流响应度，则

$$i_s = M \mathcal{R}_i P_r \quad (11)$$

系统信噪比为：

$$SNR = \frac{i_s^2}{i_d^2 + i_{nt}^2 + i_B^2} = \frac{M^2 \mathcal{R}_i^2 P_r^2}{M^n \cdot 2e(\mathcal{R}_i P + i_D) B_N + 4ktB_N/R_1 + \mathcal{R}_i^2 W_s^2} \quad (12)$$

1.3 系统探测概率及虚警率计算

用于空间探测的激光雷达，其探测概率定义为有回波信号时信号与噪声之和大于探测阈值的概率，虚警率定义为无回波信号时噪声辐值大于探测阈值的概率。

当有回波信号时系统输入电流为：

$$I_1 = i_s + i_d + i_{nt} + i_B \quad (13)$$

当无回波信号时系统输入电流为：

$$I_0 = i_{nt} + i_B + \sqrt{2e i_D B_N M^n} \quad (14)$$

已知大量光电子噪声概率密度函数可用高斯概率密度函数来描述，则激光雷达探测概率密度为：

$$\varphi_1(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} \exp\left(-\frac{(I-I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (15)$$

式中： σ_1^2 为有回波信号时信号和噪声方差

$$\sigma_1^2 = i_s^2 + i_d^2 + i_{nt}^2 + i_B^2 \quad (16)$$

虚警概率密度为：

$$\varphi_0(I) = \frac{1}{\sqrt{2} \sigma_0} \exp\left(-\frac{(I-I_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) \quad (17)$$

式中： σ_0^2 为无回波信号时的噪声方差

$$\sigma_0^2 = i_{nt}^2 + i_B^2 + 2e i_D B_N M^n \quad (18)$$

则系统探测概率为：

$$P_d = \int_{I_m}^{\infty} \varphi_1(I) dI = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} \int_{I_m}^{\infty} \exp\left(-\frac{(I-I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) dI \quad (19)$$

式中： I_m 为探测阈值电流，虚警率为：

$$P_f = \int_{I_m}^{\infty} \varphi_0(I) dI = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_0} \int_{I_m}^{\infty} \exp\left(-\frac{(I-I_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) dI \quad (20)$$

定义余补误差函数

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-z^2) dz \quad (21)$$

系统探测概率和虚警率可写为：

$$P_d = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{I_m - I_1}{\sqrt{2} \sigma_1}\right) \quad (22)$$

$$P_f = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{I_m - I_0}{\sqrt{2} \sigma_0}\right) \quad (23)$$

1.4 最小可探功率计算

由系统探测概率定义与虚警率定义可知，要求探测概率大于其最小值，虚警率小于其最大值，即

$$P_d = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{I_m - I_1}{\sqrt{2} \sigma_1}\right) \geq a \quad (24)$$

$$P_f = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{I_m - I_0}{\sqrt{2} \sigma_0}\right) \leq b \quad (25)$$

式中： a 为系统探测概率最小值； b 为系统虚警率最大值。

由余补误差函数性质得

$$\frac{I_m - I_1}{\sqrt{2} \sigma_1} \leq \alpha \quad (26)$$

$$\frac{I_m - I_0}{\sqrt{2} \sigma_0} \geq \beta \quad (27)$$

式中： α, β 分别为取探测概率最小值和虚警率最大值时的自变量值。

整理公式(26)、(27)得

$$\sqrt{2} \sigma_0 \cdot \beta + I_0 \leq I_m \leq \sqrt{2} \sigma_1 \cdot \alpha + I_1 \quad (28)$$

2 仿真参数设定

2.1 激光器

对于天基激光探测空间碎片，首要解决的是背

景噪声的问题,太阳直接辐射和地球-大气系统反射占有所有噪声中的绝大部分,需要采取措施减小其对信号光接收的影响。

已知太阳辐射亮度与波长和温度的关系

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} \quad (29)$$

太阳可看作是温度为 5 770 K 的黑体,以其辐射波长为自变量,辐射亮度为因变量可得到图 1 所示的曲线。

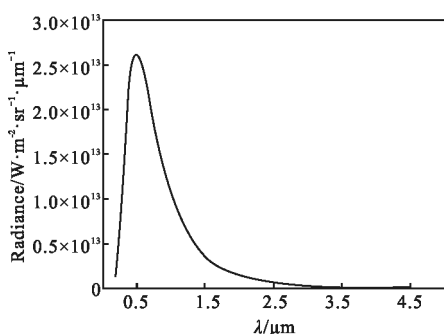


图 1 太阳辐射光谱图

Fig.1 Solar radiation spectrum

由图 1 可知太阳辐射波长极值约为 $\lambda_m=0.5 \mu\text{m}$,为降低太阳辐射的影响,在较为常用的激光器中选择波长合适的激光器,计算不同波长处太阳辐射的能量与总能量比值如表 1 所示。

表 1 太阳辐射中不同波长能量占比

Tab.1 Energy ratio of different wavelengths in the sun radiation

Wavelength/nm	Energy ratio
$\lambda=355$	1.89%
$\lambda=1\ 064$	0.093%
$\lambda=1\ 552$	0.034%

采用波长 $\lambda=1\ 552 \text{ nm}$ 激光作为发射激光,则背景光中太阳辐射功率为 $E_r=0.0034 \cdot C_s A_R$,地球-大气系统反射 30% 的太阳辐射,即 $E_b=0.3E_r$,其中 $C_s=1\ 367 \text{ W/m}^2$ 为太阳常数,则背景光噪声功率为 $E_{\text{total}}=E_r+E_b$ 。另外采用在接收器前加装滤光片的方式,将 $1\ 552 \text{ nm}$ 的激光高透过,使其他波长的背景光(紫外光、可见光以及近红外光)全部截止,透过滤光片的等效功率可表示为 $W_s=2E_{\text{total}}\Delta\lambda$,其中 $\Delta\lambda$ 为滤光片半峰半宽,综合给出激光器参数如表 2 所示。

表 2 激光器参数

Tab.2 Laser parameter

Parameter	Value
Laser wavelength/nm	$\lambda=1\ 552$
Laser beam angle/ μrad	$i=0.05$
Transmitting (acceptance) aperture/m	$r=2.5$
Optical transmittance system	$T_r=0.8$
Target reflectivity	$\rho=0.8$

2.2 探测器

根据响应元的物理效应不同,探测器主要分为热敏型探测器和光子型探测器,前者主要通过吸收红外辐射使温度升高而产生电信号,后者主要通过直接吸收辐射光子能量发生电子运动产生电信号。在天基平台探测空间碎片过程中,由于需要通过系统温度控制保证其他部件正常工作,使用光子探测器更为合适。雪崩光电二极管(APD)灵敏度高,适用于微弱光信号的探测和接收,可以用于激光探测空间碎片,综合给出探测器参数如表 3 所示。

表 3 探测器参数

Tab.3 Detector parameter

Parameter	Value
Operating wavelength/ μm	$\lambda=1.552$
Dark current/nA	$i_D=0.2$
Responsivity/ $\mu\text{A} \cdot \mu\text{W}^{-1}$	$R_r=0.5$
Multiplication coefficient	$M=1\ 000$
Response time/ns	$t=0.3$
Excess noise figure	$n=2.4$
Load resistance/ Ω	$R_l=1\ 000$
Load resistance temperature/K	$T=293$
Noise equivalent bandwidth/kHz	$B_N=300$

2.3 天基平台

根据空间碎片轨道分布与清除需求,位于低轨的航天器受到厘米级空间碎片的威胁最大,考虑天基平台位于低轨,轨道高度约 500 km,主要针对轨道高度低于天基平台的空间碎片进行探测,因而可以将激光雷达探测器接收面对地定位,这样可以不考虑太阳的直接辐射噪声,同时地面杂波的波长范围不在探测器前加装的滤光片波长范围内,不考虑地面杂波,仅考虑地球-大气反射辐射噪声,平台轨道

参数如表 4 所示。

表 4 天基平台轨道参数

Tab.4 Space-based platform orbit parameter

Parameter	Value
Apogee altitude/km	818
Perigee altitude/km	426
Orbital inclination/(°)	$i=90$
Eccentricity ratio	$e=0.028$
Perigee argument/(°)	$\omega=-180$

3 仿真结果分析

已知探测过程的两个重要参数为探测距离与探测概率(虚警率),文中将探测距离作为衡量探测效果的参数进行分析。

3.1 最小可探功率及探测距离

假设探测概率变化范围 0.999 9~0.000 1,虚警率变化范围 0.001~0.05,代入系统其他参数,可得系统最小可探功率的变化如图 2~3 所示。

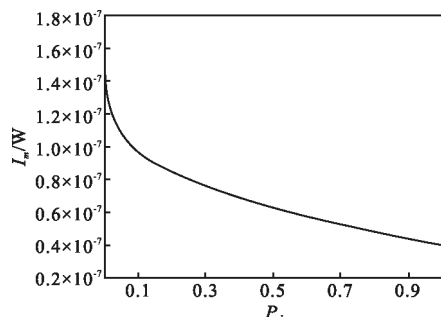


图 2 系统最小可探功率与探测概率关系

Fig.2 Relationship between the minimum detecting power and detection probability of the system

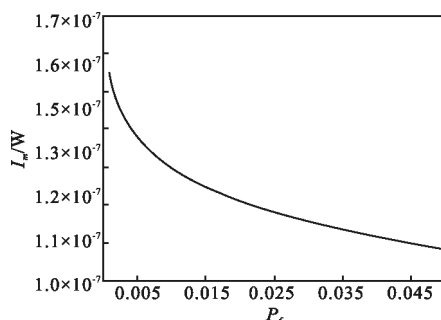


图 3 系统最小可探功率与虚警率关系

Fig.3 Relationship between minimum detecting power and false alarm rate of the system

以探测概率分析为例,可以看出随探测概率的增大,系统最小可探功率逐渐减小,二者之间是单调变化的关系,当探测概率取最大值 99.99%时,系统最小可探功率取得最小值 $3.932 \times 10^{-8} \text{W}$,基本符合 APD 雪崩二极管的探测阈值,为了能使系统保持 90%以上的探测概率,探测阈值取值需在 $4.3737 \times 10^{-8} \text{W}$ 以下。

假设目标直径 0.1m,发射激光平均功率 100kW,可得系统探测距离的变化如图 4、图 5 所示。

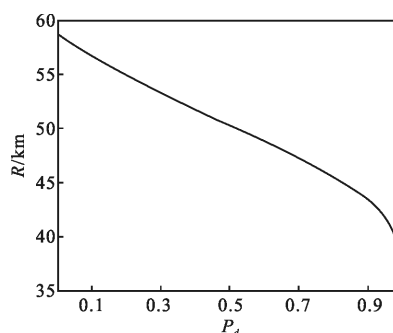


图 4 系统探测距离与探测概率关系

Fig.4 Relationship between detecting range and detection probability of the system

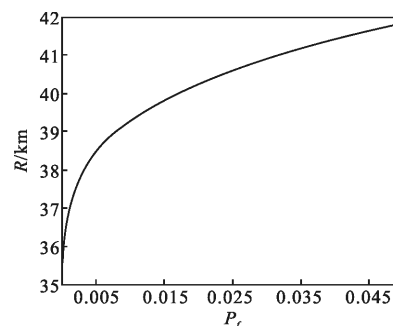


图 5 系统探测距离与虚警率关系

Fig.5 Relationship between detecting range and false alarm rate of the system

同样以探测概率分析为例,可以看出随探测概率的增大,系统可探距离逐渐减小,二者之间也是单调变化的关系,当探测概率取最大值 99.99%时,系统最大探测距离为 35.318 2 km,为了使系统保持 90%以上的探测概率,目标距离不能超过 43.427 7 km。

3.2 目标尺寸对系统探测效果的影响

选择探测概率作为自变量,假设发射激光平均功率 100kW,在目标尺寸不同时系统探测距离的变化如图 6 所示。

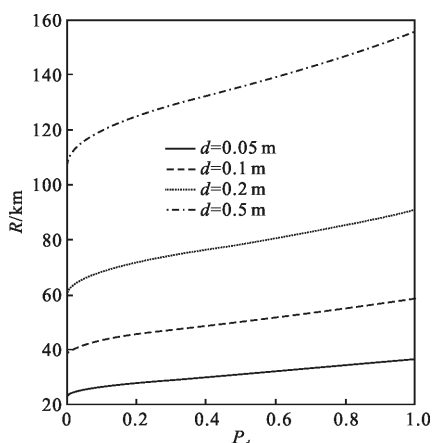


图 6 目标尺寸对系统探测距离的影响

Fig.6 Target size effect on detection range of the system

当探测距离相同时,目标直径越大,系统的探测概率越大,而当系统探测距离相同时,目标直径越大,可探距离越大。在探测概率相同,目标直径成倍增加时,由图可以看出探测距离的增加值也逐渐增大,当探测概率为 80% 时,直径 0.05 m 目标的可探距离为 27.932 8 km,直径 0.1 m 目标的可探距离为 45.5603 km,直径 0.2 m 目标的可探距离为 71.6049 km,直径 0.4 m 目标的可探距离为 109.313 1 km。

3.3 发射激光功率对系统探测效果的影响

同样选择探测概率为自变量,假设目标直径 0.1 m,在发射激光平均功率不同时系统探测距离的变化如图 7 所示。

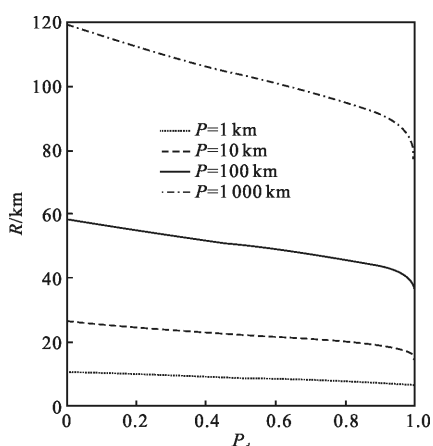


图 7 发射激光平均功率对系统探测距离的影响

Fig.7 Effect of average power of laser on detection range of the system

当探测距离相同时,发射激光平均功率越大,系统的探测概率越大,当系统探测概率相同时,发射激

光平均功率越大,可探距离越大。与 3.2 节相同,在探测概率相同,发射激光平均功率以十倍增大时,可以看出探测距离的增加值也逐渐增大,当探测概率为 80% 时,发射激光平均功率 1 kW,可探距离为 7.563 4 km;发射激光平均功率 10 kW,可探距离为 19.714 2 km;发射激光平均功率 100 kW,可探距离为 45.560 3 km,发射激光平均功率 1000 kW,可探距离为 94.966 9 km。

4 总结

文中在激光探测空间非合作目标的基础上,给出了天基激光探测空间碎片的基本方程,计算了系统探测噪声和探测概率、探测阈值,针对天基平台的特殊性给出了激光波长的选择以及背景噪声的处理方法,同时分析了探测阈值随系统探测概率与虚警率变化的关系、目标尺寸以及发射激光平均功率对探测效果的影响。得出结论如下:

(1) 系统探测概率直接影响探测阈值,二者之间的变化关系呈单调性,在保持系统探测概率 90% 以上时,探测阈值存在极大值 $4.3737 \times 10^{-8} \text{ W}$ 。同时,在给定目标尺寸和发射激光平均功率的条件下,探测距离随探测概率的增大逐渐减小,要保持系统探测概率 90% 以上,目标距离不得超过其极大值 43.427 7 km。

(2) 目标尺寸对探测效果有明显的放大趋势,即在一定探测概率前提下,当目标直径超过 20 cm 时,其探测距离与目标直径为 10 cm 的探测距离相比增加值非常明显。

(3) 发射激光平均功率对探测效果也有明显的放大趋势,随着发射激光平均功率的不断增大,这种影响也有明显放大的趋势,当发射激光平均功率超过 100 kW 时,其探测距离与发射激光平均功率 10 kW 相比增加值非常明显。

仿真结果表明,天基激光探测空间碎片作为一种针对厘米级空间碎片探测的新方法,在保证系统探测概率 90% 的基础上,可以实现 50 km 左右的探测距离,同时增大探测距离的可行性是存在的。

参考文献:

[1] Lin Laixing. Status and removal of space debris[J]. *Spacecraft Engineering*, 2012, 21(3): 1-10. (in Chinese)

- 林来兴. 空间碎片现状与清理 [J]. 航天器工程, 2012, 21(3): 1-10.
- [2] Hong Yanji, Jin Xing, Chang Hao. Discussion of key problems in space based laser centimeter orbital debris removal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 1-6. (in Chinese)
洪延姬, 金星, 常浩. 天基平台激光清除厘米级空间碎片关键问题探讨[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 1-6.
- [3] Shen S, Jin X, Hao C. Cleaning space debris with a space-based laser system [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(4): 805-811.
- [4] Jiang Huilin, Fu Qiang, Zhang Yalin, et al. Discussion of the laser ranging with polarization spectral imaging observations and communication technology for space debris [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 1-7. (in Chinese)
姜会林, 付强, 张雅琳, 等. 空间碎片激光探测成像通信一体化技术探讨[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 1-7.
- [5] Xue Guogang, Sun Dongsong, Yang Zhao. Modeling and performance simulation of direct detection laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(3): 244-247. (in Chinese)
薛国刚, 孙东松, 杨昭. 直接探测激光雷达模型及其性能模拟[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(3): 244-247.
- [6] Liu Chunbo, Zhao Shaobo, Han Xiang'e. Detection of space debris of centimeters in size viaspaceborneladar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1244-1248. (in Chinese)
刘春波, 赵少博, 韩香娥. 危险空间碎片的天基激光雷达探测[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1244-1248.
- [7] Campbell J W. Project ORION: orbital debris removal using ground-based sensors and lasers [R]. US: NASA's Technology, Research and Science, 1996.
- [8] Esmiller B, Jacquelard C, Eckel H A, et al. Space debris removal by ground-based lasers: main conclusions of the European project CLEANSPACE [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(31): I45-I54.
- [9] Soulard R, Quinn M N, Tajima T, et al. ICAN: A novel laser architecture for space debris removal [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105(1): 192-200.
- [10] He Chudong. The research of short pulse laser detection technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
何初冬. 短脉冲激光探测技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [11] Phipps C R. A laser-optical system to re-enter or lower low Earth orbit space debris[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93(1): 418-429.
- [12] Phipps C R. L'ADROIT -A spaceborne ultraviolet laser system for space debris clearing[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 104(1): 243-255.
- [13] Quinn M N, Jukna V, Ebisuzaki T, et al. Space-based application of the CAN laser to LIDAR and orbital debris remediation [J]. *European Physical Journal Special Topics*, 2015, 224(13): 2645-2655.
- [14] Ebisuzaki T, Quinn M N, Wada S, et al. Demonstration designs for the remediation of space debris from the International Space Station[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 112: 102-113.