

空间碎片天基激光辐照下的轨道特性仿真分析

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: 厘米级空间碎片对在轨航天器的威胁极大, 高能激光辐照使其降轨进入大气层烧毁是近年来的研究热点。针对空间站附近厘米级空间碎片, 利用天基平台搭载高能激光器, 提出了多脉冲激光降轨的计算方法。仿真结果表明, 天基平台激光清除厘米级空间碎片的前提是空间碎片处于“清除窗口”, “清除窗口”的选择是能否实现空间碎片降轨的关键; 根据已有的激光器及天基平台参数, 空间碎片多脉冲激光降轨可以达到清除效果; 多脉冲降轨结果表明, 空间碎片偏心率变化较大, 造成其半长轴与远地点变化幅度很小而近地点变化幅度很大, 而轨道倾角变化幅度很小; 当降轨幅度相同时, 需要施加的多脉冲速度增量总和与一次性施加的单脉冲速度增量基本相同, 但降轨效果相差较大, 不能通过一次单脉冲计算近似表示多脉冲降轨效果。通过上述问题的研究, 为进一步实现空间碎片天基激光探测清除一体化仿真研究奠定基础。

关键词: 空间碎片; 天基激光; 多脉冲; 清除窗口

中图分类号: V416.5; TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0329005

Simulation analysis of orbit characteristics of space debris irradiated by space-based laser system

Kang Bokun, Jin Xing, Chang Hao

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

Abstract: In-orbital spacecraft has been in great danger because of centimeter space debris. Nowadays a research topic that high energy laser irradiates orbital debris to make it into the atmosphere burned down has been more and more hot. In order to take care of centimeter space debris near space station, a space-based system with high energy laser had been appeared, with a method of calculation of multiple pulses laser orbital-dropping. The simulation result shows that the possibility of removing space debris with space-based laser is that space debris is in a certain condition named "cleaning window". The selection of "cleaning window" is the key of orbital-dropping of debris. Under the existing conditions, such as laser power and platform parameters, multiple pulse laser orbital-dropping of debris is feasible. The result of multiple pulses laser orbital-dropping shows that debris orbital parameters have a big change in eccentricity and a small change in inclination, causing a big range in perigee and a small range in apogee. After insuring range of orbital-dropping, the result of single pulse velocity increment is nearly close of multiple pulses. Because the orbital-dropping has a great difference, there cannot be calculated of

收稿日期: 2016-07-06; 修订日期: 2016-08-09

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

orbital-dropping by a single pulse to approximate multiple pulses. Based on above discussion, the modeling and simulation of detection and removing centimeter space debris with space-based laser system can be finished.

Key words: space debris; space-based laser; multiple pluses; cleaning window

0 引言

空间碎片作为一种“太空垃圾”,对在轨正常工作的航天器造成了非常大的影响。为了能有效地控制空间碎片的数量,使其不占用宝贵的空间资源,近年来各研究机构提出很多针对空间碎片的处理方法^[1]。利用激光与碎片相互作用从而产生等离子体反喷冲量使其降轨进入大气层烧毁是近年来提出的一种新型的空间碎片清除方法,受到了越来越多国内外科研人员的广泛关注^[2],如 ORION 计划、CLEANSPACE 计划、ICAN 计划等^[3-5],各研究小组对激光清除空间碎片过程中的各个重点问题进行了详细的研究,如激光探测空间碎片^[6]、高能脉冲激光作用下的空间碎片变轨^[7]、激光辐照不规则空间碎片冲量矢量特性^[8]、天基平台搭载激光器载荷分布^[9]等,并针对厘米级空间碎片对清除方案与系统组成进行了分析计算^[10]。

从激光器布站位置来看,目前空间碎片的激光清除方案主要包括地基与天基两种方式,其中地基激光清除空间碎片过程描述以及轨道动力学模型已经有了一定的研究基础,根据碎片轨道的不同,进行了单脉冲和多脉冲的仿真研究^[11-12]。地基激光清除空间碎片可以增大激光器功率,提高单脉冲辐照功率密度,产生更大的烧蚀反喷冲量用于空间碎片变轨,但不可否认的是这样的清除过程会受到激光大气散射的干扰,对清除效果产生很大影响。在已有的仿真研究中,主要考虑激光器布站在空间碎片的星下点轨迹上,与实际情况相差较大。利用天基平台搭载高能激光器^[13],可以忽略大气层对激光的散射,激光利用率较高,同时考虑到空间碎片轨道面与天基平台轨道面存在夹角,更符合实际情况。

文中建立了空间碎片天基激光降轨模型并进行了仿真分析,讨论了激光清除空间碎片过程中的“清除窗口”,并通过典型参数条件下的天基平台清除空间碎片仿真分析对模型进行了验证。

1 天基激光清除空间碎片建模

在实际激光清除空间碎片行为中,由于天基平台载荷有限,无法携带大功率激光器,一般激光器都为百千瓦量级^[14],烧蚀产生的速度增量只有厘米每秒量级,不足以一次使目标碎片进入预定轨道,因而更多采用的是多脉冲的方式,通过在一段时间内,多次辐照目标碎片变轨,使其近地点高度低于大气层高度从而烧毁。针对这个问题,需要做三方面的工作,首先要对单脉冲激光辐照空间碎片变轨进行研究,利用高能激光辐照烧蚀碎片产生反喷速度,改变碎片的轨道根数;其次要通过对天基平台与空间碎片轨道的计算,判断施加单脉冲激光辐照的时间,即“清除窗口”;最终将单脉冲的作用过程进行不断重复,实现多脉冲激光清除。

1.1 单脉冲激光清除空间碎片建模

(1) 初始参数

建立地心惯性坐标系 $O_E-X_iY_iZ_i$, 原点位于地心 O_E , O_EX_i 轴指向平春分点, O_EZ_i 垂直于赤道平面,与地球自转轴重合且指向北极, O_EY_i 轴位于赤道平面内,方向满足右手直角坐标系准则,如图 1 所示。

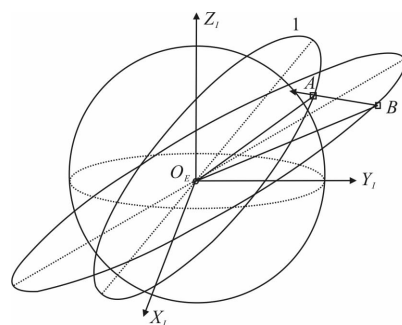


图 1 空间碎片异面变轨初始状态

Fig.1 Initial state of orbital debris no coplanar transfer

在清除激光作用前即 t_0 时刻空间碎片沿轨道 1 飞行,其轨道参数分别为 $a_1, e_1, i_1, \Omega_1, \omega_1, M_{01}$, 天基平台沿轨道 2 飞行, 其轨道参数分别为 $a_2, e_2, i_2, \Omega_2,$

ω_2, M_{02} , 碎片位于点 A , 天基平台位于点 B , 由初始轨道参数可得其初始位置矢量 $\vec{r}_1=(x_1, y_1, z_1), \vec{r}_2=(x_2, y_2, z_2)$, 速度矢量 $\vec{v}_1=(v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}), \vec{v}_2=(v_{x2}, v_{y2}, v_{z2})$ 。

(2) 激光辐照空间碎片速度变化计算
激光辐照施加速度增量如图 2 所示。

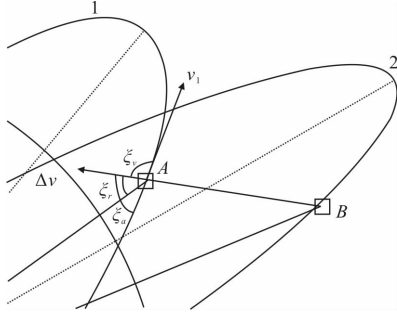


图 2 激光辐照速度增量

Fig.2 Laser irradiation velocity increment

由公式(1)得碎片轨道平面法向量。

$$\vec{h}_1 = \vec{r}_1 \times \vec{v}_1 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ v_{x1} & v_{y1} & v_{z1} \end{vmatrix} \quad (1)$$

在 $\Delta O_E AB$ 中, 速度增量方向可由向量 BA 的方向决定, 则由公式(2)得速度增量矢量方向(取单位矢量)。

$$\Delta \vec{v} = \frac{\vec{BA}}{|\vec{BA}|} = \frac{(x_1 - x_2, y_1 - y_2, z_1 - z_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \quad (2)$$

由公式(3)得速度增量与碎片轨道平面夹角。

$$\xi_a = \arcsin \left(\frac{|\vec{h} \cdot \Delta \vec{v}|}{|\vec{h}| |\Delta \vec{v}|} \right) \quad (3)$$

在 $\Delta O_E AB$ 中, 碎片与天基平台位置矢量夹角 ξ_0 为:

$$\xi_0 = \arccos \left(\frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} \right) \quad (4)$$

可由公式(5)得到碎片与天基平台间距 r_{AB} ; 由公式(6)得到碎片获得速度增量在其轨道面内的投影与其位置矢量夹角 ξ_r 。

$$r_{AB} = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \xi_0} \quad (5)$$

$$\xi_r = \xi_0 + \arcsin \left(\frac{r_1}{r_{AB}} \sin \xi_0 \right) \quad (6)$$

速度增量与碎片速度方向夹角为:

$$\xi_v = \arccos \left(\frac{|\Delta \vec{v} \cdot \vec{v}_1|}{|\Delta \vec{v}| |\vec{v}_1|} \right) \quad (7)$$

将速度增量分解到碎片轨道平面与其垂面内

$$\Delta v_0 = \Delta v \cos \xi_a \quad (8)$$

$$\Delta v_{\perp} = \Delta v \sin \xi_a \quad (9)$$

速度增量在碎片轨道面内的分解有两种情况: 一是碎片位置矢量与速度矢量夹角小于 90° ; 二是碎片位置矢量与速度矢量夹角大于 90° , 如图 3 所示。

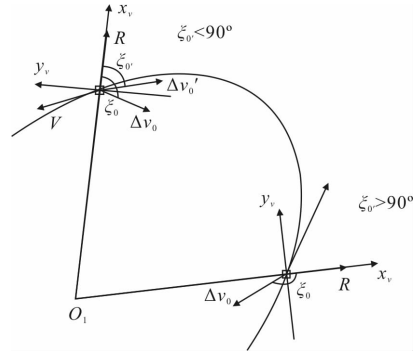


图 3 分解速度增量

Fig.3 Decomposition of velocity increment

在两种情况下目标碎片轨道面内速度增量在径向和周向的分量不变, 如下式所示:

$$\begin{cases} \Delta v_x = \Delta v_0 \cos \xi_r \\ \Delta v_y = -\Delta v_0 \sin \xi_r \end{cases} \quad (10)$$

(3) 激光作用后参数

建立轨道坐标系 $O_1-x_v y_v z_v$, 原点 O_1 位于目标碎片质心, $O_1 x_v$ 轴沿空间碎片位置矢量方向, $O_1 y_v$ 轴垂直于 $O_1 x_v$ 轴, 通过满足右手直角坐标系准则确定方向, $O_1 z_v$ 轴垂直于 $x_v O_1 y_v$ 平面, 方向由 $O_1 x_v, O_1 y_v$ 轴右手螺旋定则确定, 如图 4 所示。

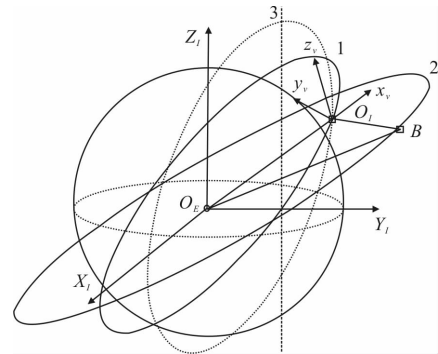


图 4 轨道坐标系及变轨后碎片轨道

Fig.4 Orbital coordinate system and transfer-orbital of debris

由图可知地心惯性坐标系到该坐标系旋转方式为: 绕 Z_i 轴逆时针旋转 Ω , 绕 X_i 轴逆时针旋转 i , 绕

Z_f 轴逆时针旋转 u , 可求地心惯性坐标系到该坐标系的方向余弦阵 P , 则目标碎片速度矢量在该坐标系中的坐标为:

$$V_3 = \begin{bmatrix} V_{x3} \\ V_{y3} \\ V_{z3} \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{z1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

变轨后碎片在该坐标系下三个方向上的分量为:

$$\begin{cases} \Delta v_x = \Delta v \cos \xi_a \cos \xi_r \\ \Delta v_y = -\Delta v \cos \xi_a \sin \xi_r \\ \Delta v_z = \Delta v \sin \xi_a \end{cases} \quad (12)$$

已知变轨后径向, 轴向, 垂向三个方向的速度增量, 可得到碎片在轨道坐标系下激光辐照变轨后三个方向的速度矢量 $v_3 = (V_{x3} + \Delta v_x, V_{y3} + \Delta v_y, V_{z3} + \Delta v_z)$, 同时忽略激光作用瞬间碎片的运动, 即变轨前后碎片的位置矢量不变, $r_3 = r_1 = (x_1, y_1, z_1)$, 同时已知变轨时刻 t_0 , 可唯一确定激光辐照后碎片的轨道根数 $(a, e, i, \Omega, \omega, M)$ 。

1.2 激光作用窗口

在空间碎片与天基平台的运动过程中, 为了能达到降轨效果, 需要满足两个条件: (1) 两者之间的

距离 R 在一定范围内, 此时激光辐照空间碎片后能产生一定的速度增量; (2) 激光辐照空间碎片产生的速度增量与空间碎片速度方向夹角 ξ_r 大于 90° , 使碎片速度减小; 同时激光辐照速度增量与碎片轨道面的夹角 ξ_a 应越小越好, 当满足这些条件时, 称此时为“清除窗口”。在单脉冲激光清除空间碎片建模中, 给出了这三个参数的计算过程, 将在仿真分析中针对典型条件下的空间碎片参数进行“清除窗口”的选择。

1.3 多脉冲激光清除空间碎片建模

在上文中, 主要针对单脉冲激光辐照空间碎片变轨模型进行了讨论分析, 其中对速度增量分解的处理是在轨道坐标系下进行的, 需要在惯性系与轨道系中进行两次坐标变换, 运算速度较慢。在实际情况下, 需要系统有更快的计算速度以便于做出更合理的判断, 需要简化单脉冲变轨模型。

在激光辐照碎片的过程中, 烧蚀产生的速度增量较小, 相应的小推力加速度可视为摄动加速度, 可用轨道摄动的方法进行研究^[15], 由摄动方程可知, 在小推力加速度作用下的碎片轨道根数变化率为:

$$\begin{cases} \Delta a = \frac{2a^2 [e \sin f \cdot \Delta v_x + (1 + e \cos f) \cdot \Delta v_y]}{\sqrt{\mu p}} \\ \Delta e = \frac{r [\sin f (1 + e \cos f) \cdot \Delta v_x + (2 \cos f + e + e \cos^2 f) \cdot \Delta v_y]}{\sqrt{\mu p}} \\ \Delta \Omega = \frac{r \sin u \cdot \Delta v_z}{\sin i \cdot \sqrt{\mu p}} \\ \Delta \omega = \frac{r [-\cos f (1 + e \cos f) \cdot \Delta v_x + \sin f (2 + e \cos^2 f) \cdot \Delta v_y]}{e \sqrt{\mu p}} - \cos i \cdot \Delta \Omega \\ \Delta i = \frac{r \cos u \cdot \Delta v_z}{\sqrt{\mu p}} \\ \Delta M = \frac{(p \cos f - 2re) \cdot \Delta v_x - (p+r) \sin f \cdot \Delta v_y}{e \sqrt{\mu a}} + \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\Delta v_x, \Delta v_y, \Delta v_z$ 为摄动加速度 a_x, a_y, a_z 与激光脉宽 τ 的乘积分别在其径向、周向、轨道面正法向的投影。由此得天基激光辐照空间碎片变轨后其轨道根数为 $\sigma = (a + \Delta a, e + \Delta e, \Omega + \Delta \Omega, \omega + \Delta \omega, i + \Delta i, M + \Delta M)$ 。

当采用多脉冲变轨时, 假设脉冲激光作用时间 $\Delta t = 10 \text{ ns}$, 重频 $f = 100 \text{ Hz}$, 则在脉冲激光作用时碎片的位置变化量在 mm 量级, 与其位置矢径相比很小, 可以忽略不计; 而在脉冲间隔内碎片位置变化量在 m 量级, 因此在多脉冲变轨时, 需要考虑碎片在脉冲

间隔内的运动。

多脉冲变轨主要包括以下几个阶段, 流程见图 5。

(1) 初始数据准备: 已知碎片初始参数 (r_0, v_0) , 天基平台初始参数 (R_0, V_0) ;

(2) “清除窗口”判断: 不断计算碎片与天基平台之间的间距 R , 激光辐照速度增量与空间碎片轨道平面夹角 ξ_a 和速度方向的夹角 ξ_r ;

(3) 施加速度增量: 当目标碎片处于“清除窗口”时对目标碎片空域进行激光辐照即施加速度增量, 计算变轨后目标碎片的参数 (r_1, v_1) 与此时天基平台

参数(R_1, V_1);

(4) 脉冲间隔运动:计算在脉冲间隔即下一个脉冲到来前目标碎片的参数(r_1, v_1)与天基平台参数(R_1, V_1),同时再此判断碎片是否处于“清除窗口”;

(5) 清除结束条件判断:是否处在“清除窗口”;变轨后近地点高度是否达到大气外层高度。当近地点高度满足要求时停止脉冲作用,当近地点高度不满足要求时,需要等待下一个“清除窗口”到来。

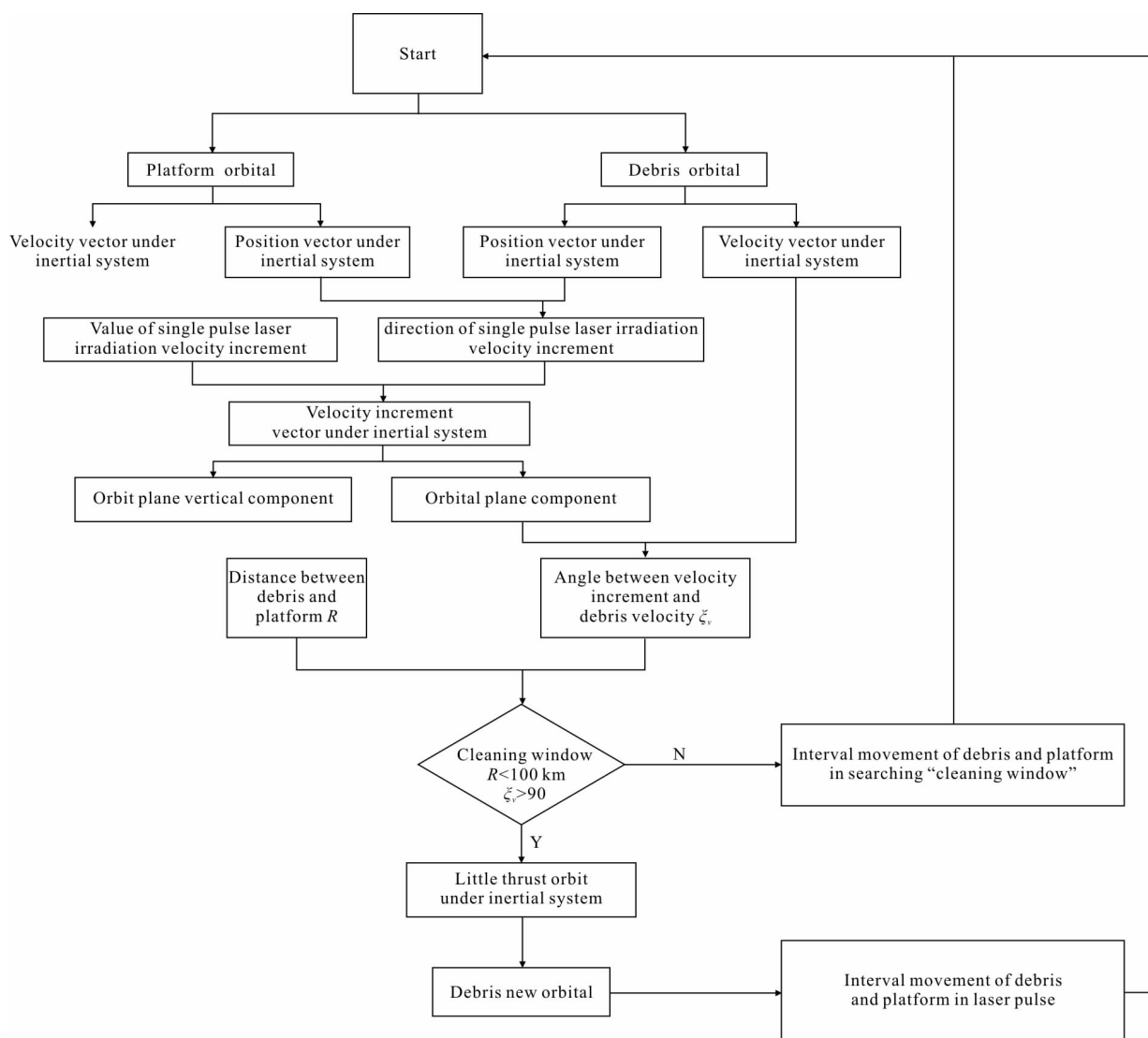


图 5 多脉冲激光辐照空间碎片异面变轨仿真流程

Fig.5 Simulation process of multiple pulses laser irradiation of orbital debris no coplanar transfer

2 仿真分析

2.1 “清除窗口”的选择

针对给定的空间碎片(初始轨道参数已知),分别讨论天基平台同向运动与相向运动时初始轨道参数对“清除窗口”的影响。

(1) 天基平台与空间碎片同向运动

初始参数如表 1。

表 1 相向运动碎片与天基平台轨道参数

Tab.1 Parameters of forward motion debris and space borne system

Parameters	Debris	Space borne system
Semi-major axis	$a_1=6\ 778.14\text{ km}$	$a_2=6\ 828.14\text{ km}$
Inclination	$i_1=130^\circ$	$i_2=51.6^\circ$
Eccentricity	$e_1=0$	$e_2=0$
RAAN	$\Omega_1=180^\circ$	$\Omega_2=0^\circ$
Argument of perigee	$\omega_1=0^\circ$	$\omega_2=0^\circ$

已知在轨运行航天器周期计算公式为

$$T=2\pi\sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \quad (14)$$

式中： $\mu=3.986\ 005\times 10^{14}\text{ m}^3/\text{s}^2$ ，为地球引力常数。

由公式(14)得碎片运动周期 $T_1=5\ 553\text{ s}$ ，天基平台运动周期 $T_2=5\ 615\text{ s}$ 。

根据前文模型，得到表征“清除窗口”的参数 R ， ξ_v ， ξ_a 随时间的变化如图6~图7所示。

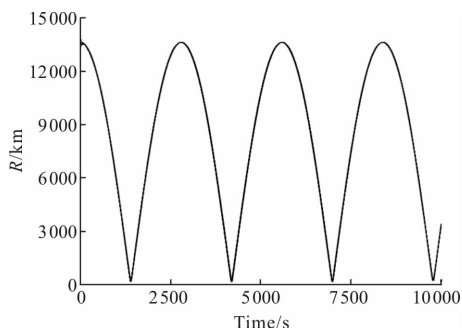


图6 目标碎片与天基平台间距

Fig.6 Distance between debris and space borne system

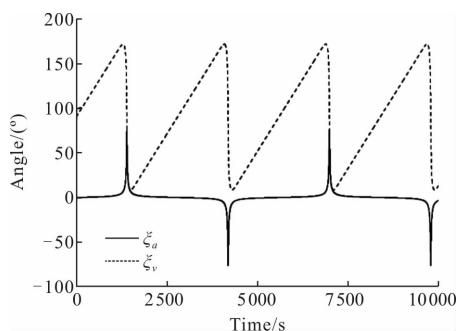


图7 激光辐照速度增量与碎片轨道面和速度方向夹角

Fig.7 Angle between laser irradiation velocity increment and orbital inclination and velocity

碎片与天基平台相向运动，即清除平台在运动过程中迎面而来的空间碎片，由图可以看出，每个周期都会出现“清除窗口”，清除效率较高。

(2) 天基平台与空间碎片同向运动

分别考虑天基平台近地点辐角与轨道倾角这两个轨道根数对这三个表征“清除窗口”的参数影响，其他参数如表2。

首先研究近地点辐角对“清除窗口”的影响，此时取碎片与天基平台轨道倾角分别为 $i_1=51.6^\circ$ ， $i_2=60^\circ$ ，碎片近地点辐角 $\omega_1=0$ ，天基平台近地点辐角 ω_2 分别取 -10° 、 -5° 、 5° 、 10° 、 15° ，表征“清除窗口”三个参数 R ， ξ_v ， ξ_a 随时间的变化如图8~图10所示。

表2 同向运动碎片与天基平台轨道参数

Tab.2 Parameters of conjugate movement debris and space borne system

Parameters	Debris	Space borne system
Semi-major axis	$a_1=6778.14\text{ km}$	$a_2=6828.14\text{ km}$
Eccentricity	$e_1=0$	$e_2=0$
RAAN	$\Omega_1=0^\circ$	$\Omega_2=0^\circ$

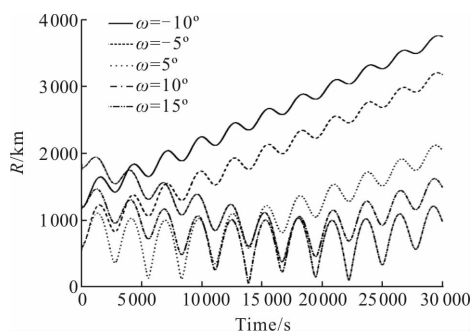


图8 目标碎片与天基平台间距

Fig.8 Distance between debris and space borne system

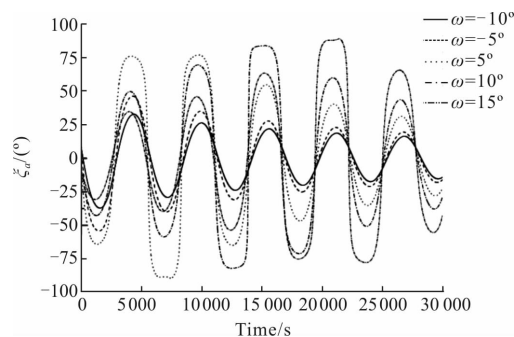


图9 目标碎片激光辐照速度增量与轨道平面夹角

Fig.9 Angle between laser irradiation velocity increment and orbital inclination

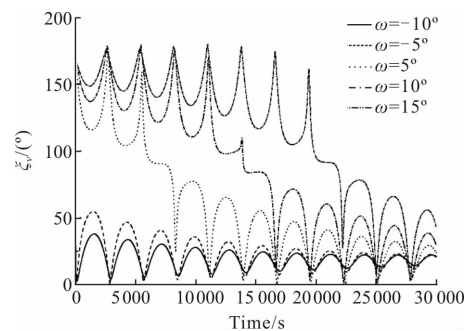


图10 目标碎片激光辐照速度增量与速度方向夹角

Fig.10 Angle between laser irradiation velocity increment and velocity

由图8~图10可以看出，当天基平台的近地点辐角小于目标碎片时，已经无法寻找到“清除窗口”，说

明已经错过了清除时刻；当天基平台的近地点辐角大于目标碎片时，即 ω_2 分别取 5° 、 10° 、 15° 时，“清除窗口”分别出现在大约第一、三、四个周期，清除时刻的到来会逐渐推迟。

下面考察轨道倾角对“清除窗口”的影响，取碎片与天基平台近地点辐角分别为 $\omega_1=0^\circ$ ， $\omega_2=10^\circ$ ，目标碎片轨道倾角 $i_1=51.6^\circ$ ，天基平台轨道倾角 i_2 分别取 45° 、 50° 、 55° 、 60° ，表征“清除窗口”三个参数 R ， ξ_v ， ξ_a 随时间的变化如图 11~图 13 所示。

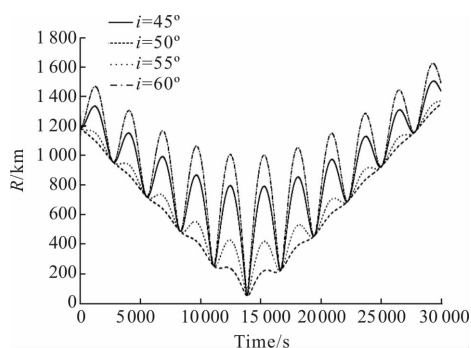


图 11 目标碎片与天基平台间距

Fig.11 Distance between debris and space borne system

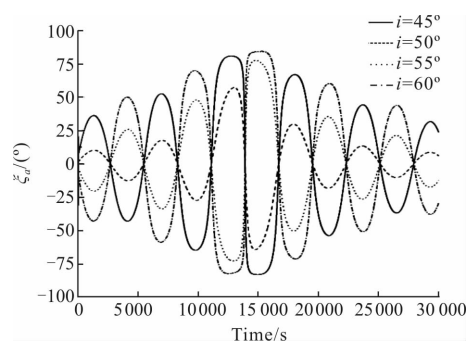


图 12 目标碎片激光辐照速度增量与轨道平面夹角

Fig.12 Angle between laser irradiation velocity increment and orbital inclination

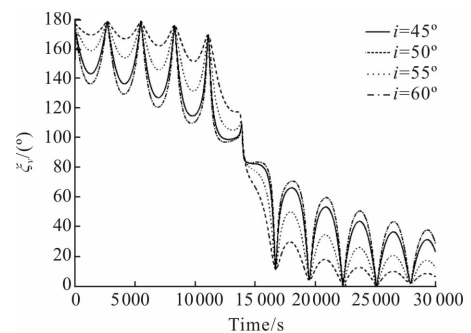


图 13 目标碎片激光辐照速度增量与速度方向夹角

Fig.13 Angle between laser irradiation velocity increment and velocity

由图可知，轨道倾角的变化对“清除窗口”基本没有影响，均出现在约第三个周期。

2.2 激光作用效果

下面针对典型条件下空间碎片进行多脉冲降轨仿真，初始参数如表 3 所示。

表 3 目标碎片与天基平台初始参数

Tab.3 Initial parameters of debris and space borne system

Parameters	Debris	Space borne system
Semi-major axis	$a_1=6\ 778.14\text{ km}$	$a_2=6\ 828.14\text{ km}$
Inclination	$i_1=51.6^\circ$	$i_2=60^\circ$
Eccentricity	$e_1=0.00073821$	$e_2=0$
RAAN	$\Omega_1=0^\circ$	$\Omega_2=0^\circ$
Argument of perigee	$\omega_1=0^\circ$	$\omega_2=10^\circ$

表征“清除窗口”的参数 R ， ξ_v ， ξ_a 随时间的变化曲线如图 14~图 15 所示。

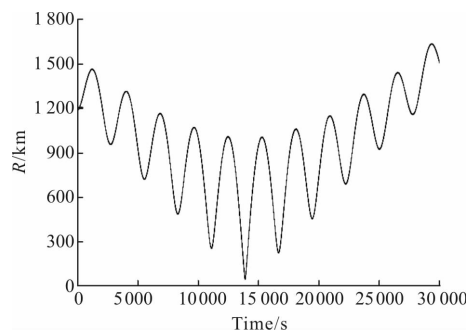


图 14 目标碎片与天基平台间距

Fig.14 Distance between debris and space borne system

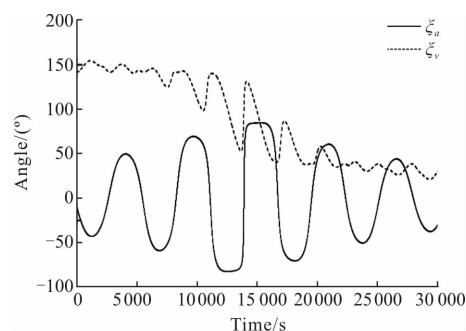


图 15 表征清除窗口的两个角度参数

Fig.15 Two angle parameters of characterization of cleaning window

将碎片参数变换为远地点近地点表达，远地点高度 $H_a=405.01\text{ km}$ ，近地点高度 $H_p=394.99\text{ km}$ ，根据空间碎片到达“清除窗口”的时刻，综合考虑选择作

用第一个单脉冲时各参数值如表 4 所示。

表 4 清除窗口

Tab.4 Cleaning window

Parameters	Value
Time	$t=13\ 900\ \text{s}$
Distance	$R=50.57\ \text{km}$
Angle between laser irradiation velocity increment and orbital inclination	$\xi_a=22.02^\circ$
Angle between laser irradiation velocity increment and velocity	$\xi_v=109.93^\circ$

分别取单脉冲速度增量 $\Delta v=0.5\ \text{m/s}$ 与 $\Delta v=0.2\ \text{m/s}$, 多脉冲仿真结果如图 16~图 18 所示。

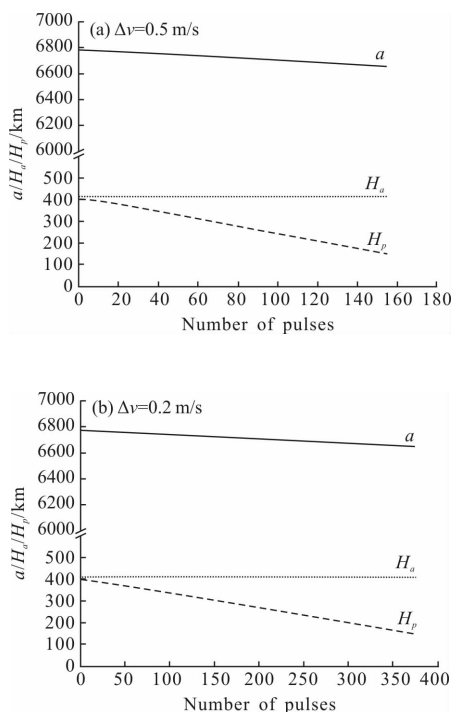


图 16 半长轴/远地点/近地点随脉冲数目变化

Fig.16 Semimajor axis/apogee/perigee change with pulse number

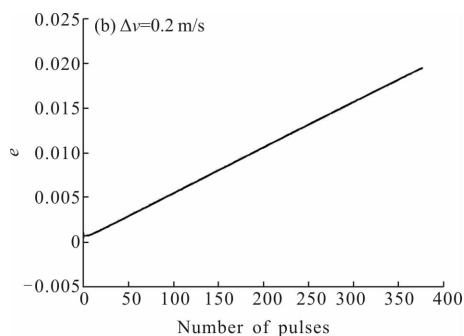
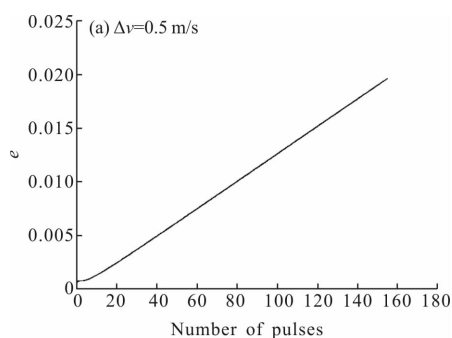


图 17 偏心率随脉冲数目变化

Fig.17 Eccentricity change with pulse number

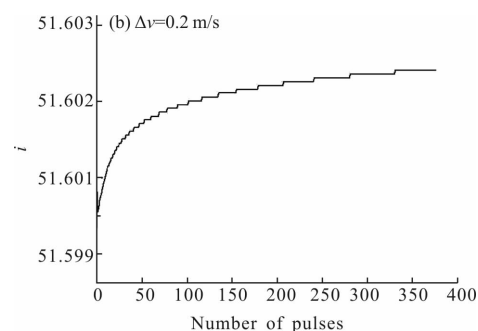
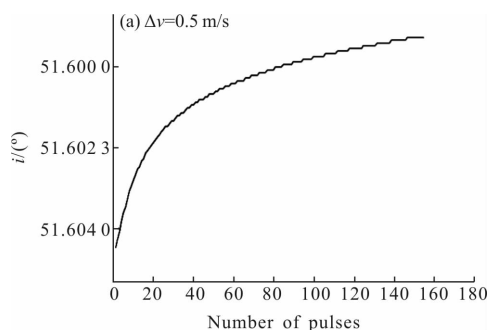


图 18 轨道倾角随脉冲数目变化

Fig.18 Inclination change with pulse number

由图可以看出当单脉冲速度增量分别取 $0.5\ \text{m/s}$ 与 $0.2\ \text{m/s}$ 时,需要作用的脉冲数目分别为 160(总作用时间为 $1.6\ \text{s}$,总速度增量为 $0.08\ \text{km/s}$)与 376(总作用时间为 $3.76\ \text{s}$,总速度增量为 $0.0752\ \text{km/s}$);碎片烧毁时近地点高度分别为 $150.384\ \text{km}$ 与 $150.482\ \text{km}$,半长轴分别为 $6\ 652.31\ \text{km}$ 与 $6\ 651.54\ \text{km}$,偏心率分别为 $0.019\ 62$ 与 $0.019\ 49$,远地点高度分别为 $411.449\ \text{km}$ 与 $409.811\ \text{km}$ 。同时可以看出随着作用脉冲数目的增加,远地点高度基本不变,近地点高度急剧下降,半长轴变化幅度不大,偏心率逐渐增大,碎片轨道倾角变化不大,说明在到达“清除窗口”时速度增量与碎片轨道平面夹角很小,对轨道倾角的

改变作用不明显。

考察总速度增量相同情况下的单脉冲与多脉冲变轨效果,将变轨结果列入表 5。

表 5 单脉冲与多脉冲激光作用效果对比

Tab.5 Impact between single pulse and multiple pulse laser

Value	Former orbital change		After orbital change(single pulse/multiple pulse)	
	$\Delta v=0.2$ m/s	$\Delta v=0.5$ m/s	$\Delta v=0.2$ m/s	$\Delta v=0.5$ m/s
Semi-major axis/km	$a=6\ 778.14$		6 723.01/ 6 651.54	6 719.49 / 6 652.31
Eccentricity	$e=0.000\ 738\ 21$		0.009/ 0.019 49	0.009 5/ 0.019 62
Apogee/km	$H_a=405.01$		412.12/ 409.81	41.93/ 411.44
Perigee/km	$H_p=394.99$		291.11/ 150.48	284.2/ 150.38

仿真结果显示低轨(轨道高度 400 km)空间碎片经过一次多脉冲作用即可降低至近地点 150 km 的“大气烧毁”轨道;不论单脉冲速度增量取值为多少,当确定了变轨初始高度与终止高度时,总速度增量相差不大;同时可以看出,将多脉冲的每个脉冲速度增量以单脉冲的方式一次性施加到目标碎片所产生的轨道变化与多脉冲相比有一定的差距,其中变轨后半长轴和远地点差异不大,但偏心率和近地点差异较大,目前还不能采用这种方法简化计算。

3 结 论

针对天基激光清除空间碎片的一般情况,即圆轨道天基平台清除椭圆轨道空间碎片问题,分析了天基平台与空间碎片同向、相向运动时“清除窗口”的寻找与影响因素、多脉冲作用效果,得到如下结论:

(1) 建立了天基激光单脉冲清除椭圆轨道空间碎片的计算分析模型,重点讨论了施加高能脉冲激光前后碎片轨道根数的变化;分析得到了多脉冲激光清除空间碎片的简化计算模型,提出在仿真中要同时考虑平台与碎片在脉冲间隔的运动。

(2) 在施加高能激光降轨前需要判断碎片是否处于“清除窗口”,当满足条件时施加高能激光可达降轨效果。当保持空间碎片轨道根数不变时,天基平台轨道倾角的改变对“清除窗口”到达时间没有影

响;近地点辐角的增大将会使“清除窗口”的到达时间推迟,当天基平台近地点辐角小于空间碎片近地点辐角时将不会出现“清除窗口”。

(3) 在多脉冲降轨操作中,空间碎片的长半轴和远地点变化幅度很小,而近地点变化幅度很大;随着脉冲数目的增大,碎片的偏心率逐渐增大;同时由于选择的“清除窗口”中速度增量与碎片轨道面夹角很小,因而碎片轨道面的转动幅度很小。

(4) 当已知空间碎片初始轨道与烧毁轨道时,尽管一次单脉冲速度增量与多脉冲总速度增量大致相同,但是作用效果相差较大,不能采用这种方法简化计算。

由于空间碎片降轨是一个非常复杂的问题,文中考虑的是天基平台为圆轨道而空间碎片为椭圆轨道的情况,与实际相比有一定的差别,下一步将继续细化模型建立过程,实现探测清除的一体化仿真。

参 考 文 献:

- [1] Phipps C R, Baker K L, Libby S B, et al. Removing orbital debris with lasers[J]. *Advanced in Space Research*, 2011, 49 (9): 1283-1300.
- [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] Campbell J W. Project ORION: orbital debris removal using ground-based sensors and lasers[R]. NASA, 1996.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] Jin Xing, Hong Yanji, Li Xiuqian. Removal processes analysis of centimeter-scale space debris using laser irradiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(2): 281–284. (in Chinese)
金星, 洪延姬, 李修乾. cm级空间碎片的激光清除过程分析[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(2): 281–284.
- [8] Jin Xing, Chang Hao, Hong Yanji, et al. Impulse calculation for irregularly shaped space debris under laser irradiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(8): 1956–1960. (in Chinese)
金星, 常浩, 洪延姬, 等. 激光辐照不规则空间碎片冲量矢量计算[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(8): 1956–1960.
- [9] Quinn M N, Jukna V, Ebisuzaki T, et al. Space-based application of the CAN laser to LIDAR and orbital debris remediation [J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2015, 224(13): 2645–2655.
- [10] Hong Yanji. Cleaning Space Debris with Laser [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2013. (in Chinese)
洪延姬. 激光清除空间碎片方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [11] Chang Hao, Jin Xing, Hong Yanji, et al. Modeling and simulation on ground-based lasers cleaning space debris [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(6): 994–1001. (in Chinese)
常浩, 金星, 洪延姬, 等. 地基激光清除空间碎片过程建模与仿真[J]. *航空学报*, 2012, 33(6): 994–1001.
- [12] Jin Xing, Hong Yanji, Chang Hao. Simulation analysis of removal of elliptic orbit space debris using ground-based laser [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(9): 2063–2073. (in Chinese)
金星, 洪延姬, 常浩. 地基激光清除椭圆轨道空间碎片特性的计算分析[J]. *航空学报*, 2013, 34(9): 2064–2073.
- [13] 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.
- [14] Phipps C R, Bonnal C. A spaceborne, pulsed UV laser system for re-entering or nudging LEO debris, and re-orbiting GEO debris[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 118: 224–236.
- [15] Chang Hao, Jin Xing, Hong Yanji. Modeling and simulation on active space debris orbit maneuver based on laser ablation impulse coupling [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(10): 2325–2332. (in Chinese)
常浩, 金星, 洪延姬. 基于激光烧蚀冲量耦合的空间碎片主动变轨建模与仿真[J]. *航空学报*, 2013, 34(10): 2325–2332.