

应用改进遗传算法优化天基光学监视平台轨道*

刘翔春, 廖 瑛, 文援兰

(国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对地球遮挡、地影、太阳光干扰、月光干扰、空间目标相对观测平台的角速度等约束对空间目标可见性的影响问题,基于已编目空间目标双行轨道根数,研究以太阳同步晨昏圆轨道作为观测平台轨道,采用改进多变异位自适应遗传算法对单星观测平台轨道倾角进行优化设计。仿真结果表明,改进的多变异位自适应遗传算法有效地解决了多变异位自适应遗传算法不能保证收敛到所有种群中最优个体的问题,且随机抽取10%左右的目标样本可以达到与采用所有目标相当的性能,计算效率提高约1个量级。

关键词:空间目标;双行轨道根数;天基光学监视;光学可见性;多变异位自适应遗传算法;轨道优化

中图分类号:V443.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)03-0058-05

Applying the improved genetic algorithm to optimize the orbit for space-based optics surveillance platform

LIU Xiangchun, LIAO Ying, WEN Yuanlan

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the effects of space objects visibility constraints including the Earth masking, the Earth shadow, the sunlight, the Moon light and the relative angle velocity between space object and platform, the sun-synchronous twilight circularity orbit was selected and the improved multi-mutation adaptive genetic algorithm was adopt to solve the single platform orbit inclination angle optimization based on Two-line Elements (TLE) of catalog objects. Simulation results show that the improved multi-mutation adaptive genetic algorithm can effectively solve the optimum individual while the multi-mutation adaptive genetic algorithm may not. In addition, it is found that the calculation capacity can be improved with a magnitude in equivalent performance using about 10% random selected objects.

Key words: space object; two-line elements; space-based optics surveillance; optics visibility; multi-mutation adaptive genetic algorithm; orbit optimization

天基光学监视^[1-2]融合了天基平台和光学传感器两者的优势,不受地域和气候的限制,能耗低,隐蔽性强,测量精度高,是空间监视系统的重要手段。但是,天基光学监视也因光学监视设备的固有工作特性而受到一些约束的影响,如地球遮挡、地影、太阳光干扰、月光干扰、空间目标相对观测平台的角速度等,所以有必要对天基光学监视下的观测平台轨道进行优化设计,以提高监视系统的观测效能,为天基光学观测平台轨道设计提供技术支持。

刘磊^[3]、蓝朝桢^[4]等在天基光学监视空间目标可见性方面进行了研究,重点分析了天基光学可见约束条件对空间目标可见性的影响,但没有对观测平台轨道进行优化设计。在天基光学观测平台轨道设计方面,蓝朝桢^[5]根据先验知识采用

计算有限离散点的方法研究了平台轨道高度和倾角对观测效能的影响,唐毅^[6]研究了地球静止轨道目标单星和星座监视轨道设计。

本文基于已编目空间目标的轨道数据,在分析空间目标分布特性的基础上,以地球遮挡、地影、太阳光干扰、月光干扰、空间目标相对平台的角速度以及 Van Allan 辐射带等作为约束条件研究单星光学观测平台轨道优化问题。考虑到天基光学监视空间目标可见性对光照条件的要求,为了保证观测设备有较好的位相,选择太阳同步轨道作为平台轨道类型。为了避免一般遗传算法可能出现的早熟现象并保证优化结果收敛到所有种群中最优个体,采用改进多变异位自适应遗传算法对单星观测平台轨道进行优化设计。另外,为了解决由于已编目空间目标数量大导致优化计

* 收稿日期:2013-11-06

基金项目:航天科技创新基金资助项目(CASC201101)

作者简介:刘翔春(1984—),男,湖南湘乡人,博士研究生,E-mail:xiaoniulxch@163.com;

廖瑛(通信作者),女,教授,博士,博士生导师,E-mail:liaoqing1104@163.com

算量大的问题,并保证较好的优化效果,本文通过随机抽取目标样本的方法来提高优化效率。

1 已编目空间目标分布特性分析

1.1 双行轨道根数转换为位置速度矢量

为了分析空间目标的位置分布以及基于可见性分析的需要,下面给出椭圆轨道双行轨道根数中的轨道特性参数转化为位置速度矢量(r, \dot{r})的数学模型。

$$r = \mu^{\frac{1}{3}} \cdot n^{-\frac{2}{3}} \cdot (\cos E - e) \cdot P + \mu^{\frac{1}{3}} \cdot n^{-\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{1 - e^2} \sin E \cdot Q \quad (1)$$

$$\dot{r} = \frac{-\mu^{\frac{1}{3}} \cdot n^{\frac{1}{3}} \cdot \sin E}{1 - e \cos E} \cdot P + \frac{\mu^{\frac{1}{3}} \cdot n^{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt{1 - e^2} \cos E}{1 - e \cos E} \cdot Q \quad (2)$$

$$E - e \sin E = M \quad (3)$$

$$P = \begin{bmatrix} \cos \Omega \cos \omega - \sin \Omega \sin \omega \cos i \\ \sin \Omega \cos \omega + \cos \Omega \sin \omega \cos i \\ \sin \omega \sin i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Q = \begin{bmatrix} -\cos \Omega \sin \omega - \sin \Omega \cos \omega \cos i \\ -\sin \Omega \sin \omega + \cos \Omega \cos \omega \cos i \\ \cos \omega \sin i \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, i 为轨道倾角, Ω 为升交点赤经, e 为偏心率, ω 为近地点幅角, M 为平近点角, n 为平均角速度, μ 为地球引力常数。

1.2 已编目空间目标分布特性

根据2013年8月29日发布的编目更新信息,在已编目空间目标数据库中给出了11 961个目标的双行轨道根数。通过统计分析,已编目空间目标的位置分布如图1所示,其中高度(本文用轨道半长轴与地球半径之差近似为轨道高度)低于2 000km的低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)空间目标约占总目标数的78.7%,高度分布范围在2 000~21 000km的中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)空间目标约占总目标数的12.6%,高度在35 810km附近的GEO空间目标约占总目标数的7%,其他目标约占1.7%。

另外,已编目空间目标随轨道半长轴、轨道倾角和偏心率的分布特性如图2所示,其中偏心率小于0.1的近圆轨道目标约占88.2%;轨道倾角主要分布在60°至100°的约占80%,0°至15°倾角目标约占10%,空间目标分布密度峰值出现在倾角为100°附近的太阳同步轨道区域。

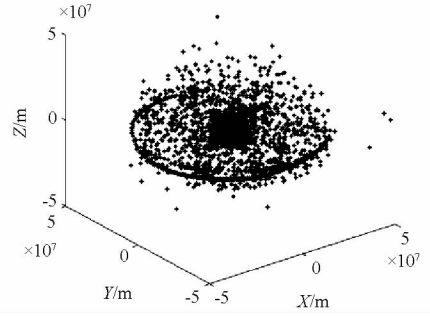


图1 已编目空间目标位置分布

Fig. 1 Position distribution of catalog objects

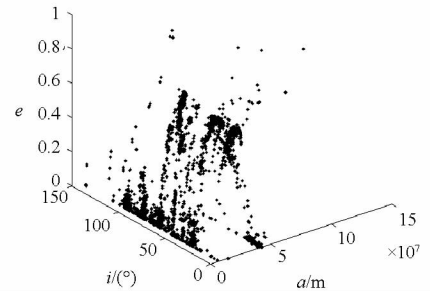


图2 已编目空间目标轨道分布

Fig. 2 Orbit distribution of catalog objects

2 监视平台轨道优化设计建模

2.1 优化模型

2.1.1 优化变量

考虑到天基光学监视的空间目标可见性对光照条件的要求,同时为了确保平台在工作寿命内观测设备探测的空间目标有较好的稳定位相,本文以太阳同步晨昏圆轨道作为平台轨道。一般来说,需要6个轨道要素才能确定平台的轨道,从这个角度来说轨道优化需6个变量。由于采用太阳同步晨昏圆轨道,实际上已经限定了升交点赤经和偏心率;从平台整个工作寿命期来说,近地点幅角和真近点角对观测效能的影响非常微小,对它们进行优化意义不大;同时太阳同步轨道的轨道倾角和半长轴存在约束关系,只需优化其中一个变量。综合以上因素本文选择平台轨道倾角 i_c 为优化变量。

轨道特性如式(6)所示:

$$\begin{cases} \dot{\Omega}_c = -9.97 \left(\frac{R_e}{a_c} \right)^{3.5} \cos i_c = 0.9856 \\ e_c = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, i_c 为平台轨道倾角, e_c 为平台轨道偏心率, $\dot{\Omega}_c$ 为平台轨道升交点赤经的变化率。

2.1.2 目标函数

假设所有空间目标的分布情况与已编目空间

目标的分布情况类似,且暂不考虑观测设备的探测能力,仅从光学可见性角度研究可见性最好的平台轨道,定义目标函数为可见空间目标总数 N_{vis} 最大,即

$$N_{vis} = \max J \quad (7)$$

2.1.3 约束条件^[9-11]

1) 地球遮挡约束

当地球处在观测平台与空间目标之间且位于二者连线上时,空间目标不可见。实际中光学观测设备还应考虑地球大气层厚度 h 的影响,根据观测平台、地球以及空间目标三者的空间几何关系(如图 3 所示)得到地球遮挡约束条件如式(8)所示:

$$f = \sqrt{|\mathbf{r}'_G|^2 - (R_e + h)^2} + \sqrt{|\mathbf{r}'_T|^2 - (R_e + h)^2} - |\mathbf{r}'_T - \mathbf{r}'_G| < 0 \quad (8)$$

式中, R_e 为地球平均半径, \mathbf{r}'_G 为观测平台在 J2000 中的位置矢量, \mathbf{r}'_T 为空间目标在 J2000 中的位置矢量。

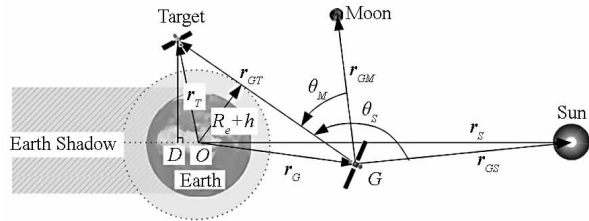


图 3 光学可见性约束

Fig. 3 Constraints of optics visibility

2) 地影约束

对于可见光观测而言,空间目标必须在太阳光照射下才能被观测到。考虑圆柱型地影模型,即假定太阳光为平行光,如图 3 所示。其中 O 为地心, \mathbf{R}'_S 为太阳光在 J2000 中的单位位置矢量,令

$$C_{od} = \mathbf{r}'_T \cdot \mathbf{R}'_S \quad (9)$$

$$|DT| = \sqrt{|\mathbf{r}'_T|^2 - C_{od}^2} \quad (10)$$

则地影约束条件为: $C_{od} \leq 0$ 或 $C_{od} > 0$ 且 $|DT| \geq R_e$ 。

3) 太阳光干扰约束

当逆向太阳光观测空间目标时,由于背景光强烈,导致观测结果模糊不清,无法使用。若观测平台在地影内时不需考虑太阳光干扰,则定义太阳光干扰约束下的空间目标可见条件为太阳光约束角 θ_s 大于观测设备的临界太阳约束角 θ_s^{\min} (如图 3 所示),即

$$\frac{\mathbf{r}'_{GT} \cdot \mathbf{r}'_{GS}}{|\mathbf{r}'_{GT}| \cdot |\mathbf{r}'_{GS}|} - \cos\theta_s^{\min} < 0 \quad (11)$$

式中, $\mathbf{r}'_{GT} = \mathbf{r}'_T - \mathbf{r}'_G$; $\mathbf{r}'_{GS} = \mathbf{r}'_S - \mathbf{r}'_G$, \mathbf{r}'_S 为太阳在 J2000 中的位置矢量。

4) 月光干扰约束

由于月球反射太阳光,目标不能出现在月球视圆面上,在满月前后目标也不能出现在月球附近区域,定义月光干扰约束^[8]条件为:

$$\frac{\mathbf{r}'_{GT} \cdot \mathbf{r}'_{GM}}{|\mathbf{r}'_{GT}| \cdot |\mathbf{r}'_{GM}|} - \cos\theta_M^{\min} < 0 \quad (12)$$

式中, θ_M^{\min} 为临界角,是月球的视半径与光散射角之和。

5) 相对角速度约束

受光学传感器性能的约束,目标与观测平台的相对角速度大小 ω_{rel} 不能超过传感器能识别目标的最大相对角速度 ω_{rel}^{\max} 。 ω_{rel} ($^{\circ}/s$) 的计算方法如式(13)所示:

$$\omega_{rel} = \frac{v'_{GT}}{|v'_{GT}|} \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{v'_{GT} \cdot r'_{GT}}{|v'_{GT}| \cdot |r'_{GT}|}\right)\right) \quad (13)$$

式中, $v'_{GT} = v'_T - v'_G$, v'_T 和 v'_G 分别为空间目标和观测平台在 J2000 中的速度矢量。

6) 地球辐射带约束

地球辐射带指近地空间被地磁场俘获的高强度带电粒子区域,也称为 Van Allan 辐射带,为了降低观测平台的防护难度,减少故障风险,在进行轨道设计时有必要避开此高能辐射带的影响,使观测平台处在相对安全的空间环境中。地球辐射带约束主要由两个区域组成,内带在 1500 ~ 5000km,外带在 13000 ~ 20000km。地球辐射带主要约束平台的轨道高度 h_c ,考虑到本文采用太阳同步圆轨道作为平台轨道,可以等效为对平台轨道半长轴或轨道倾角的约束,即需满足

$$h_c^{\min} \leq a_c \leq h_c^{\max} \quad \text{or} \quad i_c^{\min} \leq i_c \leq i_c^{\max} \quad (14)$$

2.2 优化算法

2.2.1 多变异位自适应遗传算法(MMAdapGA)

MMAdapGA 就是在自适应遗传算法中引入多变异位,即将自变量的二进制表示的多个位取反,以增加种群的多样性,避免算法早熟。算法流程如图 4 所示,其中,遗传操作具体包括:(1)依据适应度选择再生个体;(2)按照杂交常数 Pc1 和 Pc2 生成新的个体;(3)根据适应度值和变异常数 Pm1、Pm2 自适应产生变异概率,通过交叉变异产生新一代种群。

2.2.2 改进多变异位自适应遗传算法(IMMAdapGA)

考虑到 MMAdapGA 的优化准则只是确保适应度高的个体被选中的概率高,并不能 100% 选中当前适应度最高的个体,因此在优化过程中可能会错过已经出现过的适应度相对最高的个体

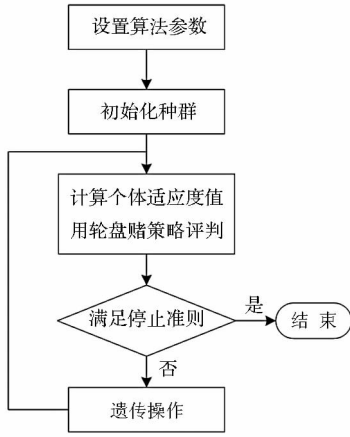


图4 MMAdapGA 算法流程

Fig.4 The flow of MMAdapGA

(最优解)。针对这一问题,本文对选择策略作如下改进:比较当前代中所有个体的适应度值,选择适应度值最大的个体直接进入下一代,剩余个体通过 MMAdapGA 优化准则产生。

3 算例及分析

3.1 仿真条件

在所有仿真算例中,太阳在 J2000 中的位置坐标根据文献 [12] 提供的模型计算;月球在 J2000 中的位置坐标采用 STK 生成的数据;地球半径 $R_e = 6\ 378\ 137\text{m}$;大气层厚度 $h = 150\ 000\text{m}$;太阳光约束角 $\theta_s^{\min} = 80^\circ$;月光临界角 $\theta_M^{\min} = 10^\circ$;最大相对角速度 $\omega_{rel}^{\max} = 1^\circ/\text{s}$;仿真历元时间:29Aug2013 19:21:10.000 UT CG;平台降交点地方时为 6:00;平台偏心率、近地点辐角和真近点角均为 0;平台轨道倾角约束范围为 $i_c^{\min} = 96^\circ$, $i_c^{\max} = 106^\circ$, 对应平台轨道高度范围为 $h_c^{\min} = 75\ 679.629\ 582\ 375\text{m}$, $h_c^{\max} = 1\ 984\ 051.527\ 568\ 7\text{m}$ 。

对于已编目空间目标轨道数据,采用 Space-track 网站 2013 年 8 月 29 日发布的编目空间目标双行轨道根数文件。根据 1.2 节的统计结果将所有 1 1961 个目标按低轨、中轨和高轨(包括 1.2 节中统计的 GEO 目标和其他目标)进行分类统计,并在平台轨道倾角约束范围按 1° 等间隔抽取轨道倾角离散点,分别计算这三类目标在所有 i_c 离散点的可见目标数,通过分析可见目标数最小值与最大值之比发现,与低轨目标(65.44%)相比,优化变量 i_c 对中轨(93.86%)和高轨目标(100%)的影响非常小,因此,在后面的算例中,基于已编目的低轨目标轨道数据进行计算。

CASE1: 优化算法对优化性能的影响

为了验证改进算法的有效性,在相同仿真条件

下,比较 MMAdapGA 算法和 IMMAdapGA 算法的优化效果。仿真参数分别为:优化变量下界 $a = 96^\circ$, 优化变量上界 $b = 105^\circ$, 种群大小 $NP = 50$, 最大进化迭代次数 $NG = 50$, 杂交常数 $Pc1 = 0.6$, 杂交常数 $Pc2 = 0.9$, 变异常数 $Pm1 = 0.02$, 变异常数 $Pm2 = 0.05$, 自变量离散精度 $eps = 0.01$, 仿真时间步长 $dt = 3\ 600\text{s}$, 随机抽取的空间目标个数 $N_T = 1\ 000$ 。

CASE2: 目标个数对优化性能的影响

考虑到已编目空间目标数量大(其中 9 412 个低轨目标),如果在优化计算时采用所有目标数据,优化结果最可靠,但计算量很大,因此,我们采用 IMMAdapGA 算法比较空间目标数 N_T 分别为 100、500、1 000 和 9 412 的优化效果。仿真参数除 N_T 不同外,其余与 CASE1 相同。

CASE3: 变异常数对优化性能的影响

变异常数直接影响新一代个体的产生,进而影响优化性能,采用 IMMAdapGA 算法比较 3 组不同变异常数下的优化效果。仿真参数除变异常数(如表 1 所示)不同外,其余与 CASE1 相同。

表 1 变异常数

Tab.1 Mutation constants

| Group | $Pm1$ | $Pm2$ |
|-------|-------|-------|
| 1 | 0.01 | 0.025 |
| 2 | 0.02 | 0.050 |
| 3 | 0.04 | 0.100 |

CASE4: 优化结果检验

为了验证优化结果的有效性,将优化结果与优化变量按 1° 等间距采样的计算结果进行比较。

3.2 结果分析

3.1 节中设计的 4 个算例的仿真结果分别如图 5、表 2、图 6 和表 3 所示。

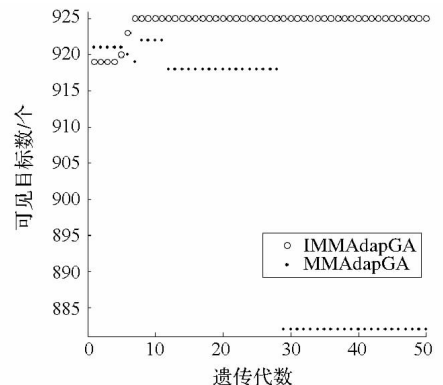


图5 CASE1 仿真结果

Fig.5 Simulation results of CASE1

从图 5 可以看出,MMAdapGA 算法的最优解的目标函数值($i_c = 97.574\ 780\ 06^\circ$, $N_{vis} = 882$)小

表 2 Case2 仿真结果

Tab.2 Simulation results of CASE2

| N_T | i_c | $N_{vis}/9412$ |
|------|-----------------|----------------|
| 100 | 100.953 079 18° | 87.74% |
| 500 | 104.630 498 53° | 89.38% |
| 1000 | 103.750 733 14° | 90.37% |
| 9412 | 103.768 328 45° | 91.34% |

于所有种群中最优个体的目标函数值 ($i_c = 104.225\ 806\ 5^\circ$, $N_{vis} = 922$), 而 IMMAdapGA 算法则在给定代数内最终收敛到所有种群中的最优个体 ($i_c = 103.750\ 733\ 14^\circ$, $N_{vis} = 922$), 且优于 MMAdapGA 算法的最优个体, 表明改进算法具有优越性。从表 2 可以看出, 目标个数分别为 1000 (占有所有低轨目标数的 10.6%) 和 9412 (所有低轨目标数) 下的 N_{vis}/N_{LEO} (可见目标个数与所有低轨目标数值的比值) 分别为 90.37 和 91.34, 优化变量相对误差为 1.7×10^{-4} , 表明随机抽取一定数量的目标可以得到采用所有目标相当的优化效果, 且计算量减少近一个量级, 大大提高了计算速度。图 6 表明, 变异常数对优化性能的影响并不是单调变化的, 而是针对具体的优化模型有相对较好的取值, 本例中, Group2 相对较好。由表 3 的仿真结果可知, 可见目标个数并非随轨道倾角单调变化, 表明对轨道倾角进行寻优是有必要的, 同时, 图 5 中 IMMAdapGA 的优化结果 (925) 优于表 3 中可见目标数的最大值 (915), 表明优化算法有效。

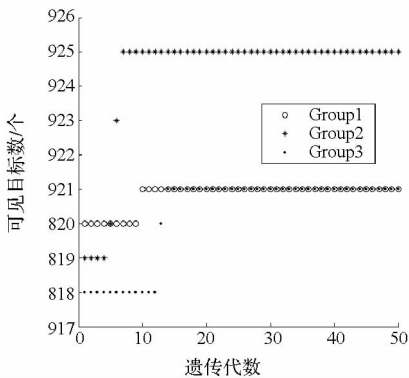


图 6 CASE3 仿真结果

Fig.6 Simulation results of CASE3

表 3 CASE4 仿真结果

Tab.3 Simulation results of CASE4

| i_c | N_{vis} | i_c | N_{vis} |
|-------|-----------|-------|-----------|
| 96 | 607 | 101 | 892 |
| 97 | 847 | 102 | 865 |
| 98 | 860 | 103 | 634 |
| 99 | 721 | 104 | 915 |
| 100 | 786 | 105 | 889 |

4 结论

1) 采用 IMMAdapGA 对空间目标监视平台轨道进行优化, 有效解决了 MMAdapGA 不能收敛到所有种群中最优个体的问题, 优化结果有效。

2) 随机抽取 10% 左右的空间目标样本进行优化可以得到与采用所有样本相当的性能, 并且计算效率能提高近一个量级, 在求解速度要求高的场合可以选择这种方法。

3) 根据不同的需求合理选择优化算法参数可以提高计算性能。

4) 在实际工程应用中, 空间目标天基光学观测平台轨道优化设计问题更为复杂, 比如观测设备性能指标的约束、观测设备指向的选择、多个观测平台的轨道优化等, 下一步需在多目标优化设计方面进行深入研究。

参考文献 (References)

- [1] 刘翔春. 天基照相跟踪空间碎片轨道确定方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2009.
LIU Xiangchun. Research on space debris orbit determination methods based on space-based camera tracking [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [2] 文援兰, 何星星, 李志, 等. 天基照相跟踪空间碎片批处理轨道确定研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 888-894.
WEN Yuanlan, HE Xingxing, LI Zhi, et al. Space-based camera tracking of space debris for orbit determination with batch process [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(3): 888-894. (in Chinese)
- [3] 刘磊. 基于天基监视的空间目标测向初轨确定研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010.
LIU Lei. Study on the initial orbit determination of space targets with space-based surveillance [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [4] 蓝朝桢, 李建胜, 马赛金, 等. 在轨目标天基光学观测可见性预报与分析[J]. 光电工程, 2008, 35(12): 23-27.
LAN Chaozhen, LI Jiansheng, MA Saijin, et al. Prediction and analysis of orbital target's visibility based on space-based optics observation [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(12): 23-27. (in Chinese)
- [5] 蓝朝桢. 空间目标天基光学观测系统建模与探测能力分析[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2009.
LAN Chaozhen. Modeling and detecting capability analysis of space-based space object optical observation system [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2009. (in Chinese)
- [6] 唐毅. 天基 GEO 目标监视系统星座设计与初始轨道确定方法研究[D]. 国防科学技术大学, 2013.
TANG Yi. Study on constellation design and initial orbit determination method for space-based geo object surveillance system [D]. National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [7] Liu X C, Liao Y, Wen Y L, et al. Simulation and analysis of space object visibility based on space-based optics surveillance [C] // Proceedings of International Conference ICSC2012, 2012: 195-203.
- [8] 王鹏, 徐青, 李建胜, 等. 空间环境建模与可视化仿真技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
WANG Peng, XU Qing, LI Jiansheng, et al. Space environment modeling and visual simulation technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)