

三轴光电跟踪系统空间目标捕获方法设计

陈德毅^{1,2,3}, 柳万胜^{1,2}, 贺东^{1,2,3}, 陈俊⁴, 史一翔^{1,2,3}

(1. 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 成都理工大学 旅游与城乡规划学院, 四川 成都 610059)

摘要: 针对三轴光电跟踪系统对空间目标捕获方案的设计问题, 首先分析了影响三轴光电跟踪系统捕获空间目标存在的误差源并对主要误差进行了误差估计, 即轨道预报误差和三轴指向误差。接着建立了主要误差到不确定区域(Field of uncertain, FOU)的误差传递关系, 利用所建的传递关系计算出了不确定区域, 并根据不确定区域的大小、形状以及分布类型设计搜索扫描方式。以不确定区域形状为椭圆且服从二维正态分布为例, 设计的搜索扫描方式为分行螺旋扫描。最后对该扫描捕获方法进行了数值仿真, 验证了该方法的正确性。经过仿真计算, 在捕获概率为 98% 的情况下, 目标的平均捕获时间为 10.52 s。该方法为三轴光电跟踪系统捕获空间目标提供了一定的理论基础。

关键词: 计算机仿真; 搜索扫描方式; 不确定区域; 三轴光电跟踪系统

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1217003

Design of space target acquisition method for three-axis photoelectric tracking system

Chen Deyi^{1,2,3}, Liu Wansheng^{1,2}, He Dong^{1,2,3}, Chen Jun⁴, Shi Yixiang^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Aiming at the design problem of the three-axis photoelectric tracking system for space target acquisition, firstly, the error source that affected the three-axis photoelectric tracking system to capture the space target was analyzed, and the main error was estimated, that was, track prediction error and three-axis pointing error. Then the error propagation relationship from the main error to the field of uncertain (FOU) was established, the uncertain area was calculated by using the transfer relation, and the search scanning mode was designed according to the size, shape and distribution type of the uncertain area. Taking an example of the shape of the field of uncertain as an ellipse and obeying the two-dimensional normal distribution, the design of the search mode was the branch spiral scan. Finally, the

收稿日期: 2018-07-09; 修订日期: 2018-08-13

作者简介: 陈德毅(1991-), 男, 硕士生, 主要从事数据通讯与实时计算方面的研究。Email: Laibuniz@outlook.com

导师简介: 柳万胜(1975-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事光束控制技术 & 系统方面的研究。Email: liuwansheng@ioe.ac.cn

numerical simulation was also carried out to verify the correctness of the mode. By simulation calculation, the average acquisition time of the target was 10.52 s in the case of the capture probability of 98%. This mode provides a theoretical basis for the acquisition of space targets by three-axis photoelectric tracking system.

Key words: computer simulation; search scanning mode; field of uncertain; three-axis photoelectric tracking system

0 引言

光电跟踪系统是一个由光电探测、信号处理、控制系统、光学系统及精密机架等几个部分组成的复杂系统,在靶场光电测量、天文观测、武器控制系统以及激光通讯系统中有着广泛的应用^[1-3]。随着应用领域的不断扩展,针对空间目标的无源被动方式下的捕获跟踪要求也越来越高^[4]。捕获是转入跟踪的前提,因此研究基于三轴光电跟踪系统的空间目标捕获策略具有非常重要的意义。

到目前为止,在有关捕获的理论研究方面,张海波等^[5]针对大型光电跟踪系统,提出了一种在引导信息基础上的小空域快速螺旋搜索方法,通过系统建模仿真和外场试验,表明该方法适用于目标引导信息误差超出视场的情况,然而误差的来源决定了快速搜索目标的范围,文中并没有讨论误差的来源以及误差对扫描捕获方法的影响。周彦平等^[6]针对空间目标瞄准捕获系统,设计空间卫星光电探测平台时,分析了不确定区域(Field of uncertain, FOU,是指某一确定的历元时刻,光电跟踪设备指向的位置,与目标在空间中的真实位置会存在一定的偏差,目标以一定的概率密度分布在该偏差所构成的区域内^[11])中不同机动目标的捕获概率,以空间螺旋扫描的捕获为例,建立了捕获目标的捕获概率模型,但该模型没有结合不确定区域的概率分布类型、形状以及大小,只是对 FOU 简单地假设为空间正方形区域。孙建锋等^[7]在星间激光通信的讨论中,利用两轴光电跟踪系统上的极窄信标激光束对同一终端进行空间捕获时,论证了信标激光光束的扫描重叠系数取决于激光终端的扫描精度,但分析的过程是以粗瞄准误差造成的角度偏移量为二维等方差高斯分布为前提。

关于捕获理论的研究,多数是基于两轴光电

跟踪平台,由于两轴光电跟踪系统存在过顶跟踪盲区^[8-10],捕获方法不完全适用于三轴光电跟踪系统的空间目标捕获,且相关捕获理论研究较少。文中从对影响空间目标捕获的误差源的分析与估计出发,建立了误差到不确定区域的传递关系,并且讨论了 FOU 的大小、形状以及分布类型。根据计算得到的 FOU,结合三轴光电跟踪系统的视场的应用属性,最后设计出相应的扫描搜索方法捕获空间目标。文中还通过数值仿真验证了扫描搜索方法的正确性。

1 理论分析

1.1 误差源分析与误差估计

图 1 描述了站址在某一经度 λ 和纬度 φ 的观测站观测空间目标。其中, O 为地心的位置, O_H 为测站的站心位置, $\vec{\rho}$ 为测站指向观测目标的矢量。从图 1 中可以看出,影响观测站观测目标的误差来自轨道预报误差、测站指向误差、站址误差以及系统时间误差等。参考文献[12]中给出了主要误差为轨道预报误差、测站指向误差;次要误差为站址误差、系统时间误差等。文中重点讨论的是主要误差的估计。

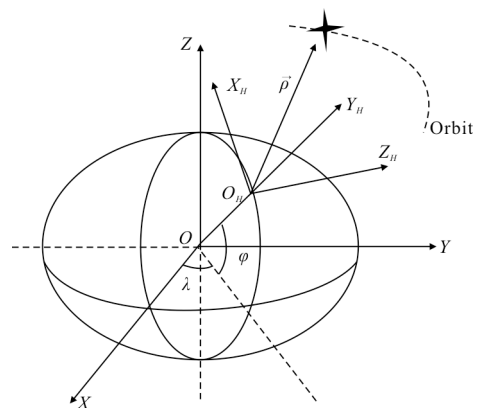


图 1 测站观测目标示意图

Fig.1 Schematic diagram of observation station observed object

误差的估计采用统计量平均误差 $\overline{\Delta X}$ 和标准误

差 σ_x 来衡量, 设测量序列 $\{X_i, i=1, 2, \dots, n\}$, 则 $\overline{\Delta X}$ 为:

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - X_0| \quad (1)$$

式中: X_0 为近似的实验真值。在测量次数有限的情况下, 标准误差 σ_x 采用偏差进行估算。常用的估算方法有最大偏差法、极差法、Bessel 法等。应用中一般使用 Bessel 方法。根据统计理论, 对有限次测量的标准偏差 S_x 为:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left\{ \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right\}} \quad (2)$$

1.2 误差到 FOU 的传递

设轨道预报数据为目标在 J2000 天球坐标系下的位置 $r_1(X, Y, Z)$, 位置的误差估计为 $\Delta r(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ 。则误差修正后, 目标的位置为 $r_0(X+\Delta X, Y+\Delta Y, Z+\Delta Z)$ 。若天球坐标系到地固坐标系的转换矩阵为 (HG) , 则地固坐标系中目标的位置 R_0 为:

$$R_0 = (HG)r_0 \quad (3)$$

式中: $(HG) = (EP)(ER)(NR)(PR)$, (EP) 为极移矩阵, (ER) 为地球自转矩阵, (NR) 为章动矩阵, (PR) 为岁差矩阵。

对空间目标的观测量通常是相对观测站的, 其中方向观测量总是对应赤道系统或地平系统。文中引进站心地平坐标系, 用于跟踪测量目标的方位角 A 、俯仰角 E 和距离 ρ 。设地固坐标系到站心地平坐标系的转换矩阵为 (HR) , 则站心地平坐标系中目标的位置 R_{H0} 为:

$$R_{H0} = (HR)(R_0 - R_A) \quad (4)$$

式中: $(HR) = (1 + \Delta m')R_y(-\pi/2)R_x(\varphi)R_z(\lambda - \pi/2)$, $\Delta m'$ 为测定尺度偏差, 一般情况下 $\Delta m' = 0$, R_x, R_y, R_z 为旋转矩阵, (λ, φ) 为光电跟踪系统的天文经度、纬度; R_A 为地固坐标系中的站址坐标。

根据图 2, 已知 $R_{H0} = (X_{H0}, Y_{H0}, Z_{H0})$, 可按公式(5)计算目标的光学测角资料 (A_0, E_0, ρ_0) , 即:

$$\begin{cases} \rho_0 = \sqrt{X_{H0}^2 + Y_{H0}^2 + Z_{H0}^2} \\ A_0 = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{Z_{H0}}{X_{H0}}\right) \\ E_0 = \arctan\left(\frac{Y_0}{\sqrt{X_{H0}^2 + Z_{H0}^2}}\right) \end{cases} \quad (5)$$

利用三轴光电跟踪系统捕获跟踪目标, 需要将

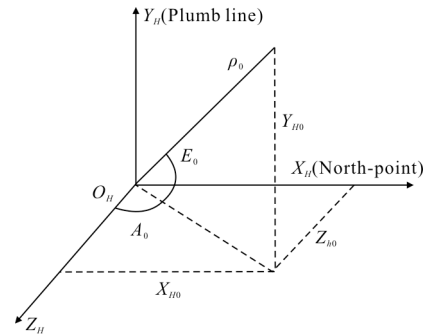


图 2 站心地平坐标系中目标的方向观测量

Fig.2 Direction measurement of the target in the geostationary coordinate system

站心地平坐标系下的目标光学测角资料传递到三轴光电跟踪系统的方位轴 A 、俯仰轴 E 、横倾轴 G , 传递公式为:

$$\begin{cases} A_{e0} = c \\ A_{e0} = i \arctan[\tan(E_0) \sec(A_0 - A_{e0})] + j\pi + k \frac{\pi}{2} \\ G_{e0} = \arctan[\cos(E_0) \sin(A_0 - A_{e0})] \end{cases} \quad (6)$$

式中: c 为常数; $i, j, k = 0$ 或 1 。设三轴光电跟踪系统指向误差的估计为 $\Delta e(\Delta A, \Delta E, \Delta G)$, 则修正指向误差后的指向矢量为:

$$(A_{e0} + \Delta A, E_{e0} + \Delta E, G_{e0} + \Delta G) \quad (7)$$

考虑轨道预报误差和三轴指向误差引起的视轴误差角。将 r_1 按公式(3)-(6)计算得到 (A_{e1}, E_{e1}, G_{e1}) 。设 $(A_{e0} + \Delta A, E_{e0} + \Delta E, G_{e0} + \Delta G, \rho_0)$, $(A_{e1}, E_{e1}, G_{e1}, \rho_1)$ 对应目标在空间中的位置分别为 (X_r, Y_r, Z_r) , (X_p, Y_p, Z_p) 。则视轴误差角 α 为:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\rho_0^2 + \rho_1^2 - D}{2\rho_0\rho_1}\right) \quad (8)$$

其中

$$D = (X_r - X_p)^2 + (Y_r - Y_p)^2 + (Z_r - Z_p)^2$$

$$\begin{cases} X_p = \rho_1 (\sin(A_{e1}) \cos(E_{e1}) \cos(G_{e1}) + \cos(A_{e1}) \sin(G_{e1})) \\ Y_p = \rho_1 (\sin(E_{e1}) \cos(G_{e1})) \\ Z_p = \rho_1 (\cos(A_{e1}) \cos(E_{e1}) \cos(G_{e1}) - \sin(A_{e1}) \sin(G_{e1})) \end{cases}$$

同理可求得 (X_r, Y_r, Z_r) 。

做修正误差后的视轴指向矢量 $\vec{\rho}_0$ 的垂直平面 FOU, 垂足为 O 。以 O 为坐标原点, 沿轨道的运动方向为 X 轴, 右手螺旋法则的方向为 Y 轴建立平面直

角坐标系,如图 3 所示。则 (α_x, α_y) 为:

$$\begin{cases} \alpha_x = k_1 \alpha \cos \theta \\ \alpha_y = k_2 \alpha \sin \theta \end{cases} \quad (9)$$

式中: α_x 为视轴误差角 α 在 FOU 平面 X 轴上的分量; α_y 为视轴误差角 α 在 FOU 平面 Y 轴上的分量; θ 为视轴误差角 α 投影到 FOU 平面内与 X 轴的夹角; k_1, k_2 为投影系数。

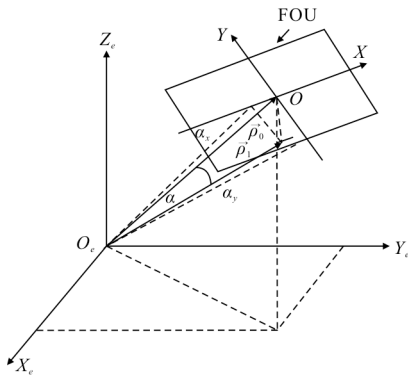


图 3 视轴误差角到 FOU 的投影

Fig.3 Projection from LOS error angle to FOU

1.3 FOU 内搜索扫描方案设计

捕获分析中,已知三轴光电跟踪系统的视场为矩形视场,设视场的长为 a ,宽为 b ,则 FOU 内成功捕获目标的条件为:

$$|\alpha_x(t_i) - \text{Sao}_x(t)| < \frac{a}{2} \wedge |\alpha_y(t_i) - \text{Sao}_y(t)| < \frac{b}{2} \quad (10)$$

式中: (α_x, α_y) 为视轴误差角投影到 FOU 平面的坐标; $(\text{Sao}_x, \text{Sao}_y)$ 为扫描函数在 FOU 平面的坐标。

扫描函数一般分为光栅型和螺旋型,光栅型扫描函数从边缘处的低概率区域开始搜索,而目标在 FOU 内出现的概率通常呈现正态或瑞利分布^[13]。因此,讨论螺旋型扫描函数。

以视轴误差角在 FOU 的 X, Y 方向分量的均值 $(\alpha_{xm}, \alpha_{ym})$ 扫描函数的起点,则在笛卡尔坐标系下的螺旋型扫描函数为:

$$\begin{cases} \text{Sao}_x(t) = \alpha_{xm} + \sqrt{\frac{d_0 v_0 t}{\pi}} \cos\left(\sqrt{\frac{4\pi v_0 t}{d_0}}\right) \\ \text{Sao}_y(t) = \alpha_{ym} + \sqrt{\frac{d_1 v_1 t}{\pi}} \sin\left(\sqrt{\frac{4\pi v_1 t}{d_1}}\right) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $t = (\pi l^2) / \theta^2 F_{AC}$, $t \in [0, T]$ 为扫描时间函数, l 为螺

旋扫描函数以极坐标表示的极轴, F_{AC} 为捕获控制系统带宽, l_0 为扫描间隔, T 为单场扫描时间; d_0, d_1 为螺距; v_0, v_1 为扫描速度。

当 t 为连续的时间函数, 且 $d_0 = d_1 \neq 0, d_0 v_1 = d_1 v_0$ 时螺旋型扫描函数为等线速度等螺距的正螺旋; 当 t 为连续的时间函数, 且 $d_0 \neq d_1, d_0 v_1 = d_1 v_0$ 时螺旋型扫描函数为椭螺旋; 当 t 为分段的时间函数, 则螺旋型扫描函数可以合成分行螺旋扫描。

设视轴误差角投影到 FOU 平面内的概率密度函数为 $f(\alpha_x, \alpha_y)$, 则捕获概率为:

$$P = \int_{\text{FOU}} f(\alpha_x, \alpha_y) d\alpha_x d\alpha_y \quad (12)$$

平均捕获时间为:

$$ET = \int_{\text{FOU}} t \cdot f(\alpha_x, \alpha_y) d\alpha_x d\alpha_y \quad (13)$$

2 仿真实验

2.1 主要误差的估算

轨道预报误差的估计是根据轨道根数的新旧以及质量来进行的, 该仿真采用不同时刻的轨道根数作为 STK (Satellite Tool Kit) 软件的输入, 预测未来某一时刻天球坐标系下目标的位置。以轨道高度 281.56 km 的低轨目标为例, 利用历史轨道根数预测 2007-07-02 08:00:00.000 目标的位置。通过误差估算, X、Y、Z 方向平均误差分别近似为 0 km, 标准误差分别为 7.21、6.00、6.70 km。

三轴指向误差是在方位 A 轴确定的情况下, 得到俯仰轴 E、横倾轴 G 的误差估计。通过外场拍摄测量实验, 拍摄多组恒星数据, 对同一片区域在不同时刻拍摄的两组恒星数据进行实验。第一组数据求解模型的待求参数^[14], 第二组数据估算三轴光电系统的指向误差。当 $A = \pi$ 时, 估算出 E、G 的算术平均误差分别近似为 0", 标准误差分别为 50.72"、24.09"。

2.2 FOU 的计算

按照 1.2、1.3 节的理论分析, 可以计算出目标在 FOU 内可能出现的位置, 即主要误差到 FOU 的传递。计算流程图如图 4 所示。仿真得到 FOU X、Y 方向的概率密度如图 5 所示。

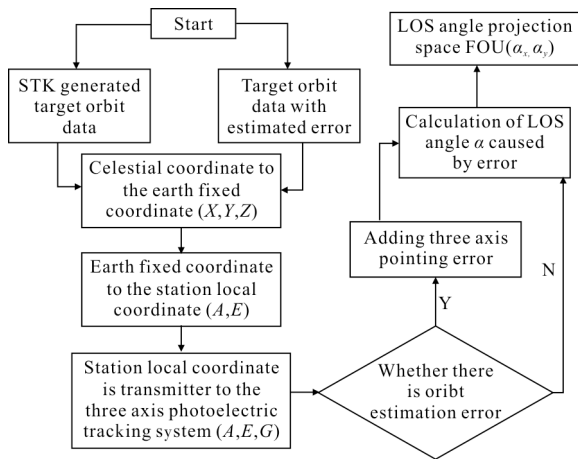


图 4 FOU 仿真计算流程图

Fig.4 Flow chart of FOU simulation calculation

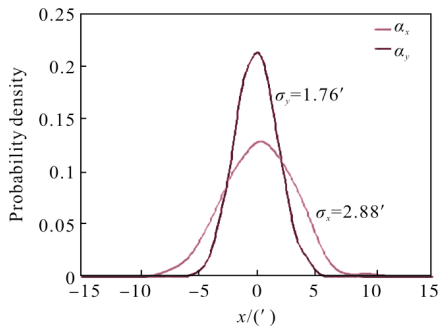


图 5 FOU 内目标位置分布的概率密度图

Fig.5 Probability density of the position distribution of the target in FOU

由 kolmogorov-smirnov 正态检验可知，图 5 中 FOU_X、Y 方向的概率密度为正态分布，且标准误差的大小分别为 2.88'、1.76'，即目标的位置分布形状为长轴在 X 方向的椭圆形。

2.3 扫描方法选择

根据图 5 目标位置的分布特性可知，宜选用椭圆螺旋扫描的方式捕获目标，且 X 方向螺距大于 Y 方向螺距，又已知三轴光电跟踪系统的捕获视场是矩形视场，视场大小为 3'×6'。为保证扫描过程中不出现漏扫以及扫描效率问题，因此将椭圆螺旋扫描方式优化为分行螺旋扫描。

分行螺旋扫描算法描述如下：(1) 当 $t \in [0, t_1]$ 时，以视轴误差角在 FOU 的 X、Y 方向分量的均值 $(\alpha_{xm}, \alpha_{ym})$ 为分行扫描的起点， $(S_x)_1 = \text{Sao}_x, (S_y)_1 = \text{Sao}_y, ((S_x)_1, (S_y)_1)$ 作为分行扫描的第一阶段；(2) 当 $t \in [t_1, t_2]$ 时，令 $(S_x)_2 = \max((S_x)_1), (S_y)_2 = (S_y)_1, ((S_x)_2, (S_y)_2)$

作为分行扫描的第二阶段；(3) 当 $t \in [t_2, t_3]$ 时，令 $(S_x)_3 = (S_x)_2, (S_y)_3 = \max((S_y)_2), ((S_x)_3, (S_y)_3)$ 作为分行扫描的第三阶段；(4) 当 $t \in [t_3, t_4]$ 时，令 $(S_x)_4 = \min((S_x)_3), (S_y)_4 = (S_y)_3, ((S_x)_4, (S_y)_4)$ 作为分行扫描的第四阶段；(5) 按照步骤(1)~(4)依次递推，直到覆盖满足捕获概率要求大小的 FOU，即扫描结束。

图 6 描述了利用矩形视场采用上述算法实现的分行螺旋扫描覆盖 98% 的 FOU，即 $3\sigma_x, 3\sigma_y$ 的区域(椭圆内的区域)^[15]。为防止相邻视场扫描捕获时遗漏观测目标，因此相邻视场的重叠率为 8%。

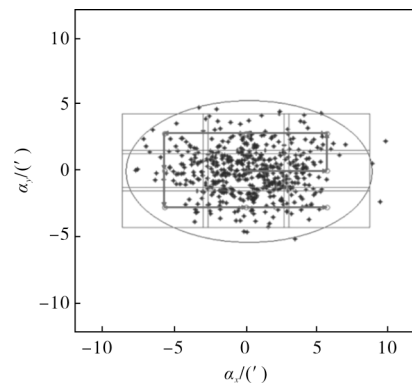


图 6 分行螺旋扫描覆盖 98% 的 FOU

Fig.6 98% of FOUs are covered by branch spiral scanning

设定 $F_{AC} = 20 \text{ Hz}$ ，X、Y 方向扫描间隔分别为 1.75、0.87 mrad。则平均捕获时间为 10.52 s。

3 结论

(1) 文中通过对影响捕获的误差分析与估计，建立了轨道预报误差和三轴指向误差到 FOU 的传递关系，并根据 FOU 的形状、大小及概率密度函数设计出搜索扫描方法。同时给出了捕获概率和平均捕获时间的计算方法。

(2) 根据文中建立的三轴光电跟踪系统的搜索捕获方法进行数值仿真，得到当轨道预报 X、Y、Z 方向误差的标准差分别为 7.21、6.00、6.70 km，三轴的 E、G 轴指向误差的标准差分别为 20.72"、24.09"以及三轴光电跟踪设备视场为 3'×6' 时，在满足捕获概率为 98% 的情况下，平均捕获时间为 10.52 s。

文中有关捕获方法的选择对不同场景下的三轴光电跟踪系统的目标搜索捕获具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Liu Xiaoqiang, Ren Gaohui, Xing Junzhi, et al. Simulation of application of IMM in photoelectric tracking control system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (9): 0917003. (in Chinese)
刘小强, 任高辉, 邢军智, 等. 交互式多模型算法在光电跟踪控制系统中应用的仿真 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45 (9): 0917003.
- [2] Yang Hongtao. Research on the method of improving accuracy of photoelectric tracking system based on multi-source data fusion [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
杨宏韬. 基于多信息源数据融合的光电跟踪系统精度提高方法的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [3] Guan Bolin. Tracking strategy and control method of three-axis photoelectric tracking systems [D]. Xi'an: Xidian University, 2012. (in Chinese)
官伯林. 三轴光电跟踪系统跟踪策略和控制研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [4] Ma Jiaguang. The basic technologies of the acquisition tracking and pointing systems [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1989 (3): 1-42. (in Chinese)
马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. *光电工程*, 1989(3): 1-42.
- [5] Zhang Haibo, Ma Yonghui, Ji Dong, et al. Search method to improve acquisition probability for optoelectronic tracking device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0217003. (in Chinese)
张海波, 马勇辉, 季东, 等. 一种提高光电跟踪设备捕获概率的搜索方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 0217003.
- [6] Zhou Yanping, Fu Sen, Yu Siyuan, et al. Acquisition - probability model of noncooperative maneuvering target detection in space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 639-643. (in Chinese)
周彦平, 付森, 于思源, 等. 天基非合作目标探测中的捕获概率模型[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(4): 639-643.
- [7] Sun J, Liu L, Lu W, et al. Acquisition strategy for the satellite laser communications under the laser terminal scanning errors situation [C]//Free-Space and Atmospheric Laser Communications XI, 2011: 461-465.
- [8] Chen Cheng. A study on damped least-squares tracking strategy for three-axis antenna pedestal [J]. *Modern Radar*, 2015, 37 (7): 44-47. (in Chinese)
陈诚. 三轴天线座阻尼最小二乘跟踪策略研究[J]. *现代雷达*, 2015, 37(7): 44-47.
- [9] Zhang Daxing, Jia Jianyuan, Zhang Aimei, et al. Investigation on tracking strategy of three-axis tracking equipment based on particle swarm optimization [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(9): 1841-1845. (in Chinese)
张大兴, 贾建援, 张爱梅, 等. 基于粒子群算法的三轴跟踪装置跟踪策略研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(9): 1841-1845.
- [10] Liu Xingfa. Study on photoelectric tracking technology for high-elevation object [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
刘兴法. 高仰角目标光电跟踪技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2006.
- [11] Bai Shuai. Research on highly stable acquisition and tracking technologies of space two-axis optoelectronic gimbals [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
白帅. 空间二维光电转台的高稳定捕获跟踪技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [12] Chen Lei, Han Lei, Bai Xianzong, et al. Orbital Dynamics and Error Analysis of Space Object [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
陈磊, 韩蕾, 白显宗, 等. 空间目标轨道力学与误差分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [13] Zhu Botao. Study of bidirectional acquisition technology in intersatellite optical communication [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
朱博韬. 卫星光通信双向扫描捕获技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [14] Zhang Yudie, Liu Wansheng, Luo Yihan, et al. Pointing error modification method for three-axis optoelectronic tracking system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41 (6): 51-55, 74. (in Chinese)
张玉碟, 柳万胜, 罗一涵, 等. 一种三轴光电跟踪系统指向误差修正的方法[J]. *光电工程*, 2014, 41(6): 51-55, 74.
- [15] Wu Tiezhu, Chen Xuejun, Wang Qingsong, et al. Target capturing by antenna scanning in uncertain areas [J]. *Telecommunication Engineering*, 2016, 56(11): 1223-1228. (in Chinese)
吴铁柱, 陈学军, 王青松, 等. 不确定区域天线扫描目标捕获方法[J]. *电讯技术*, 2016, 56(11): 1223-1228.