

低成本卫星测控系统性能改进方法研究

徐秀成, 阳军军

(长沙天仪空间科技研究院有限公司 长沙 410205)

摘要: 首先针对 TLE 更新不及时、轨道递推准确性低的问题, 提出低成本卫星测控系统 (LCTTC) 采用卫星 GPS 实测数据修正站心坐标系下目标轨道方法, 提高跟踪精度; 其次利用接收机的 RSSI 功能, 给出了远程获取无人值守 LCTTC 灵敏度、评估其性能的方法, 以及获取信噪比、发射功率等状态信息的方法, 对卫星实时任务过程进行监测和异常诊断, 减少了故障排查时间。

关键词: 卫星测控系统; TT&C; J2000 坐标系; 坐标转换; 信噪比

中图分类号: TN872 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2022)01-0119-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210408001

引用格式: 徐秀成, 阳军军. 低成本卫星测控系统性能改进方法研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(1): 119–124.

Research on performance improvement method of low cost TT & C system

XU Xiucheng, YANG Junjun

(Changsha Tianyi Space Technology Research Institute Co., Ltd., Changsha 410205, China)

Abstract: Firstly, aiming at the problem that the TLE update is not timely and the accuracy of track recursion is low, A low cost satellite measurement and control system (LCTTC) is proposed, which uses the measured data of satellite GPS to correct the target orbit in the station center coordinate system, so as to improve the tracking accuracy; secondly, using the RSSI function of the receiver, a method to remotely obtain the sensitivity of unattended LCTTC and evaluate its performance is given; and the method of obtaining state information such as signal-to-noise ratio and transmission power, which can monitor and diagnose the real-time task process of the satellite, and reduce the troubleshooting time.

Key words: Satellite TT&C system; TT&C; J2000 coordinate system; Coordinate conversion; SNR

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210408001

Citation: XU Xiucheng, YANG Junjun. Research on performance improvement method of low cost TT&C system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(1): 119–124.

引 言

低成本或者简单卫星测控系统 LCTTC (Low Cost TT&C), 一般不具备标准 TT&C 系统所具有的测量目标角误差和自跟踪功能, 而是采用两行式轨道数据 TLE(Two-Line Element)计算轨道预报。受限于外网更新的滞后性, 按 24 小时算, TLE 轨道外推的精度为 7.5 km, 文献[1]和文献[2]对其精度进行分析, 且文献[2]提出了精度改进方法。如果卫星变轨, TLE 的延迟和误差更大; 而 GPS 有效时定轨位置精度在 10 m 以内。本文提出地面 LCTTC 系统采用卫星实时 GPS 数据进行卫星轨道递推, 和 TLE 递推值进行比较, 当二者角度差大于门限值时以 GPS 递推值为准, 并给出了 GPS 位置数据转换站心极坐标的方法。

为了解决低轨卫星每次过单站时间较短的问题, 任务前, 利用硬件具有接收信号强度指示 RSSI (Received Signal Strength Indicator) 功能, 远程对 LCTTC 地面站性能进行评估, 再结合当前轨道弧段最高仰角等情况, 选择最优的地面站进行测控; 其次, 由于其造价低, 可建设更多的站点, 调度多站联合测控, 满足低轨小卫星的测控需求。

LCTTC 缺少对信噪比、AGC 或发射功率的状态监测, 并且其信道一般为半双工。在卫星测控任务中, 先测试星-地链路, 直到畅通, 再进行测控工作, 这种串行的方式效率低。本文给出通过 RSSI 间接得到信噪比、上行信号环回功率等信息, 及时掌握指令发送时机和执行结果, 同时, 提高系统故障诊断、检测干扰等能力。

1 采用卫星 GPS 遥测数据修正站 TLE 理论轨道

卫星上 GPS 可提供 J2000 平赤道地心坐标系下的位置 (X,Y,Z) 、速度 (X',Y',Z') 信息, 地面站天线控制使用站心地平坐标系下的方位角-俯仰角。为了利用 GPS 数据修正地面理论轨道, 需要将 GPS 数据从 J2000 坐标系转换到站心地平坐标系, 查阅了相关文献未找到二者转换公式。本文采用如下三步实现该转换过程, 然后与 TLE 计算的理论值进行比较, 超过阈值引入 GPS 递推。

1.1 J2000 坐标系到 GWS84 地心坐标系的转换

首先将 J2000 的坐标下的卫星轨道位置数据转换到 GWS84 地心坐标系, J2000 坐标与 WGS84 坐标系的转换关系如下^[3]:

$$r_{\text{WGS84}} = \mathbf{W}(t) \cdot \mathbf{R}(t) \cdot \mathbf{Q}(t) \cdot r_{\text{J2000}} \quad (1)$$

式(1)中, r_{WGS84} 表示 WGS84 坐标系下的向量, r_{J2000} 表示 J2000 坐标系下的向量, $\mathbf{Q}(t)$ 、 $\mathbf{R}(t)$ 、 $\mathbf{W}(t)$ 分别表示岁差章动矩阵、地球自转矩阵和极移矩阵, 其中 $\mathbf{Q}(t)$ 、 $\mathbf{W}(t)$ 可通过 IAU2000 地球自转模型计算; $\mathbf{R}(t)$ 可使用式(2)计算得到, GAST 为格林尼治视恒星时:

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}_z(\text{GAST}) \quad (2)$$

\mathbf{R}_z 表示绕 z 轴旋转阵, 表示如下式:

$$\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2 GWS84 地心坐标系到站心地平直角坐标系的转换

需将 GWS84 坐标系的卫星轨道位置坐标转换到站心坐标系, 地心坐标系与站心地平坐标系的关系如图 1 所示。测站站心 P_0 为原点的站心地平坐标系 xyz , 其中 z 轴为站心点的法线方向, 地平面上的子午线方向为 X 轴, Y 轴为 X 、 Z 轴正交且指向东为正的方向; 测站的大地坐标为 (B_0, L_0, H_0) , 对应的地心直角坐标系的坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) , 则地心坐标系到站心地平直角坐标系的转换关系可表示为^[4,5]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_x(90^\circ - B_0) \cdot \mathbf{R}_z(90^\circ + L_0) \cdot \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

式(4)中, (x,y,z) 表示向量在站心地平直角坐标系的坐标, (X,Y,Z) 表示向量在地心坐标系的坐标, 展开得 GWS84 地心坐标系到站心地平直角坐标系的转换关系表示如式(5):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ -\sin B_0 \cos L_0 & -\sin B_0 \sin L_0 & \cos B_0 \\ \cos B_0 \cos L_0 & \cos B_0 \sin L_0 & \sin B_0 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

1.3 站心地平直角坐标系与站心地平极坐标系的转换

在站极坐标系下, 用测站 P_0 至卫星 S 的距离 r 、天线方位角 A 、俯仰角 h 确定的卫星位置为:

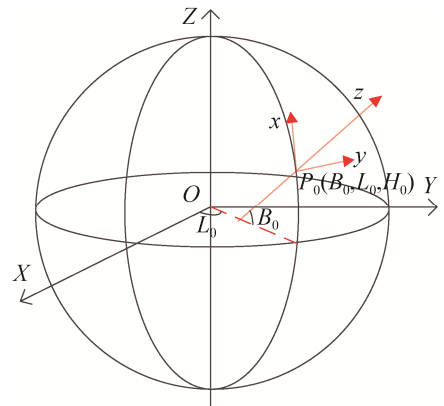


图 1 地心坐标系与站心地平坐标系关系图
Fig. 1 Relationship between geocentric coordinate system and station center horizontal coordinate system

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ A = \arctan(y/x) \\ h = \arctan\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \end{cases} \quad (6)$$

通过上述变换，最终获得卫星 S 在站心地平极坐标系下的方位角和俯仰角。

1.4 评估和修正理论轨道流程

采用 GPS 数据评估和修正理论轨道的流程如图 2 所示。首先，在卫星进站前查看所用 TLE 的更新时间，如果较新，比如在 8 小时内，则不作改变，否则将采用上一轨卫星遥测中 GPS 信息递推轨道。其次，在跟踪过程中，如果信噪比低，但收到了最新 GPS 数据，则对其处理，得到本圈轨道递推，与当圈 TLE 递推角度进行比较，当角误差值超过地面天线主波束半功率（3 dB）宽度的一半时，采用 GPS 递推值控制天线。

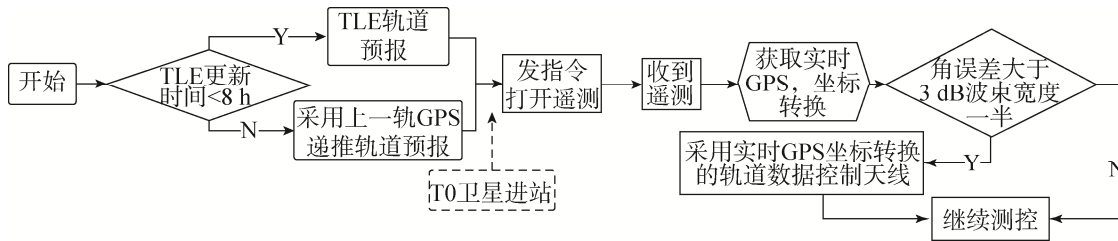


图 2 采用 GPS 数据评估和修正理论轨道的流程

Fig. 2 Flow chart of theoretical orbit evaluation and correction with GPS data

图 3 是某星变轨后 TLE 递推的地面站天线角度和卫星 GPS 实测值转换的天线角度差曲线，由图可见，卫星仰角越高，二者偏差越大。某地面站天线 3 dB 波束宽度是 2°，当指向误差超过 1°时，信噪比会有较大损失，此时应采用 GPS 递推轨道控制天线减小指向误差。

2 任务前的 LCTTC 性能远程评估和选择判决

接收机灵敏度是评估 TT&C 系统性能的一个重要指标，其值等于噪声基底（以下简称底噪）与最小解调门限之和。对于远程控制的无人值守 LCTTC 站，一般未配备远程测试系统，难以获取当前接收机的灵敏度。通常接收机所使用的射频芯片，如 AX100（GS100）、AX5043，信号在接收链路上多个位置的 RSSI 值可被读取出来^[6]，经过换算间接获得系统灵敏度。

将天线垂直指向天空或者将接收链路输入端接 50 Ω 匹配负载时其输入热噪声为 -174 dBm/Hz，那么接收机 RSSI 检测处的底噪理论值为：

$$RSSI_{Noise} = -174dBm / Hz + NF + 10lgBW \quad (7)$$

根据文献[7]带宽 BW 设置为 1.5 倍数据比特率，例如取比特率 19 200 B/s，BW=230.4 kHz，当 NF=1.5 dB 时，则理论值 RSSI_{Noise} = -118.8 dBm，实测的 RSSI 还包括环境噪声。为了降低环境噪声的干扰而接近理论值 RSSI_{Noise}，进而比较 NF。首先，分析环境噪声与仰角的关系。远程控制天线仰角从 0° 转到 90°，得到的 RSSI 曲线如图 4 所示。由图可知，仰角越高，环境噪声越低，在仰角高于约 45°时底

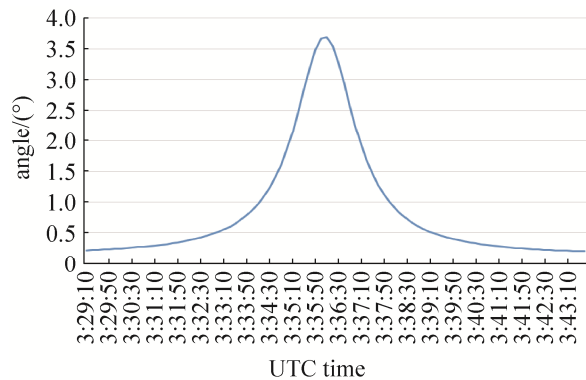


图 3 采用 TLE 计算仰角和 GPS 推导对比

Fig. 3 Comparison of elevation angle calculation by TLE and GPS derivation

噪保持一个较低的水平, 下面选择仰角为 45° 时进行底噪测试。其次, 在低环境噪声下比较两站的底噪。让 A、B 两站天线以相同的 45° 仰角、在方位向上转一周, 测得 RSSI 曲线如图 5 所示, 取各站 RSSI 的平均值作为底噪, 进一步显示了 A 站底噪低于 B 站, 这与两站的实际工作表现相符。底噪和解调门限叠加即得到接收机灵敏度, 该远程测量灵敏度的方法为评估地面站性能提供了依据。

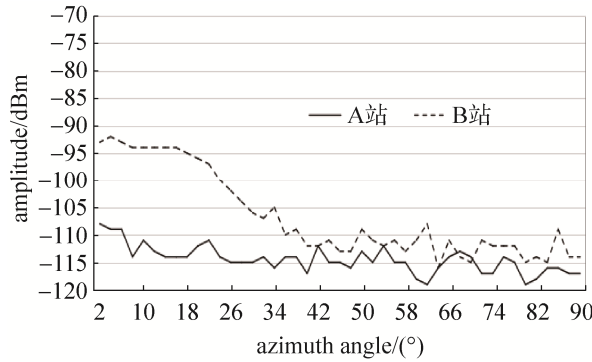


图 4 环境噪声与天线仰角的关系

Fig. 4 Relationship between ambient noise and elevation angle of antenna

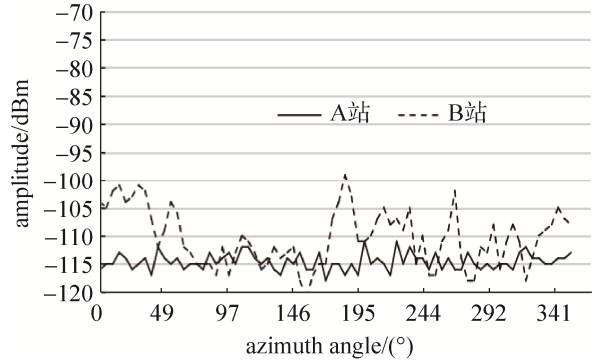


图 5 A、B 两站底噪的比较

Fig. 5 Comparison of bottom noise between station A and station B

3 任务中状态判别优化和提高异常诊断能力

在测控卫星过程中, 下行信号质量取决于地面站接收端接收到的信号功率电平和接收系统的噪声功率电平, 一般用信噪比表示。在任务中获取信号的 RSSI 值, 再减去第 2 节中得到的底噪, 即可得到信噪比的粗略值, 然后判断链路余量是否超过 5 dB 的工程要求^[8]。

根据天线收发的互易性, 在向卫星发指令时, 虽然有收发隔离, 但上行射频信号的一部分会从天线反馈回来, 通过各接收通道 RSSI 显示 (为了保护低噪声放大器 LNA 和基带不被烧毁, 有限幅措施), 能够检测上行信号功率是否发出。

3.1 RSSI 获取实时信噪比

图 6 为某地面站测控某星时的 RSSI 曲线, 可以看到, 曲线上第一个脉冲即为发送“下发遥测指令 (帧间隔 5 s)”后的上行信号反馈, 卫星收到该指令后, 开始连续下发遥测数据, 本次共下发 200 帧遥测数据; 位于卫星过站中段的仰角较高时的约 18 个幅度高于解调门限的遥测信号被解调出遥测数据。

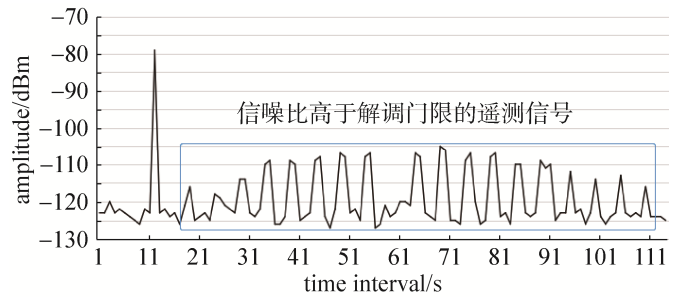


图 6 接收信号 RSSI 曲线

Fig. 6 RSSI curve of received signal

设 RSSI 采样间隔 0.5 s, 当采集的 RSSI 值大于第 2 节中测得的当前仰角下的底噪 7 dB 时 (按解调门限 7 dB), 记为 $R(n)$, 对应时间 T_N , 表示第 N 个脉冲开始, 再采集 $T_N + 1.5s$ 、 $T_N + 2s$ 、 $T_N + 2.5s$ 的 RSSI 值, 剔除大值 (超过底噪 7 dB), 其余值取均值记为 $R_{\text{bottom}}(n)$, 作为 N 号脉冲的底噪, $R(n) - R_{\text{bottom}}(n)$ 即为此时的信噪比。

当下行链路外接 LNA (低噪声放大器) 时, RSSI 为了真实反应天线后端的电平, 需要修正 RSSI, 由基带处测得的 RSSI (即 $P_{\text{in}} + G_{\text{real}}$) 减去 LNA 增益 G_{real} 的较准值 G_{cal} , 这样得到的 RSSI 代表天线后端的信号电平, 就和链路预算^[9]完全符合:

$$RSSI_{\text{pin}} = P_{\text{in}} + G_{\text{real}} - G_{\text{cal}} \quad (8)$$

则式 (7) 变为:

$$RSSI_{noise} = -174\text{dBm/Hz} + NF + 10\lg BW + G_{real} - G_{cal} \quad (9)$$

式(9)即为外接LNA时的RSSI检测值表达式。当LNA故障,增益 $G_{real} = 0$, RSSI等于噪声基底减去 G_{cal} , RSSI比正常值低 G_{real} 。同理,在无卫星过站或者没有开始下发遥测指令和明文时,如果RSSI值比正常值高一定值,说明有干扰。

3.2 检测上行功率是否发出和极化隔离效果

图6中第一个脉冲明显高于其后的遥测信号,是上行指令信号的反馈。主、备两天线的极化是呈相互正交的方向安装的,备天线收到的信号比主天线收到的弱,从图7中可见,相差大约55 dB,这就是极化隔离的结果。

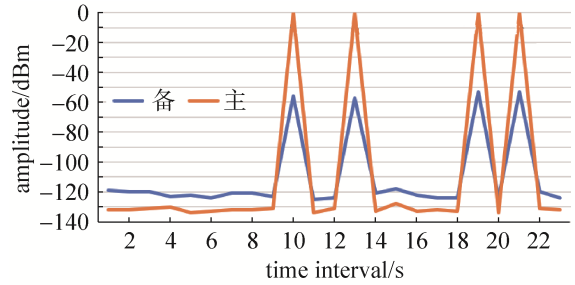


图7 上行功率环回(横轴间距1S)

Fig. 7 Uplink power loopback (Horizontal axis spacing 1s)

3.3 任务执行状态判决改进

LCTTC原来在任务中,先测试星-地链路(如发Ping指令),直到畅通,再进行测控工作,这种串行的方式效率低,其过程如图8所示。

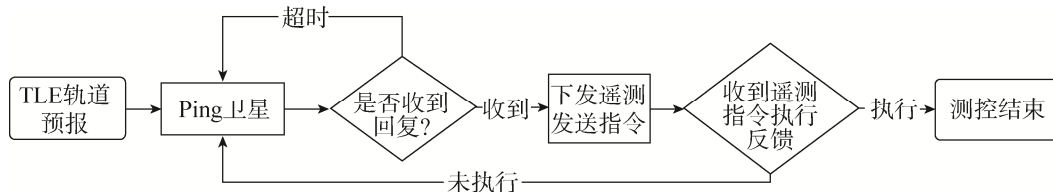


图8 原任务执行流程

Fig. 8 Original task execution process

如前所述,在具备了获取GPS轨道数据、底噪和信噪比SNR等能力以后,不再需要反复测试信道,只需要在“未收到遥测”、“指令未执行”状态时,人工查看或者程序判读(任务自动运行)相应的状态指示,任务流程可以改进为如图8所示的监视和任务执行并行的流程。

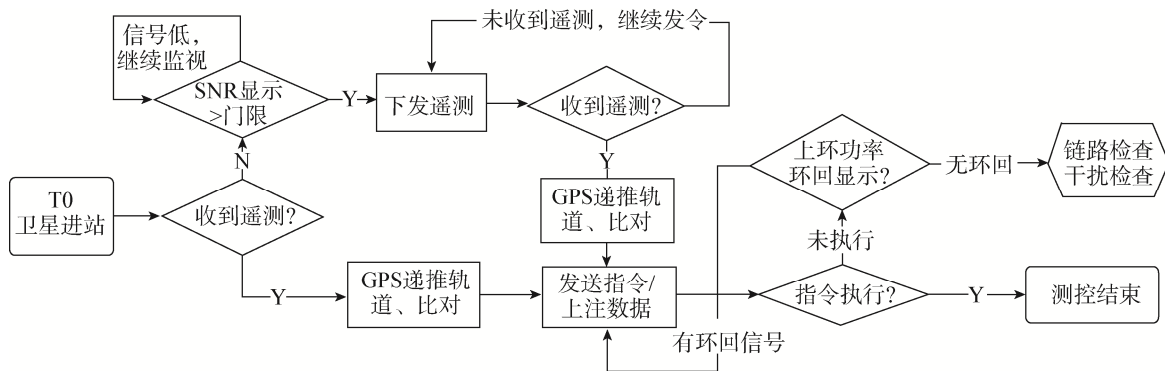


图9 测控任务执行和故障排除流程图

Fig. 9 Flow chart of measurement and control task execution and troubleshooting

4 结束语

本文给出了将卫星上J2000坐标系的GPS位置数据转换为地面站心极坐标系下的方位角/俯仰角的方法,并用于修正天线跟踪角度,提高了地面站跟踪精度。围绕测控任务需要,该方法通过RSSI功能获取接收机灵敏度、信噪比、上行信号耦合信号指示,为任务前选择最优地面站提供依据;方法为任务执行提供信号质量和链路状况判断,为任务流程自动运行提供判决条件,提高了地面站任务执行效率。

在遇到链路中断、电磁干扰时, 该方法有助于快速得到反馈, 缩短平均故障修复时间 (MTTR), 同时在实际任务中得到了较好的验证。

参考文献

- [1] 孙靖, 胡松杰, 平劲松. 低轨道空间目标 TLE 及 SGP4 轨道计算精度分析[C]//2008 年测绘科学前沿技术论坛论文集, 2008: 1-5.
- [2] 刘卫, 王荣兰, 刘四清, 等. TLE 预报精度改进及碰撞预警中的应用[J]. 空间科学学报, 2014, 34(4): 449-459.
LIU Wei, WANG Ronglan, LIU Siqing, et al. TLE prediction accuracy improvement and its application in collision warning[J]. Chinese Journal of Space Science, 2014, 34(4): 449-459.
- [3] 张捍卫, 郑勇, 马高峰. GCRS 与 ITRS 之间的坐标转换研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(1): 63-67.
- [4] 凌震莹. 大地坐标系与站心地平直角坐标系的坐标转换[J]. 声学及电子工程, 2009, 4: 31-34.
- [5] 伍吉昌, 邓康伟, 陈永奇. 地心坐标系与站心坐标系中的速度转换及误差传播[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(3): 13-18.
- [6] AXSEM.AX5043-advanced high performance ASK and FSK narrow-band transceiver for 27-1050 MHz range [EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/569e38f8360cba1aa911da18.html>.
- [7] NanoCom AX100. AX100 manual manual software documentation release v3.7[EB/OL].www.gomspace.com.2016: 32.
- [8] 微小卫星总体设计与工程实践[M]. 北京: 科学出版社. 2016: 139-146.
- [9] Peter F, Graham S, John S, 等主编. 航天器系统工程[M]. 李靖, 范文杰, 刘佳, 等译. 北京: 科学出版社, 2014: 392-394.

[作者简介]

徐秀成 1976 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星测控技术。

阳军军 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星姿态控制。

(本文编辑: 杨秀丽)