

FY-4A 静止气象卫星转发器时延在轨标定^{*}鲁文强^{1,2,3} 黄勇^{1,3}

(1. 中国科学院上海天文台 上海 200030; 2. 国家卫星气象中心 北京 100081; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 观测数据的系统差是影响卫星定轨精度的主要因素,其中卫星转发器时延由于难以直接在轨测量获取,因此成为FY-4A静止气象卫星观测数据系统差的主要来源之一。针对该问题,首先对原有的FY-4A静止气象卫星转发器时延在轨标定方案进行了介绍并分析,发现该方案由于待估参数过多导致无法获得卫星转发器时延,随后提出了一种新的在轨标定方法,利用动力学精密定轨分析得到FY-4A气象卫星转发器时延与地面校正值差异在2 m左右,结果表明该方法可以有效的反演FY-4A气象卫星转发器时延在轨变化情况。

关键词: FY-4A 静止气象卫星;卫星转发器时延;在轨标定

中图分类号: P207; TN927.22 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4020

On-orbit calibration of FY-4A geostationary meteorological satellite transponder time delay

Lu Wenqiang^{1,2,3} Huang Yong^{1,3}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

2. National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081, China;

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

Abstract: The system error of the observation data is the main factor that affects the accuracy of satellite orbit determination. The delay of the satellite transponder is difficult to obtain directly from the orbit measurement, so it has become one of the main sources of the system error of the FY-4A stationary meteorological satellite observation data. In response to this problem, this article first introduces and analyzes the original FY-4A geostationary meteorological satellite transponder time delay calibration scheme, which was found that the solution was unable to obtain satellite transponder delay due to too many parameters to be estimated. Subsequently, a new on-orbit calibration method was proposed that the difference between the time delay of the FY-4A meteorological satellite transponder and the ground correction value was about 2 m by using the dynamic precision orbit determination analysis. The results show that the method can effectively retrieve the on-orbit variation of the FY-4A weather satellite transponder.

Keywords: FY-4A geostationary meteorological satellite; satellite transponder time delay; on-orbit calibration

0 引言

FY-4A静止气象卫星上搭载了众多高精度载荷^[1-4],原有的FY-2卫星三点测距体制^[5]已不能满足FY-4A载荷数据的定位精度要求,而卫星精密轨道确定和高精度轨道预报是获取高精度定量观测数据和卫星安全管理控制的必要前提和重要保障。但是由于GEO卫星轨道距地面36 000 km,几何构型非常差^[6-7],同时卫星与地面跟踪站相对位置变化小,导致系统误差很难被分离,因此GEO卫星高精度测定轨成了当前研究难点^[8-11]。美国、欧洲、日

本以及中国的学者对GEO卫星观测技术和定轨理论展开了一系列研究和实验^[12-15]。如地基测定轨方法有测距跟踪、干涉测角跟踪以及测距测角联合跟踪,天基测距测速技术包括卫星跟踪和星载GNSS跟踪技术,天地基联合定轨等方法。

为了进一步提高FY-4A卫星的定轨精度,本文通过分析观测数据中系统差的影响因素,并针对难以测量的卫星转发器时延误差,利用动力学精密定轨分析得到FY-4A卫星转发器时延与地面校正值差异在2 m左右,为提高测距精度奠定了基础。

收稿日期:2020-12-23

^{*} 基金项目:国家自然科学基金项目(U1931119)资助

1 FY-4A 观测数据系统差

1.1 系统工作原理

FY-4A 静止气象卫星定点于东经 105°, 北京、佳木斯、乌鲁木齐、广州、腾冲 5 个测距站同时观测, 对卫星进行转发式测距, 采用码分多址技术体制, 数据采样率为 1 s, 观测模式为每小时或每半小时连续观测 10 min, 从而得到 S 波段与 L 波段的测距数据。

测距数据预处理子系统接收测距数据、电离层修正值等, 经过野值剔除和修正后, 将修正后的数据送卫星轨道确定子系统。卫星轨道确定子系统接收修正后的测距数据, 输出定轨结果及测量数据残差分析处理等工作。卫星轨道预报子系统接收定轨结果, 推算出需要时刻的轨道。综合精度评估子系统接收轨道确定子系统的定轨文件和轨道预报子系统的轨道预报文件, 输出轨道精度评估结果。

1.2 观测数据系统差修正

系统差的误差源主要包括以下几类: 与卫星有关的系统误差(如卫星钟差、卫星转发器延迟误差等)、与地面测站有关的系统误差(地面设备时延变化误差、站址偏差等)、与传播路径有关的系统误差(对流层折射引起的等效距离误差和电离层引起的等效距离误差等)。

1) 电离层延迟误差

电离层延迟误差是基于多站测距体制的 GEO 卫星定轨过程中较大的误差源, 由此引起的误差最大时可达 150 m, 最小时可达 5 m。FY-4A 气象卫星使用双频改正法, 修正后电离层误差可达 1 m 以内。

2) 中性大气延迟误差对流层延迟误差影响也是基于多站测距体制的 GEO 卫星定轨过程中主要误差源之一, 主要是由对流层对电磁波的传播速度影响引起, 对低仰角卫星, 对流层总延迟最大可达 30 m, FY-4A 气象卫星使用改进的 Hopfield 模型, 模型所需要的温度、湿度、气压等参数, 由每个测站配备的自动气象站提供, 修正后对流层延迟误差优于 0.5 m。

3) 地面设备时延变化误差

由于温度、工作频率等因素影响, 调制信号会产生相位漂移误差, 从而影响群时延特性, 一般条件下一天时延的变化在 1~2 m 范围内, 经过标定后精度优于 1 m。

4) 卫星转发器时延误差

卫星转发器时延在地面测量得到, 但是卫星发射到太空后, 工作环境处于真空状态, 并且对于三轴稳定的卫星来说, 一面受到太阳照射温度为几百度, 另外一面温度为零下几十度。如此大的环境变化, 可能会导致卫星转发器的时延与地面状态相比发生一定变化。然而由于目前条件所限, 无法直接测量其在太空环境下的真值, 因此厂家在 FY-4A 气象卫星尚未发射时设计了一种方案对卫星转发器时延进行求解^[16-18], 下面使用 FY-4A 气象卫星的真实观测数据对该方案进行论证。

2 原方案论证

2.1 原方案介绍

风云四号 5 个测距站通过双频测距工作, 可以得到下述方程:

$$\begin{cases} R_{i,S} - R_{i,S,zero} = 2\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} + \\ R(f_{S1}, TEC_i) + R(f_{S2}, TEC_i) + R_{S,sat} \\ R_{i,L} - R_{i,L,zero} = 2\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} + \\ R(f_{L1}, TEC_i) + R(f_{L2}, TEC_i) + R_{L,sat} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i=1, 2, 3, 4, 5$; x, y, z 为卫星的位置; x_i, y_i, z_i 为地面站的位置; $R_{i,S}$ 为地面站 i —卫星—地面 i 下行频率为 f_S (S 波段) 的伪距观测值; $R_{i,L}$ 为地面站 i —卫星—地面 i 下行频率为 f_L (L 波段) 的伪距观测值; $R_{i,0}$ 为地面站 i 到卫星距离; TEC_i 为测站电离层电子浓度总含量; $R_{S,sat}$ 、 $R_{L,sat}$ 为 S 波段和 L 波段的卫星转发时延; $R_{i,S,zero}$ 、 $R_{i,L,zero}$ 为测站 i 的设备时延。

因此可以得到 10 个方程, 如式(2)所示。

$$\begin{aligned} & 2\sqrt{(x_1-x1)^2 + (y_1-x2)^2 + (z_1-x3)^2} + a \cdot \\ & x4 + b \cdot x4 + x9 = S_{1,S} \\ & 2\sqrt{(x_1-x1)^2 + (y_1-x2)^2 + (z_1-x3)^2} + a \cdot \\ & x4 + x4 + x10 = S_{1,L} \\ & 2\sqrt{(x_2-x1)^2 + (y_2-x2)^2 + (z_2-x3)^2} + a \cdot \\ & x5 + b \cdot x5 + x9 = S_{2,S} \\ & 2\sqrt{(x_2-x1)^2 + (y_2-x2)^2 + (z_2-x3)^2} + a \cdot \\ & x5 + x5 + x10 = S_{2,L} \\ & 2\sqrt{(x_3-x1)^2 + (y_3-x2)^2 + (z_3-x3)^2} + a \cdot \\ & x6 + b \cdot x6 + x9 = S_{3,S} \\ & 2\sqrt{(x_3-x1)^2 + (y_3-x2)^2 + (z_3-x3)^2} + a \cdot \\ & x6 + x6 + x10 = S_{3,L} \\ & 2\sqrt{(x_4-x1)^2 + (y_4-x2)^2 + (z_4-x3)^2} + a \cdot \\ & x7 + b \cdot x7 + x9 = S_{4,S} \\ & 2\sqrt{(x_4-x1)^2 + (y_4-x2)^2 + (z_4-x3)^2} + a \cdot \\ & x7 + x7 + x10 = S_{4,L} \\ & 2\sqrt{(x_5-x1)^2 + (y_5-x2)^2 + (z_5-x3)^2} + a \cdot \\ & x8 + b \cdot x8 + x9 = S_{5,S} \\ & 2\sqrt{(x_5-x1)^2 + (y_5-x2)^2 + (z_5-x3)^2} + a \cdot \\ & x8 + x8 + x10 = S_{5,L} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $x1, x2$ 和 $x3$ 为卫星坐标; $x4 \sim x8$ 分别为各站到卫星方向上 L 频段电离层的时延; $x9$ 为 S/S 转发器时延; $x10$ 为 S/L 转发器时延。其中 $a = 0.684\ 035$, $b = 0.577\ 927$ 。通过上述 10 个方程, 可以求解出电离层造成的时延、卫星转发器时延以及卫星位置。

2.2 原方案论证

为了求解待估参数, 本文使用 FY-4A 气象卫星

2019 年 5 月 6 日~2019 年 5 月 8 日 5 个测距站的真实观测数据,并利用间接平差方法,列出误差方程,使用相关公式并进行多次迭代得出待估参数。步骤如下:

- 1) 选择 t 个独立量作为参数。
- 2) 将每一个观测量的平差值分别表达成所选参数的函数,若函数为非线性,则线性化。
- 3) 由误差方程系数 B 和自由项 l 组成法方程,法方程

个数等于参数个数,如式(3)所示。

$$B^T P B \hat{x} - B^T P l = 0 \quad (3)$$

4) 解算法方程,求出参数,如式(4)所示。

$$\hat{x} = B^T P B^{(-1)} B^T P l \quad (4)$$

下面采用该方法对不同数目的待估参数进行分析。

1) 求解所有待估参数

如表 1 所示,可以发现有多项数值错误,因此下面不解卫星坐标,试图只解算 6 个参数。

表 1 解算所有待估参数结果

待估参数	2019-05-06	2019-05-07	2019-05-08
卫星 ECF 坐标 X	-10 709 533.81	-10 707 449.32	-10 702 899.10
卫星 ECF 坐标 Y	40 798 573.56	40 802 805.46	40 800 873.15
卫星 ECF 坐标 Z	85 399.26	84 050.85	83 109.01
北京站 L 波段电离层时延	7.88	4.00	7.31
佳木斯站 L 波段电离层时延	-0.29	-1.53	-0.57
乌鲁木齐站 L 波段电离层时延	4.56	5.98	4.06
广州站 L 波段电离层时延	10.34	10.85	10.80
腾冲站 L 波段电离层时延	5.92	7.70	7.75
卫星转发器时延	7 688.80	181.43	5 794.94

2) 求解待估 6 参数

首先利用 3 天的数据进行定轨,将定轨得到的卫星坐

标作为先验值固定,只解其他 6 个参数,如表 2 所示,发现仍然有多项数值解算错误。

表 2 解算 6 个待估参数结果

待估参数	2019-05-06	2019-05-07	2019-05-08
北京站 L 波段电离层时延	8.150 0	7.595 5	8.383 9
佳木斯站 L 波段电离层时延	7.887 2	6.488 0	7.414 5
乌鲁木齐站 L 波段电离层时延	5.176 6	4.898 5	4.967 5
广州站 L 波段电离层时延	7.102 0	7.200 3	6.945 6
腾冲站 L 波段电离层时延	0.107 8	0.827 2	1.667 2
卫星转发器时延	0.209 3	0.734 0	-0.202 4

3) 仿真解算卫星坐标及转发器时延

由于仿真数据无电离层误差,列方程如下进行计算,方程右侧为仿真数据,方程左侧 x_1, x_2, x_3 为卫星坐标, x_4 为转发器时延。

$$2\sqrt{(x_1 - x_1)^2 + (y_1 - x_2)^2 + (z_1 - x_3)^2} + x_4 = S_1$$

$$2\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - x_2)^2 + (z_2 - x_3)^2} + x_4 = S_2$$

$$2\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - x_2)^2 + (z_3 - x_3)^2} + x_4 = S_3$$

$$2\sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - x_2)^2 + (z_4 - x_3)^2} + x_4 = S_4$$

$$2\sqrt{(x_5 - x_1)^2 + (y_5 - x_2)^2 + (z_5 - x_3)^2} + x_4 = S_5$$

(5)

用国内 5 站数据进行计算结果如表 3 所示,发现卫星

转发器时延解算错误。

表 3 解算 4 个待估参数结果

待估参数	数值
卫星 ECF 坐标 X	-10 703 707.364 2
卫星 ECF 坐标 Y	40 803 797.148 8
卫星 ECF 坐标 Z	82 915.553 8
卫星转发器时延	-274.394 5

4) 固定转发器时延只解算卫星坐标

固定转发器时延差值为 10 m,只解算卫星坐标,可以列出如下方程,方程右侧为仿真数据,方程左侧 x_1, x_2, x_3 为卫星坐标。

$$\begin{aligned} 2\sqrt{(x_1-x_1)^2+(y_1-x_2)^2+(z_1-x_3)^2}+10 &= S_1 \\ 2\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-x_2)^2+(z_2-x_3)^2}+10 &= S_2 \\ 2\sqrt{(x_3-x_1)^2+(y_3-x_2)^2+(z_3-x_3)^2}+10 &= S_3 \\ 2\sqrt{(x_4-x_1)^2+(y_4-x_2)^2+(z_4-x_3)^2}+10 &= S_4 \\ 2\sqrt{(x_5-x_1)^2+(y_5-x_2)^2+(z_5-x_3)^2}+10 &= S_5 \end{aligned} \quad (6)$$

使用仿真数据进行计算,发现方程可解,得到解算卫星坐标结果如表 4 所示,数值十分接近真实卫星坐标,将转发器时延在百米量级变动,发现仍然可解。

表 4 解算卫星坐标结果

待估参数	数值
卫星 ECF 坐标 X	-10 703 672.144 5
卫星 ECF 坐标 Y	40 803 660.055 9
卫星 ECF 坐标 Z	82 930.258 3

5) 论证结论

由上述计算结果可知,该方程只有 3 个参数时能够求解,但加上卫星转发器时延以及电离层延迟后,方程相关性变强,解出来的卫星转发器时延数据异常,因此该方案在目前阶段实际实施起来存在一定困难,需要寻找其他方法求解卫星转发器时延。

3 新方案

3.1 原理

站星测距观测方程可表示为:

$$\rho_i(t) = \bar{\rho}_i(t) + \frac{1}{2}\tau(t) + \epsilon_i \quad (7)$$

式中: $\bar{\rho}_i(t) = \sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}$; $\rho_i(t)$ 为 t 时刻的伪距观测值; x, y, z 和 x_i, y_i, z_i 分别为 t 时刻卫星和测站 i 的惯性系坐标; $\tau(t)$ 为 t 时刻卫星的转发器时延; ϵ_i 为测站 i 的系统差及其他传输延迟。

考虑动力学模型, GEO 卫星状态方程形式上可表达如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \boldsymbol{\Phi}(t, t_0) \mathbf{X}_0 \\ t = t_0, \boldsymbol{\Phi}(t, t_0) = \mathbf{I} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\boldsymbol{\Phi}(t, t_0)$ 为 GEO 卫星的状态转移矩阵, $\mathbf{X}$ 可表示为:

$$\mathbf{X} = [\bar{\mathbf{r}}^T \quad \bar{\mathbf{V}}^T \quad \bar{\mathbf{c}}^T]^T \quad (9)$$

式中: $\bar{\mathbf{r}} = [\bar{x} \quad \bar{y} \quad \bar{z}]^T$ 为卫星的位置向量; $\bar{\mathbf{V}} = [\bar{v}_x \quad \bar{v}_y \quad \bar{v}_z]^T$ 为卫星的速度向量; $\bar{\mathbf{c}}$ 为卫星的光压及经验力等其他待解参数向量。

线性化式(9)得到:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X}_0 + \mathbf{V} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{H} = (\partial \rho_i^{12} / \partial \mathbf{X}) \boldsymbol{\Phi}(t, t_0)$, $\mathbf{Y} = -L = \rho_i^{12}(t) - \bar{\rho}_i^{12}(t)$ 。

如果观测值的权阵为 $\mathbf{W}$, 用最小二乘法求解初始时刻的轨道及其他参数, 则:

$$\hat{\mathbf{X}}_0 = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{L} \quad (11)$$

参数的协方差矩阵为:

$$\mathbf{D}_{\hat{\mathbf{X}}_0} = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \quad (12)$$

其中, $\hat{\sigma}_0^2$ 为单位权中误差。如果考虑参数的先验信息, 并用迭代方法, 可以得到式(13):

$$\begin{cases} d\mathbf{X}(t_0)^{n+1} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H} + \mathbf{D}_A^{-1})^{-1} (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{L} + \mathbf{D}_A^{-1} (\bar{\mathbf{X}}_A - \bar{\mathbf{X}}_{(n)})) \\ \hat{\mathbf{X}}(t_0)^{n+1} = \hat{\mathbf{X}}(t_0)^n + d\mathbf{X}(t_0)^{n+1} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{D}_A$ 为参数的先验协方差矩阵; $\hat{\mathbf{X}}^{(n+1)}$ 和 $\hat{\mathbf{X}}^{(n)}$ 分别为第 $n+1$ 和 n 次迭代计算的估值; $\bar{\mathbf{X}}_A$ 为第 n 次计算的估值, 也可作为初始的估值, 这时参数的误差方差矩阵为:

$$\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}(t_0)} = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H} + \mathbf{D}_A^{-1})^{-1} \quad (14)$$

在获得相关参数初值的基础上, 积分运动学变分方程, 可以得到卫星轨道及相关参数。

3.2 结果分析

卫星的转发器时延在 1 天内通常认作为一个常数, 与轨道参数一起求解。轨道计算软件采用了上海天文台自主研发的测定轨软件。表 5 所示为道计算中使用的一些参数设置。

表 5 FY-4A 精密定轨的动力学模型及解算策略

观测量	参数/模型
观测量类型	消电离层组合的伪距观测值
采样率	1 s
动力学类型	参数/模型
地球重力场	EIGEN_GL04C(10 阶)
行星历表	DE421(JPL)
EOP	IERS
太阳光压	固定面质比
参数估计与数据质量控制	处理策略
参数估计	卫星初始状态(位置、速度) 卫星转发器时延误差
积分步长	30 sec
定轨弧长	24 h

使用 2019 年 5 月 1 日~2019 年 5 月 30 日观测数据进行定轨, 对卫星转发器时延误差进行估计, 计算结果如图 1 所示。

从图 1 中可以发现, 卫星在轨时转发器时延误差在 2 m 左右, 并且该值还包含了微小的径向轨道误差, 因此可以认为卫星转发器在轨后相对于地面测的时延变化较小。

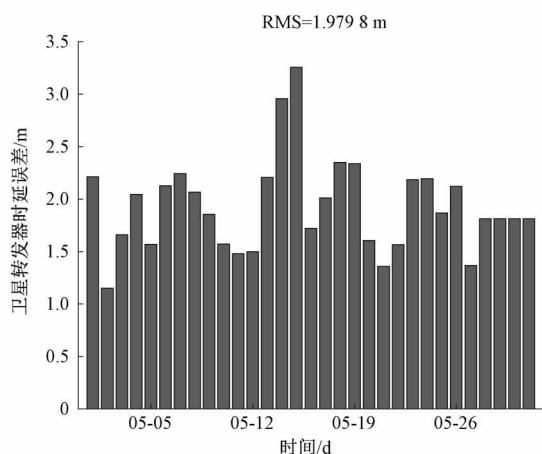


图 1 卫星转发器时延误差计算结果

4 结 论

观测数据的系统差是影响卫星定轨精度的主要因素,针对卫星转发器时延难以直接在轨测量获取的问题,本文首先对原有的 FY-4A 静止气象卫星转发器时延在轨标定方案进行了介绍并分析,发现该方案由于待估参数过多导致无法获得卫星转发器时延,随后利用动力学精密定轨分析得到 FY-4A 气象卫星转发器时延与地面校正值差异在 2 m 左右。

然而对于三轴稳定的卫星来说,受到日照影响,卫星两侧温差较大,可能会导致卫星转发器的时延在 1 天中存在变化。本文把卫星转发器时延作为固定参数进行求解可能存在不足,下一步将会通过非差定轨与差分定轨比较,同时将径向轨道误差分离出来,以研究卫星转发器时延在 1 天中的真实变化规律。

参考文献

- [1] 许健民, 杨军, 张志清, 等. 我国气象卫星的发展与应用[J]. 气象, 2010, 36(7): 94-100.
- [2] 张志清, 陆风, 方翔, 等. FY-4 卫星应用和发展[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 8-19.
- [3] 董瑶海. 风云四号气象卫星及其应用展望[J]. 上海航天, 2016, 33(2): 1-8.
- [4] 郭强, 韩琦, 冯小虎. 风云四号科研试验卫星星地一体化测控设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(2): 127-131.
- [5] 鲁文强, 冯庆玉, 贾耀红. 应用故障树分析风云二号测

距分系统常见故障[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11): 80-85.

- [6] 张龙平, 党亚民, 成英燕, 等. 北斗 GEO/IGSO/MEO 卫星定轨地面站构型影响分析及其优化[J]. 测绘学报, 2016, 45(S2): 82-92.
- [7] 王跃锐, 李真芳, 张金强, 等. GEO-LEO 双站 SAR 地面分辨特性及轨道构型分析[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(5): 996-1001.
- [8] 贺凯飞. 顾及系统误差的 GEO 卫星定轨方法研究[D]. 陕西: 长安大学, 2010.
- [9] 郭睿, 胡小工, 唐波, 等. 多种测量技术条件下的 GEO 卫星定轨研究[J]. 科学通报, 2010, 55: 428-434.
- [10] 关增社, 王庆, 李传君. 一种单频 GPS 反演误差改正方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(4): 53-56.
- [11] 于焯, 黄默, 杨斌, 等. 一种高精度导航卫星钟差中长期预报方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 36-43.
- [12] HUANG Y, HU X G, ZHANG X Z, et al. Improvement of orbit determination for geostationary satellites with VLBI tracking [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(26): 2765-2772.
- [13] 张越, 洪家财. GNSS 星间测控技术发展现状与趋势[J]. 电子测量技术, 2018, 41(23): 117-122.
- [14] GUO R, HU X G, TANG B, et al. Precise orbit determination for geostationary satellites with multiple tracking techniques [J]. Chinese Science Bulletin, 2010(8): 15-20.
- [15] 周建华, 陈刘成, 胡小工, 等. GEO 导航卫星多种观测资料联合精密定轨[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40(5): 520-527.
- [16] 朱振华, 冯阳凯, 郭润全. GEO 卫星测距系统设计[J]. 信息技术, 2010, 34(12): 94-98.
- [17] 刘灵, 何兵哲, 赵俊艺, 等. 我国第二代静止气象卫星定轨测距方案探讨[J]. 飞行器测控学报, 2010, 29(6): 90-94.
- [18] 高华宇, 耿虎军, 杜兰, 等. 系统差及南纬站对 GEO 多站测距定轨精度的影响分析[J]. 无线电工程, 2017, 47(3): 35-38.

作者简介

鲁文强, 博士生, 工程师, 主要研究方向为航天器动力学精密定轨。

E-mail: 523496837@qq.com