

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108692

风云四号地球静止轨道卫星测距系统误差标校 及其定轨影响分析*

鲁文强^{1,2,3}, 裘奕², 杨磊², 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:测距系统误差是影响地球静止轨道(GEO)卫星定轨精度的主要误差因素,GEO 卫星的静地特性使得测距数据系统误差特别是测站系统差和卫星轨道存在较强相关性,必须通过其他独立手段解决。首先利用仿真数据分析了地面系统误差和星上系统误差对轨道的影响特性,随后以风云四号 B 星(FY-4B)测距系统为例分析了测距实测数据,分析结果表明风云四号 B 星测距系统中存在异常的系统误差,为确定该系统误差的来源,设计了一系列试验方案进行分析,通过试验排除地面设备系统误差,确定了风云四号 B 星测距系统误差来自于研制厂家提供的错误星上转发器时延值,利用定轨估计解算星上系统误差对其进行标校,以及利用标校后的观测数据重新定轨,各站残差由 15 m 降至 2 m,定轨精度由 800 m 提高到 20 m,分析表明,通过定轨估计解算对星上系统误差进行标校的方法是切实有效的。

关键词: 风云四号 B 星;测距系统;误差标校;卫星转发器时延

中图分类号: TH765 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Analysis of the ranging systematic error of the FY-4 geostationary satellite and its influence on orbit determination

Lu Wenqiang^{1,2,3}, Qiu Yi², Yang Lei², 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 ranging systematic error is the main factor that affects the orbit determination accuracy of geostationary earth orbit (GEO) satellites. The geostationary characteristics of GEO satellites make the ranging data systematic error. Especially for the station systematic error, it has a strong correlation with the satellite orbit. Therefore, the independent means must be used to solve. The simulation data are firstly used to analyze the impact characteristics of ground systematic error and on-board systematic error on the orbit. The FY-4B satellite ranging system is taken as an example to analyze the measured range data. The analysis results show that there is an abnormal systematic error in the FY-4B ranging system. To determine the source of this system error, a series of schemes are designed. Through experiments, the systematic error is not from the ground or the satellite. And it is determined that the systematic error of the FY-4B comes from the satellite. The orbit determination estimation is utilized to calculate the on-board systematic error to calibrate it. The calibrated observation data are used to achieve orbit determination, and the residual error of each station is reduced from 15 m to 2 m. The orbit determination accuracy is improved from 800 m to 20 m. The analysis results show that the method of calibrating the systematic error on the satellite through the orbit determination estimation is practical and effective.

Keywords: Fengyun-4B satellite; ranging system; systematic error calibration; satellite transponder delay

0 引 言

风云四号 B 星于 2021 年 6 月 3 日 0 时 17 分,在西

昌卫星发射中心搭乘长征三号乙运载火箭发射,是我国新一代地球静止轨道气象卫星的首颗业务星,将与风云四号 A 星、风云二号 H 星、风云二号 G 星以及风云二号 F 星共同组成我国静止气象卫星业务观测网,为我国静

止气象卫星升级换代提供重要保障^[1-2]。

风云四号 B 星搭载的快速成像仪具备 1 800 km×2 000 km 区域范围内 1 min 快速成像能力,空间分辨率最高为 250 m^[3-5]。然而图像精确定位需要每个像素成像时刻对应的卫星的轨道和姿态数据,以确定卫星获取云图中每个像元的地理坐标,建立图像中每个像素的行列号与地球经纬度的关系。同时姿态数据在进行计算时也会受到轨道精度的影响,因此快速成像仪的高时空分辨率对测定轨系统提出了很高的要求。

针对地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星的测定轨技术可以分为地基测距测角、天基测距测速以及天地基联合 3 大类。地基主要有测距跟踪、干涉测角跟踪以及两者联合,天基包括卫星跟踪和星载 GNSS 技术,天地基联合定轨方法则综合了天基和地基至少两种或两种以上跟踪技术。文献[6]对静止气象卫星测定轨技术发展进行了综述,文献[7-11]研究了多种测量技术条件下的 GEO 卫星定轨。

由于测量精度稳定、可靠性高等特点,地基多站测定轨体制是当前主流手段,而系统差是影响 GEO 卫星定轨精度的主要因素,文献[12]分析了系统差对 GEO 卫星定轨精度的影响,文献[13]分析了顾及系统差的 GEO 卫星定轨协方差,文献[14]研究了考虑系统误差的 GEO 卫星精密定轨方法,文献[15]研究了多普勒测速数据时标偏差对定轨的影响,文献[16]通过解算测站发射系统时延和卫星转发器时延减小其对定轨的影响。

风云四号 A 星于 2016 年发射,文献[17-18]分析了其重叠精度在 10~20 m,文献[19]通过光学测角数据分析其重叠精度在 50 m 以内。风云四号 B 星在 A 星基础上增加自动校零功能,能够进一步提升数据测量精度。由于测距系统精度是影响最终轨道精度的决定性因素,本文将以风云四号 B 星为例,梳理其测距系统误差,以确定其对定轨的影响。

1 测距系统误差来源

风云四号 B 星采用地基多站测距体制,测距系统由北京、佳木斯、喀什、广州、腾冲 5 个测站组成,五站在统一时间表控制下对卫星进行自发自收式双程测距,得到 S 与 L 波段的测距数据。测距系统的系统误差源主要来源于卫星段、地面段、传播段。

1) 地面段

工作频率、时间、温度及电平等将产生相位漂移误差,风云四号 B 星采用实时校零的方式对地面设备时延变化误差进行修正^[20]。

2) 卫星段

卫星转发器时延一般为地面真空测试环境下测量获

得,然而卫星真实工作环境与地面实验条件有所不同,可能会导致其发生变化。但由于无法直接测量,只能使用地面标校值。

3) 传播段

传播段主要包括对流层以及电离层引起的等效距离误差。风云四号 B 星利用 L/S 双频改正法对电离层延迟误差进行修正,利用改进的 Hopfield 模型对对流层延迟误差进行修正,模型所需要的温湿压等气象要素由每个测站的自动气象站提供。

2 系统误差未标校前定轨分析

风云四号 B 星在轨测试期间,发现测距数据异常,主要体现在残差 RMS 值超出合理水平。以 2021 年 7 月 26 日 14:30 至 2021 年 7 月 27 日 14:00 观测数据为例,通过表 1 定轨策略进行精密定轨,得到残差如图 1 所示,个别测站残差 RMS 值甚至达到 50 m。

表 1 精密定轨策略

Table 1 Precision orbit determination strategy	
模型	描述
观测量	消电离层组合的伪距观测值
采样率	1 s
弧长	24 h
地球重力场	EIGEN_GL04C
N 体	DE421
固体潮	IERS 2003
参数估计	位置+速度+气压系数
太阳光压	固定面质比模型
质量控制	最小二乘法

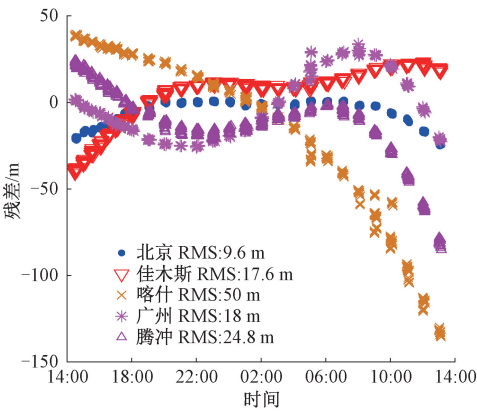


图 1 FY-4B 长弧定轨残差

Fig. 1 FY-4B residual error of long arc POD

利用轨道重叠分析轨道精度,分段时间如表 2 所示,每段相邻弧段数据中有 1 h 数据重叠。重叠精度在 390~690 m,图 2~4 分别给出 RTN 坐标系下的轨道差异,统计结果如表 3 所示,初步判断风云四号 B 星测距系统可能存在异常系统误差影响,但尚不清楚是来源于测站还是星上。

表 2 轨道确定时间表
Table 2 Timetable of POD

弧段	开始时间	结束时间
1	2021. 07. 26 16:00	2021. 07. 26 22:00
2	2021. 07. 26 21:00	2021. 07. 27 03:00
3	2021. 07. 27 02:00	2021. 07. 27 08:00
4	2021. 07. 27 07:00	2021. 07. 27 13:00

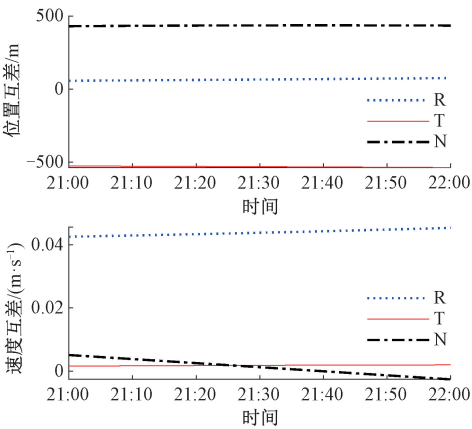


图 4 重叠精度(弧段 3~4)
Fig. 4 Orbits overlap accuracy (pass 3~4)

表 3 轨道重叠统计

Table 3 Orbits overlap statistics					m
重叠弧段	R	T	N	3D	
1~2	65.580 1	531.710 9	434.462 0	689.764 1	
2~3	36.808 6	292.944 1	255.278 4	390.305 3	
3~4	53.902 3	361.498 8	320.715 9	486.256 7	

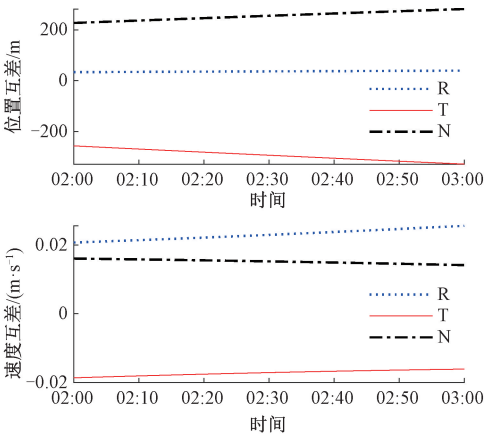


图 2 重叠精度(弧段 1~2)
Fig. 2 Orbits overlap accuracy (pass 1~2)

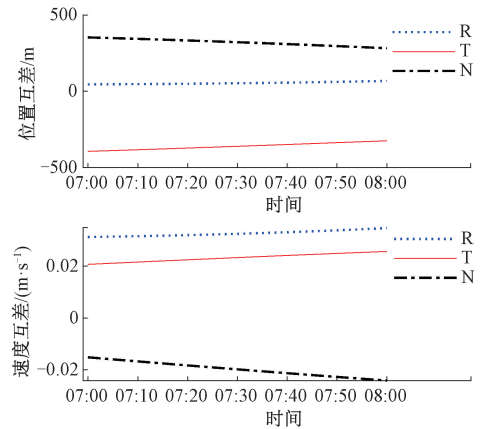


图 3 重叠精度(弧段 2~3)
Fig. 3 Orbits overlap accuracy (pass 2~3)

3 仿真数据分析测距系统误差对定轨影响

为进一步确认风云四号 B 星测距系统误差来源,利用仿真数据分析测站和星上系统误差对定轨的影响特征,并分析定轨同时解算星上系统误差的可解性。

3.1 测站系统误差对定轨影响分析

在不同系统差组合下,仿真生成 2021 年 6 月 26 日 17:30~2021 年 6 月 27 日 17:00 对 GEO 卫星(风云四号 A 星真实轨道)的观测数据,设置如表 4 所示。

表 4 观测数据仿真设置
Table 4 Observation data simulation setting

类型	设置
观测数据时段	2021-06-26 17:30 至 2021-06-27 17:00
初轨	风云四号 A 星轨道
伪距测量噪声/m	0.5
采样间隔/s	1
系统差组合	2-2-2-2-2/2-2-2-1-1-2-2-0-1-0 /1-2-0-2-0/0-1-2-2-1

使用仿真观测数据进行精密定轨,并与参考轨道比较得到定轨精度,如表 5 所示。结合表 6 数据,通过仿真

分析可以发现不同站对系统差的影响是不一样的,高度角越高影响越小,高度角越低影响越大,如果各站系统差一致,对轨道精度影响则较小。

表 5 定轨精度		
Table 5 Orbit determination accuracy		
五站系统差组合 (BJ/JMS/KS/GZ/TC)	定轨精度/m	
	RMS	MAX
2-2-2-2-2	5.88	10.12
2-2-2-1-1	5.81	11.64
2-2-0-1-0	22.49	25.69
1-2-0-1-1	25.67	30.15
0-1-2-2-1	10.71	18.34

表 6 测站天线跟踪角度		
Table 6 Tracking angle of station antennas		
测站	天线跟踪角度/(°)	
	方位	俯仰
北京 (BJ)	197.985	42.501
佳木斯 (JMS)	213.490	31.490
喀什 (KS)	155.590	36.700
广州 (GZ)	201.590	60.880
腾冲 (TC)	165.890	60.880

3.2 公共系统误差对定轨影响分析

通过增加不同量级的公共系统误差,模拟星上系统误差的影响,仿真生成 2021 年 6 月 26 日 17:30~2021 年 6 月 27 日 17:00 的观测数据,设置如表 7 所示。

表 7 观测数据仿真设置	
Table 7 Observation data simulation setting	
类型	设置
观测数据时段	2021-06-26 17:30 至 2021-06-27 17:00
初轨	风云四号 A 星真实轨道
伪距测量噪声/m	0.5
采样间隔/s	1
公共系统误差	1/5/10/50/100/200

使用仿真观测数据进行精密定轨,并与参考轨道比较得到定轨精度如表 8 所示,残差如图 5~8 所示。随着增加公共系统误差,定轨精度有明显的恶化,观测数据残差也均在变差。而且残差的时间序列特性和风云四号 B 星定轨结果高度相似,由此判断风云四号 B 星的系统误差可能来自于星上,量级估计为 200 m 左右。

表 8 定轨精度		
Table 8 Orbit determination accuracy		
公共系统误差	定轨精度	
	RMS	MAX
1	2.93	5.05
5	14.72	25.25
10	29.45	50.74
50	147.10	252.90
100	294.20	505.80
200	584.60	1 031.60

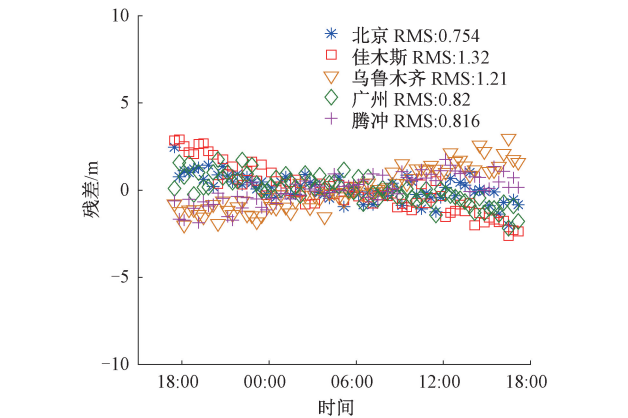


图 5 残差(增加 10 m 公共系统误差)
Fig. 5 Residual error (with additional 10 m public systematic error)

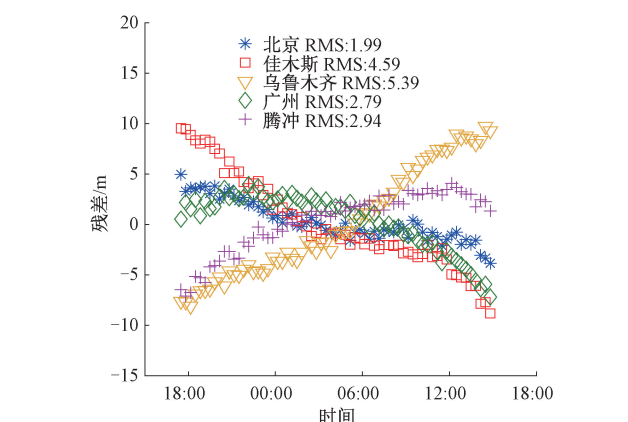


图 6 残差(增加 50 m 公共系统误差)
Fig. 6 Residual error (with additional 50 m public systematic error)

4 星上系统误差标校方法

星上系统误差对测距的影响反映到各个测站是相同的,所以也可以认为是各个测站相同的系统误差影响。

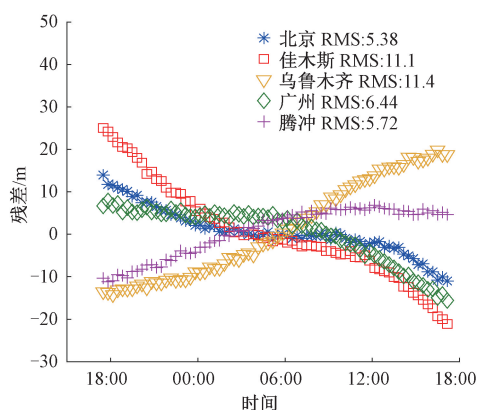


图7 残差(增加 100 m 公共系统误差)

Fig. 7 Residual error (with additional 100 m public systematic error)

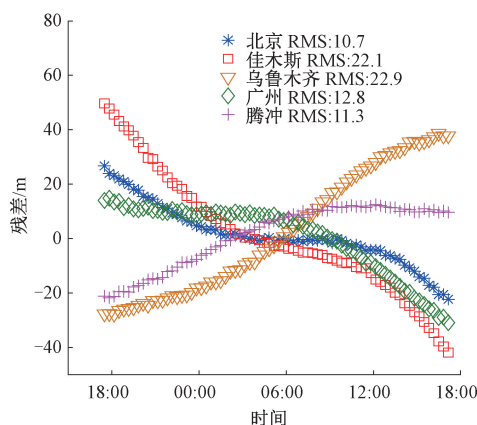


图8 残差(增加 200 m 公共系统误差)

Fig. 8 Residual error (with additional 200 m public systematic error)

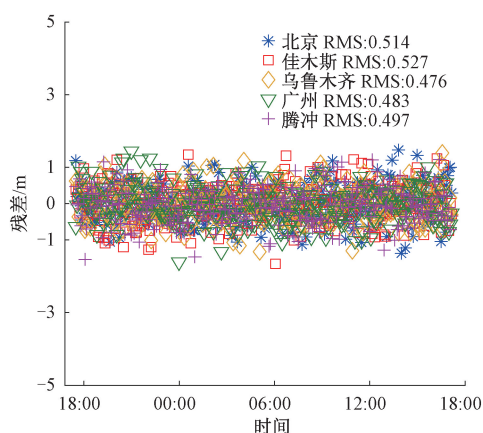


图9 残差(解算星上系统误差)

Fig. 9 Residual error (calculation systematic error on the satellite)

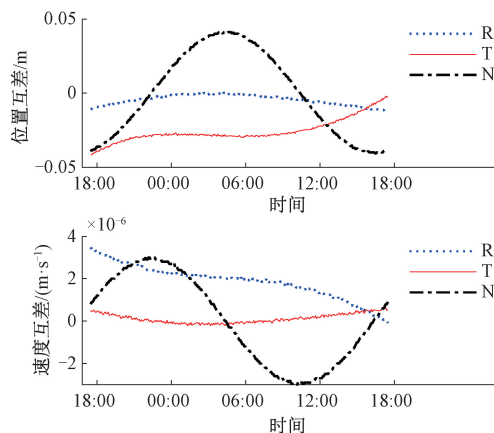


图10 定轨精度

Fig. 10 Orbit determination accuracy

为了对星上测距系统误差进行标校,分析了不同的标校方法。

4.1 测站数据解算公共系统误差可行性分析

对 GEO 卫星定轨,如果定轨同时解算各个测站系统误差,由于参数相关性,定轨是不收敛的。但是定轨同时可以计算星上公共系统误差,这在转发式定轨等实际工作中也得到了检验,即星上系统误差和轨道残差相关性弱。

在仿真数据中增加 200 m 公共系统误差,首先利用测距数据尝试解算不同测站系统误差,在解算 1~4 个测站系统误差时,定轨精度 RMS 值均为 584 m,因此在测距系统存在公共系统误差时,通过解算各测站系统误差无法解决。利用测距数据解算星上系统误差为 199.994 5 m,残差仅残余随机噪声,如图 9 所示,定轨精度 RMS 值为 0.039 m,如图 10 所示,验证了利用测站数据解算公共系统误差是可行的。

4.2 外部独立数据标校系统误差可行性分析

除依靠卫星信号的主动技术,近年来涌现了一大批被动观测技术,文献[21]综合利用甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)、测轨数据和 C 波段转发式测距数据进行定轨,分析表明 VLBI 数据提供了对测距数据系统差的标校,而综合两种数据定轨精度约 10 m,显著提高卫星机动后轨道定轨预报精度快速恢复。文献[22]研发了简易型 VLBI 观测系统,分析表明在扣除系统差后单站接收精度为 2 ns, GEO 目标位置精度为百米级。文献[23]利用连接端站干涉(connected-element interferometry, CEI)测量对 GEO 卫星进行测定轨,定轨结果表明,7 h 的时延数据和单站测距数据联合定轨位置精度为 37 m,预报 12 h 位置精度约 78 m。文献[24]通过利用低轨卫星光学测量技术对 GEO 卫星进行轨道确定,分析表明在一定条件下, GEO 卫星定轨精度可至百米量级。由上述文献可知,光学望远镜、VLBI、CEI、低轨卫星等手段定轨精度能达到 10~100 m,因此若系统误差超过 50 m,可以通过这些技术手段进行标校。

仿真数据增加 200 m 公共系统误差,仿真生成 2021 年 6 月 26 日 17:30 至 2021 年 6 月 27 日 17:00 的测角及测距数据,设置如表 9 所示。

表 9 观测数据仿真设置

Table 9 Observation data simulation setting	
类型	设置
观测数据时段	2021-06-26 17:30 至 2021-06-27 17:00
初轨	风云四号 A 星真实轨道
测角噪声/($^{\circ}$)	0.5
测距噪声/m	0.5
采样间隔/s	1
伪距系统误差/m	200
角度系统误差/($^{\circ}$)	0.01/0.1/0.3/0.5/1

使用仿真的伪距及角度数据联合精密定轨,解算测距系统误差如表 10 所示,分析结果表明测角精度越高,星上系统误差的标校精度越高。

表 10 系统误差解算

Table 10 Calculation systematic error	
角度数据系统误差/as	解算测距系统误差/m
0.01	201.229 11
0.1	212.446 71
0.3	237.372 78
0.5	262.296 17
1	324.592 94

4.3 小 结

通过分析测站系统误差及公共系统误差对定轨的影响,提出了利用测站数据以及测角数据解算公共系统误差的方案,并通过仿真试验分析是可行的。

5 实测数据标校星上系统误差实验分析

风云四号 B 星测距设备在风云四号 A 星测距设备基础上研制而成,性能指标均通过测试,与风云四号 A 星测距设备性能指标一致,如表 11 所示。

5.1 地面交替观测试验

风云四号 A 星测距设备、风云四号 B 星测距设备和风云四号 A 星、风云四号 B 星之间形成 4 条测距链路,如图 11 所示。利用两颗星地面测距设备进行交叉实验,2021 年 7 月 31 日利用风云四号 A 星测距设备对风云四号 B 星进行测距定轨,2021 年 8 月 1 日利用风云四号 B 星测距设备对风云四号 A 星进行测距定轨。

表 11 风云四号 B 星测距设备指标

Table 11 FY-4B satellite ranging equipment indicators

测站	测试项目			
	G/T	EIRP	测距设备系统误差	测距设备随机误差
北京	16.60	16.47	1.40	0.443
佳木斯	16.30	60.76	1.303	0.396
喀什	16.44	60.59	1.434	0.273
广州	16.39	60.30	1.700	0.350
腾冲	16.47	60.10	1.200	0.113

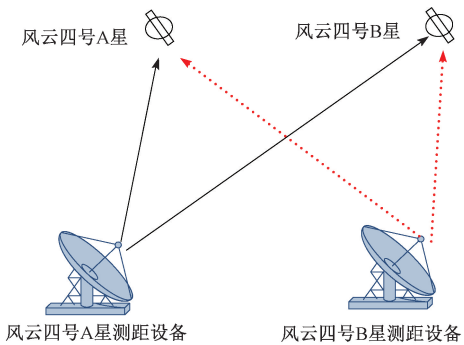


图 11 FY-4A/FY-4B 测距设备对卫星观测链路示意图
Fig. 11 Diagram of FY-4A/FY-4B distance measurement ground equipment to satellite observation link

通过分析 4 条链路观测数据的残差,可以发现风云四号 A 星地面设备和风云四号 B 星地面设备对风云四号 A 星的测距数据残差均小于 5 m,而风云四号 A 星地面设备和风云四号 B 星地面设备对风云四号 B 星测距数据残差均大于 5 m,分别如图 12~15 所示,这表明风云四号 B 星地面设备正常,风云四号 B 星异常的系统误差应来源于星上。

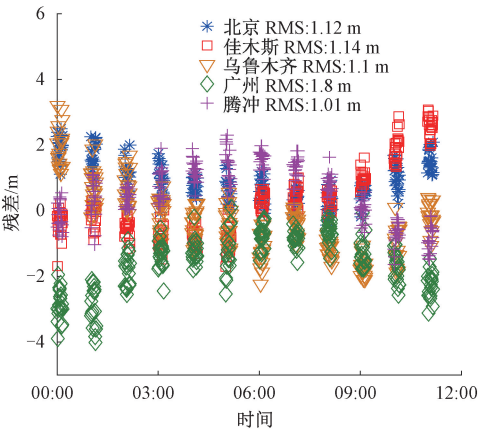


图 12 观测数据残差 (FY-4A 测距设备对 FY-4A 卫星)
Fig. 12 Observation data residual error (FY-4A distance measurement to FY-4A satellite)

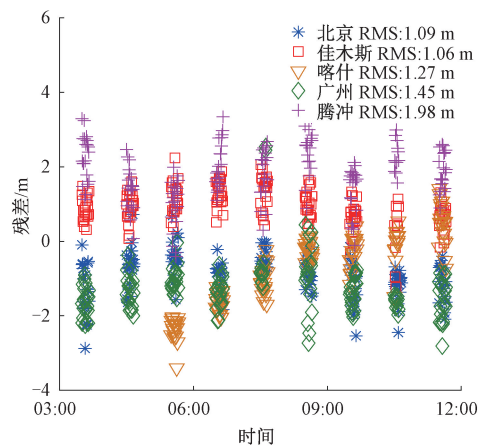


图 13 观测数据残差(FY-4B 测距设备对 FY-4A 卫星)
Fig. 13 Observation data residual error (FY-4B distance measurement to FY-4A satellite)

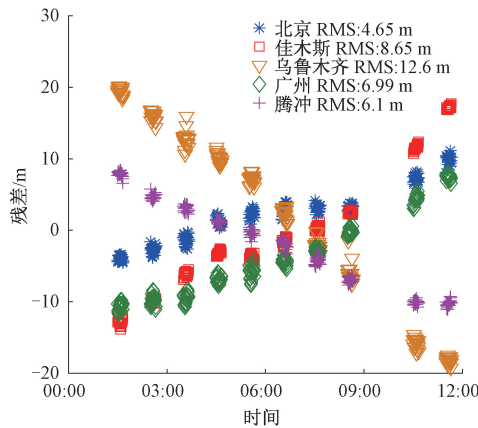


图 14 观测数据残差(FY-4A 测距设备对 FY-4B 卫星)
Fig. 14 Observation data residual error (FY-4A distance measurement to FY-4B satellite)

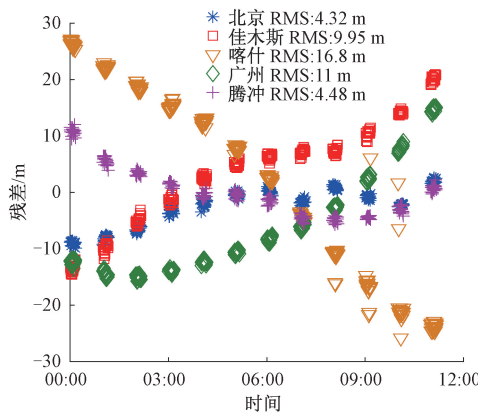


图 15 观测数据残差(FY-4B 测距设备对 FY-4B 卫星)
Fig. 15 Observation data residual error (FY-4B distance measurement to FY-4B satellite)

5.2 测距数据解算公共系统误差

利用风云四号 B 星 2021 年 8 月 1 日五站测距数据对公共系统误差进行解算,得到公共系统误差为 -246 m ,对应弧段的残差如表 12 及图 16 所示。通过解算公共系统误差,各站观测数据残差均回归到合理水平。

表 12 轨道确定残差 Table 12 Residual error of orbit determination for FY-4B			
测站	残差均方根/m	观测数据量	均值/m
北京	0.787 44	6 945	-0.147 97
佳木斯	1.357 18	7 079	-0.129 46
喀什	1.304 54	7 079	-1.048 96
广州	1.574 28	7 038	-0.292 25
腾冲	1.906 25	6 735	1.690 72

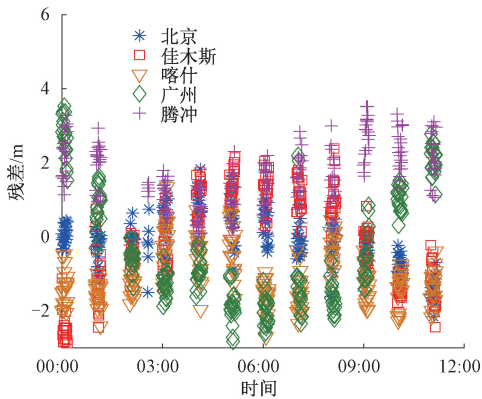


图 16 残差(解算公共系统差后)
Fig. 16 Residual error (after solving the public systematic error)

5.3 光学测角数据校正

2021 年 8 月 11 日~2021 年 8 月 12 日,利用 50 cm 望远镜 CCD 相机进行光学观测得到风云四号 B 星测角数据,观测弧段如表 13 所示。

表 13 测角弧段 Table 13 Angle measurement pass	
弧段 (UTC)	站
2021/08/11 14:06~17:07	骊山
2021/08/12 14:48~14:54	骊山

基于骊山测角数据对风云四号 B 星进行定轨,高度角残差为 0.19 角秒,方位角残差为 0.33 角秒,如表 14 所示。

利用上述定轨弧段在有测角数据的弧段进行公共系统误差标校,得到测距系统误差如表 15 所示。

表 14 高度角与方位角残差

Table 14 Residual error of height angle and direction angle

时间	残差/as	
	方位角	高度角
2021/08/11 14:06~17:07	0.33	0.20
2021/08/12 14:48~14:54	0.33	0.18
均值	0.33	0.19

表 15 测距系统误差

Table 15 Systematic error of distance measurement

时间	系统差/m	站
2021/08/11 14:06~17:07	-246.04	骊山
2021/08/12 14:48~14:54	-280.49	骊山

5.4 校正数据定轨分析

2021 年 8 月中旬,研制厂家对星上转发器时延进行了校正,单程修正量为-244.3 m,利用 2021 年 8 月 31 日校正后的观测数据进行分析,定轨残差如表 16 及图 17 所示,各站残差均在分米级。

表 16 轨道确定残差

Table 16 Residual error of orbit determination

测站	残差均方根/m	观测数据量	均值/m
北京	0.729 24	16 083	-0.548 50
佳木斯	0.712 58	15 904	0.336 96
喀什	0.732 40	15 838	0.069 76
广州	0.729 16	15 919	0.216 31

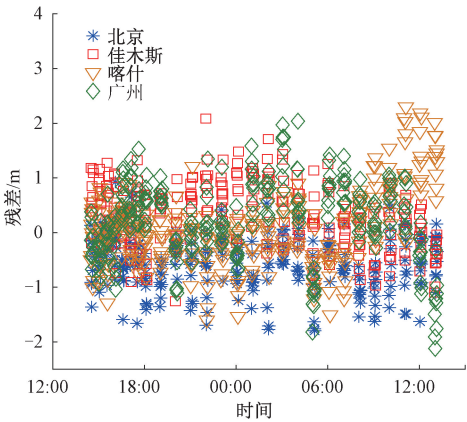


图 17 长弧定轨残差(校正系统误差后)

Fig. 17 Residual error of long arc POD (correction systematic error)

利用轨道重叠分析进行轨道确定,分段时间如表 17 所示,每段相邻弧段数据中有 1 h 数据重叠。

表 17 轨道重叠时间

Table 17 Timetable of POD

弧段	开始时间	结束时间
1	2021/08/31 16:00	2021/08/31 22:00
2	2021/08/31 21:00	2021/09/01 03:00
3	2021/09/01 02:00	2021/09/01 08:00
4	2021/09/01 07:00	2021/09/01 13:00

图 18~20 分别给出 RTN 坐标系下的轨道差异,统计结果如表 18 所示。通过轨道重叠分析,在校正系统误差后,轨道精度在 10~20 m,与风云四号 A 星轨道精度相当。

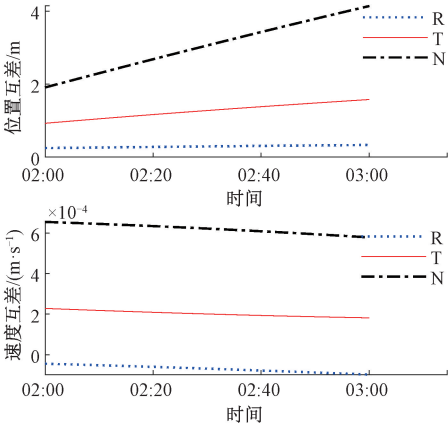


图 18 校正数据弧段 1~2 重叠精度

Fig. 18 Arc 1~2 overlap accuracy of corrected data

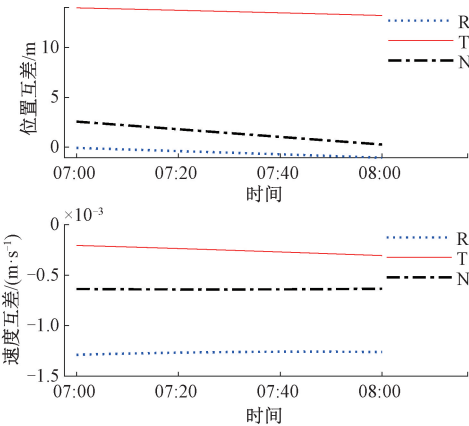


图 19 校正数据弧段 2~3 重叠精度

Fig. 19 Arc 2~3 overlap accuracy of corrected data

表 18 定轨精度

Table 18 Orbit determination accuracy m

重叠弧段	R	T	N	3D
1~2	0.112 3	6.773 8	2.173 5	7.076 8
2~3	0.293 5	1.283 7	3.118 3	3.384 9
3~4	0.632 8	13.616 7	1.556 8	13.720 0

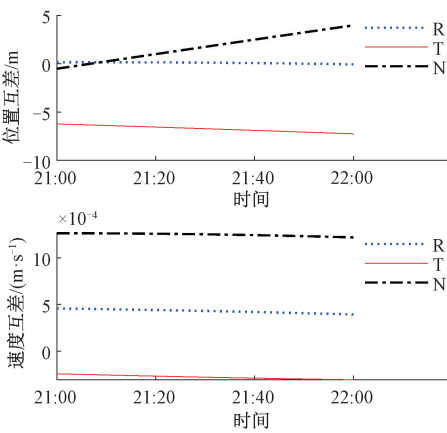


图 20 校正数据弧段 3~4 重叠精度

Fig. 20 Arc 3~4 overlap accuracy of corrected data

6 结 论

本文首先利用仿真数据分析了地面系统误差和星上系统误差对轨道的影响特性,随后以风云四号 B 星测距系统实测数据为例,分析了风云四号 B 星测距系统误差来源以及其对定轨的影响。分析结果表明风云四号 B 星测距系统目前存在异常的系统误差,为确定该系统误差的来源,设计了一系列试验方案进行分析,通过试验排除地面设备系统误差,确定风云四号 B 星测距系统误差来自于错误的星上转发器时延值。分别利用定轨估计解算星上系统误差对其进行标校,进而利用标校后的观测数据重新定轨,各站残差由 15 m 降至 2 m,定轨精度由 800 m 提高到 20 m,分析表明通过定轨估计解算对星上系统误差进行标校的方法是切实有效的。

系统误差是 GEO 卫星定轨精度的主要误差因素,GEO 卫星的静地特性使得测距数据系统误差和卫星轨道存在较强相关性,必须通过其他独立手段解决。通过研究风云四号 B 星系统误差对轨道确定精度的影响,不仅满足了该卫星对轨道精度的需求,同时对 GEO 卫星高精度精密定轨具有普适意义。

参考文献

[1] 风云四号 B 星成功获取首批高精度图像和数据[J]. 红外,2021,42(7):54.
Fengyun-4B satellite successfully acquired the first batch of high-precision images and data[J]. Infrared, 2021, 42(7): 54.

[2] YANG J, ZHANG Z, WEI C, et al. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017,98(8): 1637-1658.

[3] 陆风,张晓虎,陈博洋,等. 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景[J]. 海洋气象学报,2017,37(2): 1-12.
LU F, ZHANG X H, CHEN B Y, et al. The imaging characteristics of Fengyun-4 meteorological satellite and its application prospects [J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(2): 1-12.

[4] 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.
ZHANG ZH Q, LU F, FANG X, et al. FY-4 satellite application and development [J]. Shanghai Aerospace, 2017, 34(4): 8-19.

[5] 董瑶海. 我国风云卫星体系的发展思考[J]. 上海航天 (中英文),2021,38(3):76-84.
DONG Y H. Thoughts on the development of my country's Fengyun satellite system [J]. Shanghai Aerospace (Chinese and English), 2021, 38(3): 76-84.

[6] 鲁文强,毛维娜,黄勇,等. 静止气象卫星测定轨技术发展综述[J]. 国外电子测量技术,2021,40(4): 47-52.
LU W Q, MAO W N, HUANG Y, et al. Overview of the development of geostationary meteorological satellite orbit determination technology [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(4): 47-52.

[7] 杜兰. GEO 卫星精密定轨技术研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2006.
DU L. Research on GEO satellite precision orbit determination technology [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2006.

[8] GUO R, HU X G, BO T, et al. Precise orbit determination for geostationary satellites with multiple tracking techniques [J]. Chinese Science Bulletin, 2010(8):15-20.

[9] 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.
ZHOU J H, CHEN L CH, HU X G, et al. Joint precision orbit determination with multiple observation data of GEO navigation satellite[J]. Science in China: Physics Mechanics Astronomy, 2010, 40(5): 520-527.

[10] 张宇,李颀,段建锋,等. 基于星间测量的航天器精密定轨技术研究[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(3):233-239.

- ZHANG Y, LI X, DUAN J F, et al. Research on spacecraft precise orbit determination technology based on satellite interaction measurement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(3): 233-239.
- [11] 韩光宇,瞿锋,郭劲,等. 卫星激光测距中白天测距的分析与实现[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 885-890.
- HAN G Y, QU F, GUO J, et al. Analysis and realization of day-time ranging of SLR [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(4): 885-890.
- [12] 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.
- GAO H Y, GENG H J, DU L, et al. Analysis of the influence of system errors and south latitude stations on the accuracy of GEO multi-station ranging and orbit determination [J]. Radio Engineering, 2017, 47(3): 35-38.
- [13] 路余,杜兰,张中凯,等. 考虑系统差的 GEO 卫星定轨协方差分析[C]. 中国卫星导航学术年会, 2014.
- LU Y, DU L, ZHANG ZH K, et al. Covariance analysis of GEO satellite orbit determination considering system error [C]. China Satellite Navigation Conference, 2014.
- [14] 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.
- HE K F. Research on GEO satellite orbit determination method considering system error [D]. Shaanxi: Chang'an University, 2010.
- [15] 李海涛,樊敏,黄勇,等. 嫦娥三号多普勒测速数据时标偏差补偿[J]. 中国科学:信息科学, 2020, 50(12): 1932-1943.
- LI H T, FAN M, HUANG Y, et al. Compensation for time-scale deviation of Doppler velocity measurement data of Chang'e-3 [J]. Science in China: Information Science, 2020, 50(12): 1932-1943.
- [16] 刘凯,杨旭海,陈亮,等. 基于转发式一发多收模式的 GEO 卫星定轨研究[J]. 时间频率学报, 2019, 42(4): 357-366.
- LIU K, YANG X H, CHEN L, et al. Research on GEO satellite orbit determination based on forwarding one-transmit multiple-receive mode [J]. Journal of Time and Frequency, 2019, 42(4): 357-366.
- [17] 宋叶志,黄勇,杨建华,等. 风云四号卫星双程测距系统精密轨道确定[J]. 宇航学报, 2020, 41(3): 270-275.
- SONG Y ZH, HUANG Y, YANG J H, et al. The precise orbit determination of the Fengyun-4 satellite dual-range ranging system [J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(3): 270-275.
- [18] 鲁文强,黄勇. FY-4A 静止气象卫星转发器时延在轨标定[J]. 电子测量技术, 2021, 44(3): 6-10.
- LU W Q, HUANG Y. On-orbit calibration of FY-4A geostationary meteorological satellite transponder time delay [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(3): 6-10.
- [19] 刘思语,黄勇,毛银盾,等. 基于光学测角数据的风云四号同步轨道卫星精密定轨[J]. 中国空间科学技术, 2021, 41(6): 54-62.
- LIU S Y, HUANG Y, MAO Y D, et al. Precision orbit determination of Fengyun-4 synchronous orbit satellite based on optical angle measurement data [J]. China Space Science and Technology, 2021, 41(6): 54-62.
- [20] 杜丹. 偏馈法距离零点误差校正[J]. 电讯技术, 2015, 55(10): 1152-1156.
- DU D. Error correction of distance zeroing with offset feed method [J]. Telecommunications Technology, 2015, 55(10): 1152-1156.
- [21] HUANG Y, HU X G, ZHANG X Z, et al. Improvement of orbit determination for geostationary satellites with VLBI tracking [J]. Chinese Sci Bull, 2011, 56(26): 2765-2772.
- [22] 张志斌,王维,杨鹏,等. 一种用于同步静止卫星监测的微型 VLBI 网[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(5): 119-125.
- ZHANG ZH B, WANG W, YANG P, et al. A miniature VLBI network for synchronous geostationary satellite monitoring [J]. Chinese Space Science and Technology, 2020, 40(5): 119-125.
- [23] 樊敏,黄勇,黄磊,等. 基于北斗卫星校准的连接端站干涉测量与定轨[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(5): 1303-1309.
- FAN M, HUANG Y, HUANG L, et al. Interferometry and orbit determination of connected end stations based on Beidou satellite calibration [J]. System Engineering and Electronic Technology, 2021, 43(5): 1303-1309.

- [24] 宋叶志,邵瑞,王蕾,等. 低轨星载光学测量确定静止卫星轨道的方法[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(1): 28-38.

SONG Y ZH, SHAO R, WANG L, et al. Method for determining the orbit of a geostationary satellite by optical measurement on low-orbit satellites [J]. Space Return and Remote Sensing, 2021, 42(1): 28-38.

作者简介



鲁文强, 2010 年于山东理工大学获得学士学位, 2013 年于电子科技大学获得硕士学位, 现为国家卫星气象中心工程师, 主要研究方向为航天器高精度轨道测量与精密定轨。

E-mail: luwq@cma.gov.cn

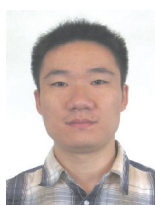
Lu Wenqiang received his B.Sc. degree from Shandong University of Technology in 2010, and received his M.Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2013. He is currently an engineer in National Satellite Meteorological Centre. His main research interests include spacecraft high-precision orbit measurement and precision orbit determination.



裘奕 (通信作者), 1993 年于大连海事大学获得学士学位, 现为国家卫星气象中心高级工程师, 主要研究方向为星地通信链路工程与数据获取。

E-mail: qiuyi@cma.gov.cn

Qiu Yi (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Dalian Maritime University in 1993. He is currently a senior engineer at National Satellite Meteorological Centre. His main research interests include satellite ground communication link engineering and data acquisition.



杨磊, 2000 年和 2003 年于东北大学获得学士和硕士学位, 2006 年于中国科学院自动化所获得博士学位, 现为国家卫星气象中心研究员, 主要研究方向为中国下一代气象卫星图像导航与配准的系统设计与工程实现。

E-mail: yangl@cma.gov.cn

Yang Lei received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Northeastern University in 2000 and 2003, and received his Ph.D. degree from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2006. He is currently a professor at National Satellite Meteorological Centre. His main research interests include system design and implementation on image navigation & registration for China next generation meteorological satellite.



黄勇, 2000 年于武汉测绘科技大学获得学士学位, 2003 年于武汉大学测绘学院获得硕士学位, 2006 年于中国科学院上海天文台获得博士学位, 现为中国科学院上海天文台研究员, 主要研究方向为航天器轨道动力学与精密定轨。

E-mail: yongh@shao.ac.cn

Huang Yong received his B.Sc. degree from Wuhan Technical University of Surveying and Mapping in 2000, received his M.Sc. degree from School of Geodesy and Geomatics of Wuhan University in 2003, and received his Ph.D. degree from Shanghai Astronomical Observatory in 2006. He is currently a professor at Shanghai Astronomical Observatory. His main research interests include spacecraft orbital dynamics and precision orbit determination.