

风云四号气象卫星地面测距系统精度改进技术

贾耀红¹ 任立清² 郭强¹

(1 国家卫星气象中心,北京 100094; 2 乌鲁木齐气象卫星地面站,乌鲁木齐 830011)

摘要 风云四号静止气象卫星(FY-4)地面测距系统用于获得分布在不同地方的 5 个地面站到卫星的精确距离,进而利用得到的距离数据确定并预报卫星的轨道和位置,所以测距精度是影响卫星轨道和位置确定精度的主要因素。本文根据测距系统工作的原理及过程,分析影响测距精度的误差来源,从测距体制、站址坐标测量、地面设备时延测量、转发器时延测量、大气传输时延测量和各站时间同步几个方面分析了风云四号测距系统为了提高测距精度采取的相应的技术手段。

关键词 测距精度;随机误差;系统误差;地面设备时延;卫星转发器时延;大气传输时延

中图分类号: P412.27 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20190391 **文献标识码:** A

引言

风云四号静止气象卫星(FY-4A)是我国第 2 代静止气象卫星,采用三轴稳定的姿态控制方式^[1-2]。卫星上搭载了许多高精度的载荷,主要任务是获取地球表面和云的多光谱、高精度定量观测数据及图像,为天气预报、气候、环境、灾害监测以及空间天气监测预警提供高精度数据和图像。较第一代静止气象卫星风云二号而言,风云四号静止气象卫星的空间分辨率可见光从 1.25 km 提高到 500 m,红外从 5 km 提高到 2 km^[3-4]。为了对获得的高分辨率图像进行导航和配准以及对三轴稳定卫星进行精准姿态和轨道控制,就需要有卫星高精度的轨道和位置数据。风云静止气象卫星轨道确定和预报采用几何法测距定轨^[5],即是通过测量地面几个地面站到卫星的距离来确定出卫星的位置,进而通过动力学法得到卫星的轨道。几何法测距定轨中测距精度是影响定轨精度的主要因素^[6]。风云四号(FY-4)对卫星位置确定精度的要求从风云二号的星下点 100 m 提高到了 20 m,测距精度的要求也提高到随机误差小于 0.5 m,系统误差小于 2 m。为了提高测距精度,在风云四号卫星地面测距系统中针对影响测距

精度的几个环节均采取了相应的技术手段。

1 风云四号测距系统

风云四号测距系统包括 5 个测距站,分别位于北京、佳木斯、广州、腾冲和乌鲁木齐,其中北京为主站,其余为副站(图 1)。

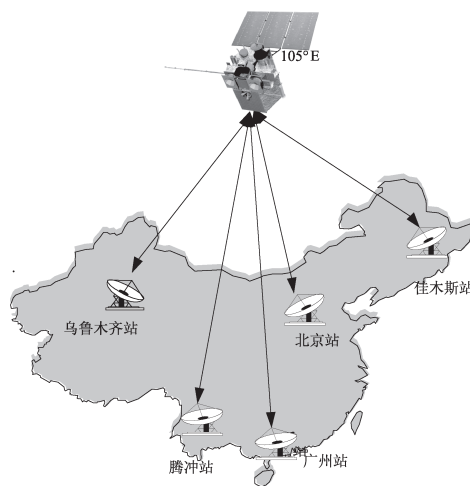


图 1 测距系统布局图

主站每天将时间表通过卫星发给副站,每个站根据时间表自动测距。副站在测距时实时将测距结

果通过卫星发送给主站,主站利用各站的测距数据确定和预报卫星的位置和轨道。

1.1 测距定轨原理

为了测量地面站到卫星的距离,由地面站发送无线电信号至卫星,卫星将该信号转发回地面站,地面站接收机接收后得到发信号和收信号的时间差 Δt ,然后利用 $S = \frac{1}{2}C\Delta t$ 计算距离,其中 C 为光速。

几何法测距定轨来源于三边测量定位算法^[7],即给出空间 3 个点的具体坐标,并测量出未知点到这 3 个点的距离,以这 3 个已知站站址为圆心,分别以各站至卫星的距离为半径,在空中画球面,3 个球

面在空中交于一点,这一点就是所求卫星的位置。

1.2 影响测距精度的因素

如图 2 所示,其中要测量的真实距离是地面天线的相位中心到卫星天线的相位中心的距离,如红线所示。而真实的测量是测量无线电信号所行经的所有途径,如蓝线所示。测量过程是遥控测距终端发出测量信号,经过发射子系统到天线,然后经过空间传输到卫星转发器,由卫星转发器转发后经过空间传输至地面站天线到接收子系统,最后回到遥控测距终端,由遥控测距终端解算出发信号的时间差,进而算出距离。其中要求各个站的测量是同步的,即测量同一时刻各个站到卫星的距离。

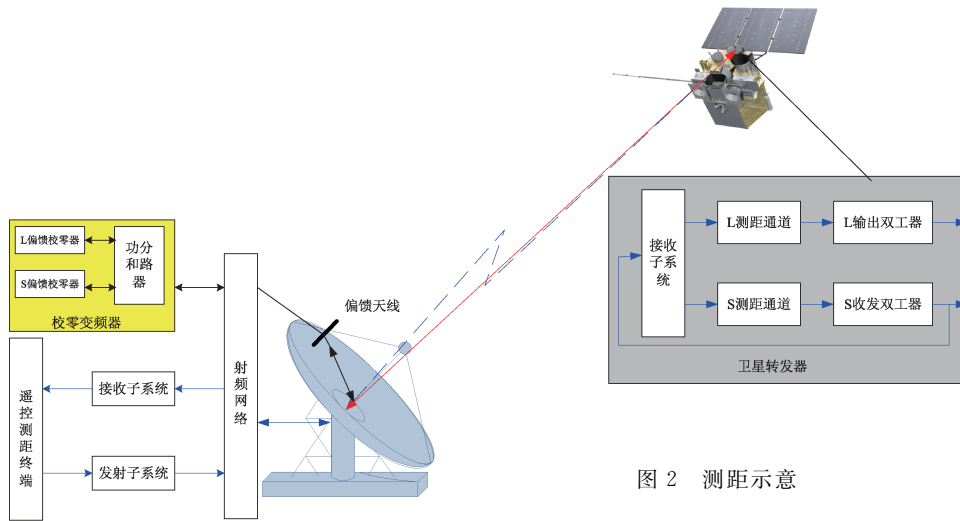


图 2 测距示意

从实际测量过程可以看出实际测量比测量要求多出了信号经过天线发射和接收后地面系统所造成的时延、信号在卫星转发器设备中传输造成的时延以及空间传输过程大气的折射所造成的时延,要想得到真实距离,需要扣除这些时延。

测距测量误差包括随机误差和系统误差。随机误差可以通过采用先进的技术体制和性能优良的器件减小,而系统误差是影响测距精度的主要因素。

测距系统误差的主要来源可以归结为以下几个方面:测距站站址坐标测量、卫星转发器时延测量、各测距站收发设备时延测量、测距信号空间传播路径时延测量以及各站的时间同步精度。

2 提高测距精度采取的主要技术

2.1 测距体制

FY-4 测距系统采用双频率的伪码扩频码分多

址技术,上行工作频率为 S 波段(中心频率 2047 MHz),经卫星接收后变为 L 频段(中心频率 1693 MHz)^[8]和 S 频段(中心频率 2227 MHz)下行信号。5 个站测距信号通过码分多址的方式复用,利用伪码之间互相关性抑制邻道干扰,用良好的自相关性进行解扩获得扩频增益,提高抗干扰能力,实现卫星转发器扩频转发测距。

本系统选取 10 组的平衡 GOLD 码,码长 1023,码钟为 3.069 Mb/s,采用伪码扩频调制信息帧方法实现测距^[9]。这是一种高精度测距方法,利用高速伪码对信息进行扩频,扩频码与信息相干,一个信息位内填充一个或多个完整的伪码周期,每一帧内,利用帧同步作为测距标志信息。它通过提高扩频码的码片速率来提高测距精度,通过增加信息帧的长度来解决测距的距离模糊。信息速率设计为 1 kb/s,相关器带宽 2 kHz、环路等效单边噪声带宽 2 Hz。

该体制下测距的随机误差主要由接收机热噪声决定。

采用二阶延迟锁定环实现伪码跟踪时,热噪声引入的测距随机误差^[9]由下式确定:

$$\delta_R = cT_c \sqrt{\frac{N_0 B_L}{2\alpha c} \left[1 + \frac{2N_0 B_c}{\alpha c} \right]} \quad (1)$$

式中: $\alpha \approx 0.6$ 为损失因子; c 为光速; $\frac{C}{N_0}$ 为接收机输入载噪比; B_L 为环路等效单边噪声带宽; B_c 为相关器带宽; T_c 为码元宽度。

经过星地链路计算,S频段接收信号信噪比52 dB/Hz,L频段接收信号信噪比56 dB/Hz,经计算得S频段 $\delta_R = 0.33$ m,L频段 $\delta_R = 0.20$ m。

2.2 站址坐标测量

风云四号静止气象卫星FY-4A 5个测距站的站址坐标精度要求是根据定轨精度的要求推算的,要求测量结果是在WGS1984坐标系,ITRF08参考框架下站址坐标的点位中误差优于5 cm。

站址测量采用的主要技术利用GNSS(Global Navigation Satellite System)对测量点进行测算。具体就是依托国内及周边稳定可靠的IGS(International GPS Service)站,选择各地区稳定连续运行CORS(Continuously Operating Reference Stations)站为纽带,进行坐标传递。测量所使用仪器为精密大地型GNSS仪器,数据处理采用麻省理工研发的GNSS精密数据处理软件。通过将国际IGS站、待测站和各地区的参考站(CORS)进行联合解算,并进行组网平差,得到全球框架下待测站的精确坐标。

经过评估,站址坐标测量误差结果如表1所示。

表1 站址坐标测量误差评估 cm

	M_x	M_y	M_z	M_p
北京站	0.17	0.29	0.25	0.42
广州站	0.15	0.27	0.16	0.35
佳木斯	0.19	0.25	0.27	0.41
腾冲	0.22	0.50	0.27	0.60
乌鲁木齐	0.15	0.37	0.31	0.51

注: M_x 、 M_y 、 M_z 分别为站址坐标的X轴、Y轴、Z轴测量误差, M_p 为位置测量误差, $M_p = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}$ 。

2.3 地面设备时延测量

如前描述,我们测量的真正距离是地面天线相位中心到卫星天线相位中心之间的距离,所以地面设备造成的时延要测量出并扣除掉。

本系统采用偏馈校零法实时扣除地面设备时

延。在天线面合适的地方安装偏馈振子,并在天线中心体里安装校零变频器,偏馈振子和校零变频器实际上模拟了卫星转发器的功能,实现信号的变频和转发。标校方法如下:①使用标校塔测距法标校设备当时的时延 $R_{\text{设备}}^*$ 。设备出厂前利用厂家建设好的标校塔进行标校塔测距,标校塔天线相位中心到地面设备天线相位中心的距离 $R_{\text{塔距}}$ 提前用激光测距测量,同时用仪器测量出塔上校零变频器设备产生的距离 $R_{\text{塔上设备}}$ 。将设备天线对准标校塔进行测距得到 $R_{\text{塔测距}}$,得出设备当时的零值 $R_{\text{设备}}^* = R_{\text{塔测距}} - R_{\text{塔距}} - R_{\text{塔上设备}}$ 。②使用偏馈测距法得出 $R_{\text{偏馈}}$ 。 $R_{\text{偏馈}}$ 表示传输路径为天线相位中心—馈源—偏馈振子—偏馈校零变频器—偏馈振子—馈源—天线相位中心所产生的距离值(图2)。地面天线朝天,使用偏馈测距功能得到 $R_{\text{偏馈距离}}$; $R_{\text{偏馈距离}}$ 表示传输路径为遥控测距终端—天线相位中心—馈源—偏馈振子—偏馈校零变频器—偏馈振子—馈源—天线相位中心—遥控测距终端所产生的距离值。将①测量出的 $R_{\text{设备}}^*$ 代入公式: $R_{\text{偏馈}} = R_{\text{偏馈距离}} - R_{\text{设备}}^*$ 。③将 $R_{\text{偏馈}}$ 装订起来。④每次对卫星测距时进行偏馈校零得到 $R_{\text{偏馈距离}}$,利用装订好的 $R_{\text{偏馈}}$,进而得到设备的实时产生的距离值 $R_{\text{设备}}$,即: $R_{\text{设备}} = R_{\text{偏馈距离}} - R_{\text{偏馈}}$ 。

设备时延是有变化的,其变化包括两个部分。为了提高设备可靠性,设备重要组成单元都采用A/B机备份的模式,所以第1部分就是设备A/B机切换带来的时延的变化,根据3年来的实测数据分析这部分变化在1~3 m之间;第2部分是设备A/B没有切换,由于温度、时间、工作频率偏移及电平等因素的影响而产生信号的相位漂移误差。带来这种误差的主要有功放、上下行链路的滤波器等,根据3个月实际测量数据分析,这种误差最大变化量在1 m左右。这两种时延变化量通过实时测量可以消除。

实时偏馈校零法由于将校零设备的时延作为固定值,那么就存在校零设备的漂移误差,测量过程也有测量残差,这些误差组成设备时延的测量误差,将和其他部分的测量误差糅在一起,体现在定轨当中,用定轨残差来分析其影响。

2.4 卫星转发器时延测量

测距信号经过卫星转发时所走的通路如图2中灰框所示,其所造成的时延也要测量出并扣除掉。卫星发射到太空后,其工作环境处于真空状态,并且对于三轴稳定卫星来说,由于太阳在一天当中的不

同时间会照射到卫星的不同部分,产生的外热流变化很大,尽管卫星采用了热控措施,但对转发器而言,其工作温度只能控制在一定范围内,所以这么大的温度变化,导致卫星转发器相关设备造成的时延与发射前在地面测量结果相比变化的可能性很大。有研究显示卫星转发器的时延每天呈现周日变化特征^[10]。在风云四号静止气象卫星 FY-4A 测距系统设计当中做过研究和探索^[11],目前采用的方法是在卫星发射前标定好,测距时当作常数扣除,但定期通过定轨软件将卫星转发器零值当做参数解算,以查看其变化量。卫星转发器误差和其它测量误差一样,用定轨残差来分析其影响。

2.5 大气传输时延测量

电磁波在星地之间传播过程中,受到电离层和中性大气(主要为对流层)折射、散射、吸收及色散等现象,以及可能出现的多路径效应的影响,对信号传输造成延时,使星地测距产生误差。

地面上空大约 50 ~ 1000 km 范围内的大气层中充满了电子,并形成了具有一定量级相对稳定的电子密度,这就是所谓的电离层^[12]。电磁波的入射使带电粒子向不同方向运动,从而产生附加的辐射波,并叠加到入射波上,形成对电磁波的折射作用。电离层折射作用使入射波的相位传播速度(相速度)加快,而波内能量传播速度(群速度)减慢,这项误差就是电离层延迟误差,也就是电离层引起的群时延误差^[13]。双频测距法消除电离层误差,其时延计算:

$$\tau = \frac{f_L^2}{f_L^2 - f_S^2} \tau_L - \frac{f_S^2}{f_L^2 - f_S^2} \tau_S \quad (2)$$

则时延修正精度

$$\sigma_\tau = \sqrt{a^2 \sigma_L^2 + b^2 \sigma_S^2}; \quad a = \frac{f_L^2}{f_L^2 - f_S^2},$$

$$b = \frac{f_S^2}{f_L^2 - f_S^2}.$$

式中: τ_S 、 τ_L 为 S 频段和 L 频段的时延测量值; τ 为卫星到地面站的真实时延; f_S 、 f_L 为伪码的载波频率。

本系统通过双频测距解算出每个站的测距信号传输时电离层造成的距离偏差。将实测出的电离层时延数据与 GPS 公布的测站当地电离层数据对比,其变化趋势一致。电离层时延修正精度 σ_τ 与距离测量的精度 σ_L 和 σ_S 有关,将和其它测量残差一

起体现在定轨后的定轨残差里。

中性大气层是指从地面向上大约到 50 km 范围内的大气层,有时也统称对流层。测距信号在大气层传播时会受到中性大气折射的影响,产生时延和路径弯曲^[14],由此造成信号的传播延迟。天顶方向的中性大气延迟约为 2.3 m,当高度角为 10° 时,此延迟将增加至约 20 ~ 25 m^[14]。风云四号所有测距地面站对所有轨位的卫星的高度角在 20° ~ 60° 之间,所以中性大气时延是高精度测距的误差源之一。对流层是非弥散性介质,其延时有成熟的计算模型。本系统采用改进的 Hopfield 模型^[14],需要提供测距站当地的气压、温度、湿度以及信号的入射角度。所以本系统测距当中对流层效应产生的延时的改正误差主要来源于数学模型误差和气象要素的误差,每个测距地面站都建有 3 要素的自动气象站,实时提供当地的温度、湿度和气压。GPS 导航定位采用该模型后的误差达到了亚米级^[14]。

2.6 各站时间同步

多站测距定轨需要各站在同一时刻对卫星的测距结果,因此,要求各测距站有统一的时间标准,即时间同步。本系统采用各站统一利用 GPS/北斗进行时间同步的方法,使整个测距系统的时间都统一到 GPS/北斗时间上。

本系统采用的 GPS/北斗接收机精度是 100 ns,根据实际卫星定位数据统计,风云四号卫星每秒位置移动在 2 ~ 3 km 之间,那么由于时间不同步引起的距离误差最大为 $\sigma_s = vt = 3 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-9} = 0.0003$ m,相对于米级精度要求可以忽略不计。

2.7 测距数据的定轨残差

系统随机误差、站址坐标测量误差、设备时延测量误差、卫星转发器时延修正误差、电离层及对流层时延修正误差在实际测量过程中是混合在整个测量误差中,其精度一般用定轨后的定轨残差来考核。

利用实测数据进行定轨后,定轨软件利用测量数据,根据模型常数规范(包括时间系统,坐标系统,动力学模型,测量模型,估值方法等),分析确定卫星的轨道,对轨道进行预报、评估。定轨后利用定轨结果计算测量数据的残差 RMS,通过残差 RMS 评估测量数据精度^[15]。风云四号 A 星发射后,其测距数据的定轨残差在 1 m 以内,随机取 6 d 的定轨残差平均值如表 2 所示。

表 2 定轨残差

	北京站	佳木斯站	乌鲁木齐站	广州站	腾冲站
2019-05-17	0.80	0.56	0.78	0.75	0.63
2019-05-18	0.70	0.45	0.61	0.76	0.54
2019-05-19	0.83	0.58	0.86	0.94	0.61
2019-05-20	0.81	0.64	0.93	0.85	0.68
2019-05-21	0.80	0.56	0.66	0.88	0.59
2019-05-22	0.78	0.56	0.69	0.91	0.57

3 结论

风云四号气象卫星测距系统采用双频伪码码分多址的技术体制,通过偏馈校零法实时消除地面设备的时延,双频五站测距消除电离层时延,实时测量测站温湿压用先进的模型解算中性大气时延,提高测距站站址坐标测量精度及各站时间同步精度,使测距精度大幅度提高。根据两年来的轨道确定结果反映出的定轨数据残差来看,各站都平均在 1 m 以内,轨道确定及预报的精度也满足风云四号气象卫星高精度图像导航以及卫星姿态和轨道控制的要求。

参考文献

- [1] 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):8-12.
- [2] 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.
- [3] 冯小虎,郭强. 风云二号气象卫星双星共轨技术研究与应用[J]. 气象科技, 2018,46(1):36-38.
- [4] 吕擎擎,张甲申,林维夏,等. FY2 卫星特殊事件对云图接收数量和质量的影响[J]. 气象科技, 2015, 43(4):576-581.
- [5] 杜兰. GEO 卫星精密定轨技术研究[D]. 南京:解放军信息工程大学, 2006.
- [6] 郭睿,刘雁雨. 基于自发自收测距的 GEO 卫星精密定轨[J]. 测绘科技学报, 2009,26(5):333-336.
- [7] 杨帆. 风云二号静止气象卫星三站测距定位[C]//中国空间科学学会空间探测专业委员会第十二次学术会议, 1999.
- [8] 聂晶,尹红刚,喻阳,等. 风云气象卫星与潜在国际移动通信系统用户终端在 1695-1710MHz 频段兼容性分析[J]. 气象科技, 2017,45(4):622-628.
- [9] 陈仕进. 高精度测距方法研究[J]. 无线电工程, 2003, 33(12): 22-23.
- [10] 刘吉华,李志刚,杨旭海,等. 卫星转发器时延变化[J]. 科学通报, 2014,59:1937-1941.
- [11] 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(6):90-94.
- [12] 电离层对电波传播影响的相关研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.
- [13] 吴小莉,韩春好,平劲松. GEO 卫星区域电离层监测分析[J]. 测绘学报, 2013,42(1):13-18.
- [14] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理和方法[M]. 北京:科学出版社, 2003:369-380.
- [15] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论和测量平差基础[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2014.

Techniques for Improving Precision in Fengyun-4 Meteorological Satellite Ranging System

JIA Yaohong¹ REN Liqing² GUO Qiang¹

(1 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100094; 2 Urumqi Meteorological Satellite Ground Station, Urumqi 830011)

Abstract: Acquired by the Fengyun-4 meteorological satellite ranging system, the distance from the ground station on the earth to the satellite is the main factor influencing the accuracy of the satellite's orbit determination. After introducing the working principles and procedure of the Fengyun-4 ranging system, the techniques used to improve the ranging precision are analyzed from different aspects, including the measurements in the stations' site coordinates, the delay caused by ground equipment, satellite transponder, propagation through atmosphere and the time synchronization of different stations.

Keywords: ranging precision; random error; system error; ground equipment delay; satellite transponder delay; atmospheric propagation delay