

文章编号:1671-8860(2013)10-1207-05

文献标志码:A

# 利用 DORIS 相位数据的 Jason-2 卫星精密定轨

李文文<sup>1</sup> 李 敏<sup>2</sup> 施 阖<sup>2</sup> 赵齐乐<sup>2</sup>

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路129号,430079)

(2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路129号,430079)

**摘要:**主要研究了DORIS系统RINEX观测值模型的建立及其主要误差——星载接收机钟差的改正方法,在此基础上实现了基于DORIS系统RINEX相位观测值数据的Jason-2卫星精密轨道确定。研究表明,利用拟合接收机钟差和利用RINEX频偏数据这两种钟差改正方法,基于RINEX相位观测值的Jason-2卫星精密定轨均能达到径向1 cm量级的精度;而拟合接收机钟差改正能同时削弱接收机钟的高阶振荡误差,可以获得更高的定轨精度。

**关键词:**DORIS系统;RINEX相位数据;Jason-2卫星;精密定轨

**中图法分类号:**P228

DORIS(Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite)是由法国空间研究中心CNES联合法国空间测地研究院GRGS和法国地理研究所IGN于20世纪80年代设计建设的卫星跟踪系统,主要用于低轨卫星高精度定轨和地面目标精确定位<sup>[1-4]</sup>。DORIS是一个上行链路多普勒电波系统,通过测量卫星径向速率进行对卫跟踪观测,其观测精度主要依赖于超稳定振荡石英钟USO(ultra-stable oscillator)的稳定性<sup>[1-2]</sup>。目前DORIS多普勒测速精度可达0.4 mm/s<sup>[3]</sup>,新发布的RINEX(receiver independent exchange format)相位观测数据精度能达到mm级<sup>[3-4,6]</sup>。

法国和美国联合研制的Jason-2卫星和我国自主研制的HY2卫星上搭载的DGXX型DORIS接收机不仅能够提供doris2.2格式的测速数据,还能提供RINEX格式的相位和伪距观测数据<sup>[3-6]</sup>。与doris2.2文件提供的径向速率(radial velocity measurement, MVR)数据相比,RINEX数据的最大优势是其数据发布的延迟时间更短,通常滞后1 d即可以获取<sup>[6]</sup>,且利用RINEX数据还能够对DORIS系统的内部系统误差进行进一步研究,如地面信标站和DORIS接收机钟差、天线相位中心等。CNES的Mercier、Cerri等学者

的研究表明,目前利用DORIS的RINEX双频数据进行精密定轨能够达到和DORIS的MVR数据一致的定轨精度<sup>[6]</sup>。

不同于GPS系统,DORIS接收机各历元没有足够多的同步观测值进行钟差参数估计,因此信标站钟差和接收机钟差改正需要利用钟差模型<sup>[6]</sup>。本文针对接收机钟差改正研究了两种改正方法,即利用拟合接收机钟差改正和利用RINEX频偏数据改正,并进一步在GEODYN II软件平台上,实现了RINEX相位观测值的Jason-2卫星精密轨道确定。分析表明,采用本文介绍的两种接收机钟差改正方法,Jason-2卫星RINEX相位观测值的定轨精度均能达到径向1 cm量级;而采用拟合接收机钟差改正能够削弱接收机钟振荡器的高阶误差,能获得比利用RINEX频偏数据改正更高的定轨精度。

## 1 DORIS系统相位观测值模型

### 1.1 DORIS系统RINEX观测数据

新一代DORIS系统星载DGXX接收机利用主控站上传的时间同步数据,实现在轨时间系统OBT(on board time)和国际原子时TAI(interna-

收稿日期:2013-06-15。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41204029, 41231174);北斗青年优秀论文基金资助项目(CSNC2012-QY-1);武汉大学青年教师基金资助项目。

tional atomic time)的粗略同步,并将各观测历元钟差发布于 RINEX 文件中,其精度达  $6 \times 10^{-6}$  s 量级<sup>[3,6]</sup>。RINEX 数据提供双频伪距和相位观测值,第一频率标称值为 2.036 25 GHz,第二频率标称值为 400.125 MHz,第二频率数据主要用于双频电离层改正<sup>[3,5]</sup>。由于噪声的影响,RINEX 文件提供的伪码距观测精度为 1 km 左右,单独采用伪距观测值难以获取高精度轨道<sup>[3,6]</sup>。而 RINEX 相位观测值精度可达 mm 量级<sup>[3-4,6]</sup>,由于频率越高波长越短、测量精度越高,因而高精度轨道计算一般采用高频 2 GHz 相位数据。

## 1.2 观测值模型建立

对于 DORIS 系统 RINEX 文件的观测数据,可以按照两种常用模式来处理。一种是类似经典的 GPS 单点定位的模式,利用伪距和相位观测值建立观测模型。也可以采用类似 DORIS 系统通用的径向速率 MVR 建立观测模型,利用两个连续相邻的相位观测值历元间差分建立观测方程。

径向速率 MVR 观测值的主要优点是能消除相位观测值整周模糊度,本文也采取 DORIS 系统径向速率 MVR 这一传统观测模型。相邻历元径向速率 MVR 可表示为:

$$v = \frac{\lambda_1 L_1(t_{i+1}) - \lambda_1 L_1(t_i)}{\Delta T} \quad (1)$$

$\Delta T$  为相邻历元时间间隔,  $\lambda_1$  为地面信标站发射信号高频  $L_1$  的波长,  $L_1(t_{i+1})$  和  $L_1(t_i)$  表示相邻观测时刻  $t_{i+1}$  和  $t_i$  的  $L_1$  相位观测值(周波数),主要受接收机钟差、地面信标站钟差、电离层、对流层、天线相位中心偏差等的影响,从而  $L_1$  可表示为<sup>[6-7]</sup>:

$$\lambda_1 L_1 = R - e + c(\tau_r - \tau^e) + d_1 + d\text{Tr}_{01} + \lambda_1 N_1 + \epsilon_1 \quad (2)$$

其中,  $R$  为几何距离,  $\tau_r$  为接收机钟差,  $\tau^e$  为地面信标站钟差,  $e$  为电离层延迟,  $d_1$  表示天线相位中心偏差,  $d\text{Tr}_{01}$  为对流层延迟,  $N_1$  为  $L_1$  的整周模糊度;  $\epsilon_1$  为  $L_1$  的观测噪声。

不同于 GPS 系统,DORIS 接收机各历元没有足够的同步观测值进行钟差参数估计,因此信标站钟差和接收机钟差都需要采用钟差模型,通常信标站钟频的稳定度优于  $5 \times 10^{-13}$ <sup>[1,10]</sup>,各跟踪弧段(一般各弧段跟踪时间小于 30 min)可采取一阶多项式描述信标站钟差<sup>[6-7]</sup>:

$$\tau^e = a_0 + a_1 t + \epsilon^e \quad (3)$$

其中,  $a_0$  和  $a_1$  为信标站钟差常数项和线性项;  $\epsilon^e$  为钟差高阶误差。常数  $a_0$  通过历元间差分消除,线性项  $a_1$  在径向速率 MVR 观测值中将作为地面信标站常数 bias 体现,因此径向速率 MVR 又

可以表示为:

$$v = \frac{\Delta R - \Delta e + c\Delta\tau_r + \Delta d\text{Tr}_{01} + \Delta d_1}{\Delta T} + a_1 + \epsilon \quad (4)$$

$\Delta R$ 、 $\Delta e$ 、 $\Delta\tau_r$ 、 $\Delta d\text{Tr}_{01}$ 、 $\Delta d$  和  $\epsilon$  分别表示相邻历元的几何距离变化、电离层延迟变化、接收机钟差变化、对流层延迟变化、相位中心偏差变化以及观测噪声。

在以上 MVR 观测值的众多误差源中,电离层可采取双频改正<sup>[6,13-14]</sup>,对流层利用参数估计,天线相位中心采用参数改正,因而 MVR 观测值的主要误差在于 DORIS 接收机钟差误差。

## 2 接收机钟差改正

### 2.1 基于拟合接收机钟差改正

根据 RINEX 数据定义,观测历元  $t$  时刻对应的 TAI 时间为  $T$ ,该历元接收机钟差为  $-\tau_r$ ,各历元  $\tau_r$  经过预处理后发布于 RINEX 数据中<sup>[9]</sup>,式(4)中  $\Delta\tau_r$  即为相邻历元的接收机钟差之差。

钟差参数的同步与更新<sup>[6]</sup>,使接收机钟差失去连续变化特性,因此为了得到较为平滑的钟差,本文采用二次多项式对单天钟差数据进行拟合,并利用拟合钟差计算  $\Delta\tau_r$ ,代入(4)式进行接收机钟差改正。

### 2.2 基于频偏改正

接收机钟差实际反映了 USO 的频率相对于标称频率的变化,而时间和频率的关系如下<sup>[5,8]</sup>:

$$\frac{\tau_r}{T} = \frac{\delta f}{f_n} \quad (5)$$

式中,  $\tau_r$  为历元  $T$  时刻接收机钟差;  $f_n$  为接收机  $L_1$  波段标称频率;  $\delta f$  为频率变化。

根据 DORIS 系统 RINEX 数据对频偏  $F$  的定义<sup>[9]</sup>:

$$F = \frac{\delta f}{f_n} \cdot 10^{11} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5):

$$\Delta\tau_r = F \cdot 10^{-11} \cdot \Delta T \quad (7)$$

式中,  $\Delta\tau_r$  为历元间隔  $\Delta T$  的接收机钟差变化,式(7)即为本文采用的利用接收机频偏进行钟差改正的方法。因  $F$  直接由 RINEX 文件给出,利用该方法则可直接改正接收机钟差。

### 2.3 接收机钟差改正精度分析

为了比较分别采用拟合接收机钟差和通过频偏改正接收机钟差的精度,本文选取了 TLSB 站 2009-01-04~01-19 共 15 d 的数据,将拟合改正

(记为  $v_{\text{fit}}$ )和频偏改正(记为  $v_{\text{frq}}$ )的观测值分别与对应的 doris2.2 观测值(记为  $v_{\text{cnes}}$ )进行比较。

各跟踪弧段钟差改正后的径向变化率 MVR ( $v_{\text{fit}}$  与  $v_{\text{frq}}$ )相对于  $v_{\text{cnes}}$  的常数偏差记为  $\epsilon_{\text{bias}}$ , 在定轨中将被信标站各弧段估计的 bias 吸收, 因此并

不影响钟差改正精度。图 1 为 TSLB 站进行接收机钟差改正后的径向速率 MVR 与 CNES 发布的径向速率观测值  $v_{\text{cnes}}$  的差值序列, 均去掉各弧段常数  $\epsilon_{\text{bias}}$  的影响。

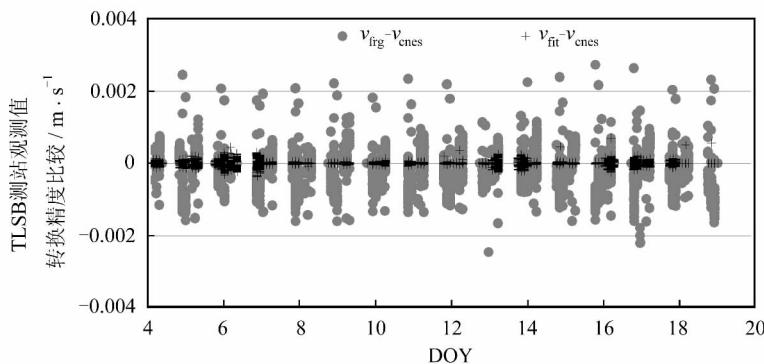


图 1 TSLB 站 MVR 观测值比对

Fig. 1 MVR Observation Comparison of TSLB

由图 1 可见, 去掉各弧段常数 bias 后二者转换的精度都能够达到  $10^{-3}$  m/s 量级。而  $v_{\text{frq}}$  仍然含有高次项抖动变化, 且其抖动振幅远大于  $v_{\text{fit}}$ 。这是由于  $v_{\text{frq}}$  只能反映频偏(钟速)的影响, 而  $v_{\text{fit}}$  还包含了钟漂(高次项)的影响。各弧段平均值 MEAN 和均方根误差 RMS 见表 1。

表 1 TSLB 站 MVR 观测值精度统计

Tab. 1 Precision Statistics of MVR Observations at TSLB Station

	MEAN/m·s <sup>-1</sup>	RMS/m·s <sup>-1</sup>
$v_{\text{fit}} - v_{\text{cnes}} - \epsilon_{\text{bias}}$	$4.54 \times 10^{-5}$	$7.19 \times 10^{-5}$
$v_{\text{frq}} - v_{\text{cnes}} - \epsilon_{\text{bias}}$	$6.01 \times 10^{-4}$	$8.34 \times 10^{-4}$

由表 1 知,  $v_{\text{fit}}$  较 CNES 发布的 MVR 观测值更为符合, 从而说明拟合接收机钟差具有更高的钟差改正精度。

### 3 Jason-2 精密定轨

本文关于 Jason-2 精密定轨的研究基于 GEODYN II 软件平台, 该软件是由美国 GSFC (NASA's goddard space flight center) 开发的高精度动力学定轨软件, 在 DORIS 数据精密定轨方面代表着国际最好水平<sup>[10]</sup>。Lemoine、Zelensky 等人利用 GEODYN II 在 TOPEX/POSEIDON 和 Jason 系列卫星联合 DORIS、SLR 和测高交叉点数据的精密定轨方面进行了大量的研究, 并提出了 std 系列精密定轨策略, 其径向定轨精度达

到 1 cm<sup>[11-12]</sup>。本文中 Jason-2 动力学模型主要参考 GSFC std0905 精密定轨策略<sup>[11]</sup>, DORIS 地面信标站坐标采用 DPOD2005 框架, 采取 EIGEN-GL04S 120 阶静态重力场以及 EIGEN-ANNUL 20 阶时变重力场模型, 并考虑太阳辐射光压、大气阻力、经验力摄动的影响。具体的精密定轨策略如表 2。

根据以上定轨策略, 对 Jason-2 卫星 2009-01-04~01-19 这 15 d 数据每 3 d 作为一个定轨弧段, 对 3 种数据分别进行定轨实验: 拟合接收机钟差改正的观测数据 fit, 利用频偏改正接收机钟差的观测数据 frq, CNES 发布的 doris 2.2 数据 (MVR 观测数据) cnes。将定轨结果与 CNES 发布的精密轨道 POE(precision orbit ephemeris) 进行互差, 并统计各个弧段与 POE 轨道互差的 RMS。

各弧段在径向( $R$ )、法向( $N$ )、切向( $T$ )及三维(3D)精度如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 这 3 种不同数据定轨结果在径向( $R$ )均可以获得 1 cm 量级的精度, 切向( $T$ )误差也基本相当, 而影响其定轨三维精度(3D)的则主要是来自法向( $N$ )的误差, 这也说明了钟差改正的精度主要影响法向定轨精度。

所有 7 个弧段的各方向平均 RMS 如表 3 所示。在法向( $N$ )上, 利用  $v_{\text{fit}}$  和  $v_{\text{frq}}$  与  $v_{\text{cnes}}$  的精度差异达到 1~2 cm, 这主要是由于  $v_{\text{cnes}}$  通过后处理进行了准确的时间标定。

表2 Jason-2 卫星精密定轨策略

Tab. 2 Jason-2 Precise Orbit Determination Strategy

	模型	定轨策略
重力场模型	静态	EIGEN-GL04S ( $120 \times 120$ )
	时变	IERS (2003) + $20 \times 20$ 年周期项 (EIGEN-ANNUAL)
	潮汐	IERS2003(固体潮); Got4.7 $20 \times 20$ (海潮)
其他力学模型	N 体摄动	DE403
	相对论效应	广义相对论
	地球反照辐射	Knocke-Ries-Tapely (1988)
	大气阻力模型	MSIS86, 分时段估计
	太阳辐射模型	Box and Wing 模型(CNES)
	经验力摄动	法向、切向的周期性摄动, 分时段估计
估计参数	初始状态参数	初始坐标与速度
	大气阻力系数	分时段估计, 每 8 h 估计一次
	经验力摄动	切向、法向周期性参数, 分时段估计, 每 24 h 估计一次
	对流层参数	分段常数估计
	信标站 bias	估计测站各弧段 bias

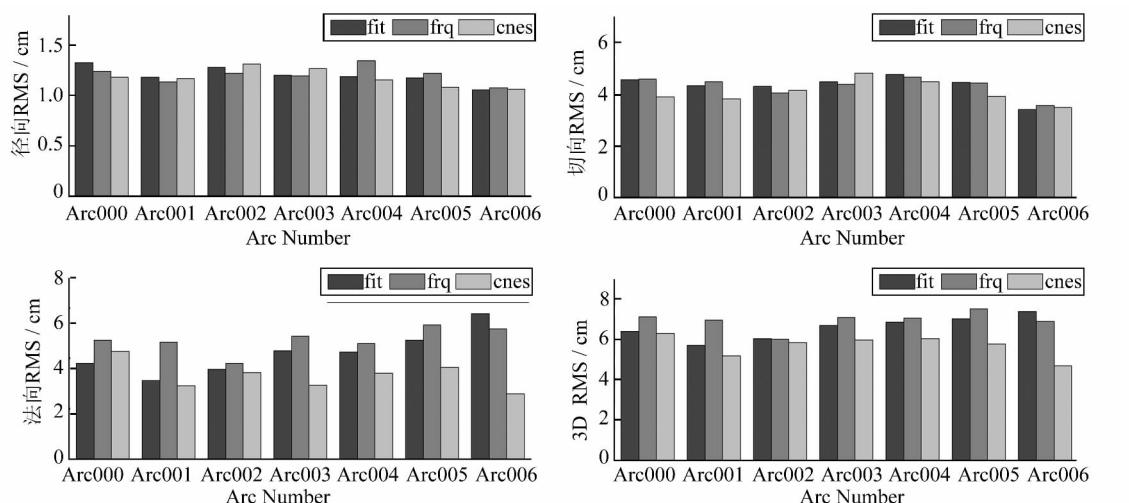


图2 Jason-2 定轨精度统计

Fig. 2 Precision of Jason-2 Orbit Determination

表3 Jason-2 定轨平均精度统计

Tab. 3 RMS Statistics of Jason-2 Orbit Determination

	R/cm	T/cm	N/cm	3D/cm
cnes	1.1	4.1	3.7	5.7
fit	1.2	4.3	4.7	6.6
frq	1.2	4.3	5.3	6.9

单独比较利用  $v_{\text{fit}}$  或  $v_{\text{frq}}$  进行定轨的精度可以发现, 采取拟合钟差改正的方法, 法向( $N$ )较采用频偏进行钟差改正的精度高, 精度提高幅度达到 10%, 而径向和切向精度相当。这主要是因为  $v_{\text{frq}}$  仅仅反映了接收机钟振荡器 USO 一次项的影响, 而采用拟合钟差改正则还削弱了钟漂(钟差高阶项)的影响, 能更好地体现接收机钟差在轨振荡的性质。

## 4 结语

本文主要研究了基于 DORIS 系统 RINEX

观测值数据的精密定轨问题, 包括 RINEX 观测值模型的建立, 以及星载 DORIS 接收机钟差改正方法等, 得出以下几点结论:

1) 拟合接收机钟差改正和利用 RINEX 数据提供的频偏进行接收机钟差改正均能有效改正接收机钟差, 利用拟合接收机钟差改正与 CNES 发布的 MVR 数据更符合;

2) 基于 GEOGYN II 的精密定轨验证表明, 采用 RINEX 数据和 doris2.2 数据, Jason-2 卫星轨道径向精度均能够达到 1 cm 量级, 其精度差异主要体现在法向, 定轨结果在法向较 doris2.2 数据有 1~2 cm 的精度差异。

3) 基于拟合钟差改正的 RINEX 相位观测值定轨能获得比频偏改正更好的精度, 其法向提高达到 10%, 主要原因在于采用拟合钟差还削弱了钟差高阶项的误差, 能更好地体现接收机钟差在轨振荡性质, 而基于频偏的钟差改正只修正了钟

速的误差,也说明接收机钟差改正误差主要影响轨道的法向精度。

## 参 考 文 献

- [1] Bardina N F, Jayles J. DORIS-A Precise Satellite Positioning Doppler System[C]. The AAS/AIAA Astrodynamics Conference, Kalispell, 1987
- [2] Nouel F, Berthias J P, Deleuze M, et al, Precise Centre National d'Etudes Spatiales Orbits for TOPEX/POSEIDON: Is Reaching 2 cm Still a Challenge[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(C12)
- [3] Auriol A, Tourain C. DORIS System: The New Age[J]. Advances in Space Research, 2010, 46: 1 484-1 496
- [4] Nhun-Fat J B, Tourain C. DORIS: System Description and Control of the Signal Integrity[J]. J Geod, 2006, 80: 457-472
- [5] Lourme E, Leloup P. RINEX DORIS 3.0[Z]. SALP-SP-M-EA-15578-CN, CNES, 2008
- [6] Mercier F, Cerri L, Jean-Paul Berthias, Jason-2 DORIS Phase Measurement Processing [J]. Advances in Space Research, 2010, 45: 1 441-1 454
- [7] Cerri L, Mercier F. Processing of DORIS RINEX Data and Relationship with the "2.2" Format[C].
- DORIS AWG Meeting, France, 2011
- [8] Jayles C, Toumazou V, Guinle T, et al. Modelling of DORIS 2GM and CRYOSAT Instruments[Z]. CO-SP-D0-OP-14815-CN, CNES, 2009
- [9] IDS. DORIS Data Exchange Format[S]. 2008
- [10] McCarthy J J, Rowton S, Moore D, et al. Geodyn II Systems Description Vloume I[M]. Maryland: SGT Inc., Greenbelt, 1993
- [11] Zelensky N P, Lemonie F G, Ziebart M, et al. DORIS /SLR POD Modeling Improvements for Jason-1 and Jason-2[J]. Advances in Space Research, 2010, 46: 1 541-1 558
- [12] Lemoine F G, Zelensky N P, Chinn D S, et al. Towards Development of a Consistent Orbit Series for TOPEX, Jason-1 and Jason-2 [J]. Advances in Space Research, 2010, 46: 1 513-1 540
- [13] 刘俊宏,古德峰. DORIS 实时定轨中的频偏估计方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(8):956-959
- [14] 金涛勇,胡敏章,蒋涛,等. 卫星测高资料的电离层延迟改正交叉检验与误差分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(6):658-661

第一作者简介:李文文,硕士生,主要研究方向为低轨卫星定轨。  
E-mail:cheeselee@whu.edu.cn

## Jason-2 Precise Orbit Determination Using DORIS RINEX Phase Data

LI Wenwen<sup>1</sup> LI Min<sup>2</sup> SHI Chuang<sup>2</sup> ZHAO Qile<sup>2</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The new DORIS observations in RINEX format are now available with dual frequency phase and pseudo-range measurements. Due to shorter distribution latency with respect to the older MVR data in doris2.2 format, this RINEX DORIS data can be widely used in LEO medium orbit determination. With analyzing the phase observation equation, this paper has proposed two different methods to correct the main receiver clock error, thus realizing the Jason-2 POD based on DORIS phase data. The research shows that 1 cm radial orbit precision can be achieved by using fitted receiver clock offset correction or frequency offset correction. And by weakening the high-order receiver clock error, applying the fitted clock offset correction can further improve the orbit precision.

**Key words:** DORIS; RINEX phase data; Jason-2; precise orbit determination

**About the first author:** LI Wenwen, postgraduate, majors in LEO precise orbit determination data processing.  
E-mail: cheeselee@whu.edu.cn