

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2019-04-0357-10

基于转发式一发多收模式的 GEO 卫星定轨研究

刘凯^{1,2,3,4}, 杨旭海^{1,2}, 陈亮^{1,2}, 韦沛^{1,2}, 成璇^{1,2}, 曹芬^{1,2}, 南凯^{1,2}

- (1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600;
3. 西安电子科技大学, 西安 710071;
4. 陕西省商业卫星测控数传技术研究院, 西安 710065)

摘要: 实现了基于一发多收模式的地球同步轨道卫星精密测定轨, 一发多收测轨模式是转发式测定轨技术中一种观测模式。测轨站主站向卫星发射一个伪码扩频信号, 经卫星转发器转发, 传向主站和副站, 形成主站的自发自收和副站的主发副收的测轨模式。并依托中国科学院国家授时中心的西安站、长春站和喀什站开展 C 波段一发多收观测测定轨试验。主站的发射系统时延和卫星转发器的时延可以通过解算中的参数估计予以解算, 副站的系统误差经标校方法抵消其影响。试验以自发自收的定轨结果评估一发多收的定轨精度, 结果表明一发多收定轨精度可达 10 m 量级, 也说明一发多收观测模式是一种有效的精密测定轨方法。

关键词: 转发式测定轨; 一发多收模式; 自发自收模式; 精密定轨; 地球同步轨道卫星

Orbit determination for GEO satellites using ODTT with the mode of multi-receivers received a signal from main station

LIU Kai^{1,2,3,4}, YANG Xu-hai^{1,2}, CHEN Liang^{1,2}, WEI Pei^{1,2},
CHENG Xuan^{1,2}, CAO Fen^{1,2}, NAN Kai^{1,2}

- (1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Precise Navigation and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. Xi'an Electronic and Science University, Xi'an 710071, China;
4. Shaanxi Provincial Institute of Measurement and Control and Data Transmission Technology for Commercial Satellite, Xi'an 710065, China)

Abstract: A method of orbit determination for GEO (geosynchronous orbit) satellites has been implemented, the observation mode that multi-receivers received a signal from main station has been used, which is one observation mode of the ODTT (orbit determination by transfer tracking) technique. In this mode, a pseudo-code spread spectrum signal is transmitted to the satellite by the main station, this signal is transferred to the ground via transponder. And then, every stations include the main station received the signal. A experiment has been carried out using three stations which located at Xi'an, Changchun and Kashi, the time delay of main station and

收稿日期: 2019-04-19; 接受日期: 2019-06-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11173026); 载人航天预研资助项目 (0602)

作者简介: 刘凯, 男, 硕士研究生, 主要从事卫星精密测定轨与导航定位研究。

satellite transponder can be solved with orbit determination, the time delay of other stations has been calibrated. The precision of orbit determination for this mode is about ten meters, which assessed by the result of roundtrip mode. The result shows that this observation mode is also valid for precise orbit determination.

Key words: orbit determination by transfer tracking (ODTT); observation mode with multi-receivers received same signal; roundtrip mode; precise orbit determination (POD); geosynchronous orbit (GEO) satellites

0 引言

地球同步轨道 (geosynchronous orbit, GEO) 卫星能够实现广域连续覆盖, 原则上 3 颗地球同步轨道卫星可实现全球覆盖, 因此常用于通讯、气象、广播、电视等方面的应用, 在军事领域也有诸如导弹预警、跟踪与数据中继等方面的特殊功用。根据北美空防司令部 NORAD (North American Aerospace Defense Command) 发布的数据, 截止 2019 年 6 月, 全球共发射 956 颗高轨卫星, 其中在轨工作的同步轨道静止卫星数量约为 560 颗。地球静止轨道 (geostationary orbit) 因其独特的高轨静止特性和稀缺轨道资源为各国所青睐^[1-2], 中国北斗卫星导航系统 BDS (BeiDou Navigation Satellite System) 星座的构建包括多颗地球同步轨道静止卫星。显然, GEO 卫星精密定轨对中国北斗卫星导航系统、国防建设、国民经济发展及科学研究等方面都具有十分重要的意义^[3-4]。

2003 年, 中国科学院国家授时中心提出了有自主知识产权的转发式卫星测定轨新方法, 并建立了 C 波段转发式卫星测轨系统, 实现双向时间同步精度优于 1 ns、测距精度优于 1 cm, 相比于常规的 S 波段统一测控系统 (unified s-band system, USB) 测距精度提高了 2 个数量级, 处于国际先进水平^[5-7]。转发式一发多收测轨模式具有隐蔽性强、发射站少、配置灵活、设备功耗低、可靠性高等优势, 目前已广泛应用于解决点波束 (或区域波束) 抗干扰信号上行模式下的卫星测定轨问题。本文选择转发式一发多收测轨模式开展 C 波段观测测定轨试验, 并实现对 GEO 卫星的精密定轨。

1 转发式卫星测定轨技术原理

转发式卫星测定轨方法与技术是在双向卫星时间频率传递 (two way satellite time frequency transfer, TWSTFT) 技术的基础上, 建立的一种全新的卫星测定轨方法^[8]。转发式自发自收模式观测资料定轨精度可达米级水平^[9]。

1.1 测轨观测原理

转发式卫星测轨方法的原理是各卫星地面观测站的原子钟产生高精度时间信号, 经调制后产生不同伪码的时间信号送往卫星, 经卫星转发器转发至各地面观测站^[10-11]。不同卫星地面观测站虽然用同一个频率, 但采用不同的伪码, 码分多址技术使得不同台站的伪码扩频信号之间互不干扰。因此, 每个地面观测站在同一个频点上能接收到经卫星转发器转发的所有观测站发射的时间信号, 每个地面观测站接收机测定信号路径时延, 最终可以精确地测定各地面观测站到卫星间的距离^[12-15]。

不同信号的组合形成不同的模式^[16]: 各地面观测站仅接收卫星转发自己地面观测站发射的信号, 这种信号组合形成了转发式卫星自发自收测轨模式; 各地面观测站共同接收卫星转发的同一地面观测站发射的信号, 这种信号组合形成了转发式卫星一发多收测轨模式; 各地面观测站接收卫星转发各地面观测站发射的信号, 这种信号组合形成了转发式卫星多发多收测轨模式^[17-18]。本文主要针对一发多收测轨模式下地面观测站设备对 GEO 卫星的测距精度进行研究。转发式测轨网的时延测量原理如图 1 所示。

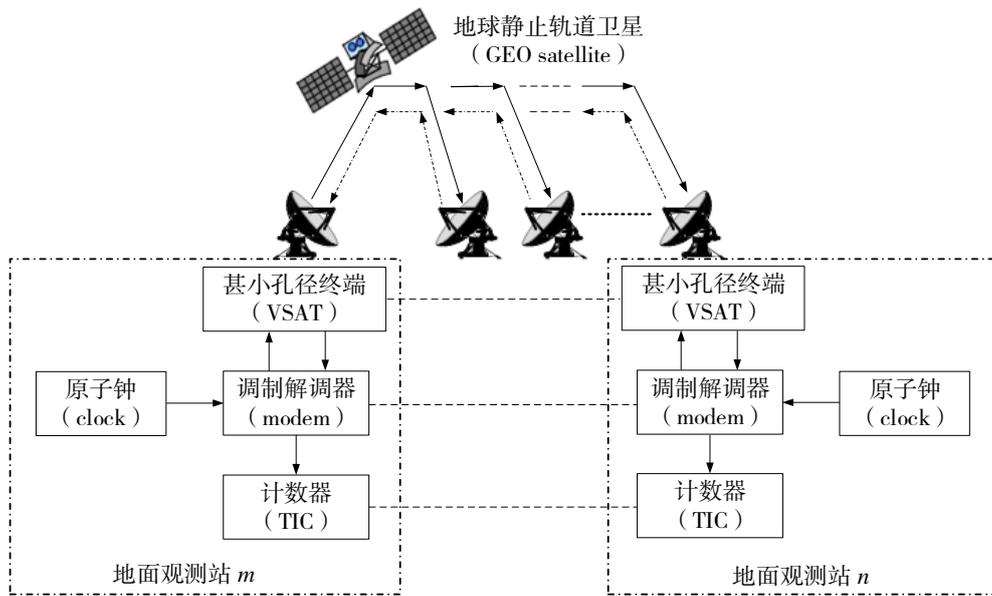


图 1 转发式测轨网时延测量原理图

地面观测站 m 将调制后的时间信号发送给卫星,地面观测站 n 在其钟面时间 t_n 时刻接收到经卫星转发的 m 站信号 (如图 2 所示),站 m 发射的时间信号到站 n 原子钟测量时刻的路径时延 T_{nm} 为

$$T_{nm} = t_n + \Delta T_n - \Delta T_m, \tag{1}$$

式 (1) 中, ΔT_m , ΔT_n 分别为 m , n 观测站的钟面时刻与主站 (UTC/NTSC 标准钟) 钟面时刻差,即钟差。图 2 为转发式测距原理图。

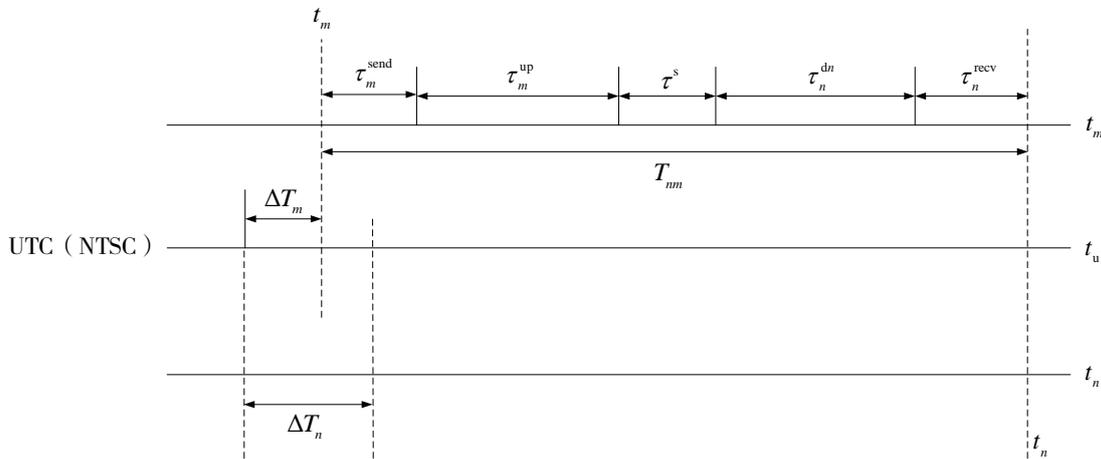


图 2 转发式测距原理图

由图 2 可得时延 T_{nm} 又为

$$T_{nm} = \tau_m^{\text{send}} + \tau_m^{\text{up}} + \tau^s + \tau_n^{\text{dn}} + \tau_n^{\text{recv}}, \tag{2}$$

式 (2) 中, τ_m^{send} 为观测站 m 的设备发射时延; τ_n^{recv} 为观测站 n 的接收设备时延; τ^s 为卫星转发信号的转发器时延; τ_m^{up} 为观测站 m 上行链路的时间信号传输路径时延 (包括几何时延以及电离层、对流层、Sagnac 效应等引起的时延修正项); τ_n^{dn} 为观测站 n 下行链路的时间信号传输路径时延 (包括几何时延以及电离层、对流层、Sagnac 效应等引起的时延修正项)。

观测站 m 上行链路的时间信号传输路径时延 τ_m^{up} 可表示为

$$\tau_m^{\text{up}} = \frac{\sqrt{(X - X_m)^2 + (Y - Y_m)^2 + (Z - Z_m)^2}}{c} + \tau_m^{\text{tro}} + \tau_m^{\text{ion}} + \tau_{m, \text{Sag}}^{\text{up}}, \quad (3)$$

式 (3) 中, (X, Y, Z) 为卫星位置坐标; (X_m, Y_m, Z_m) 为观测站 m 的坐标; c 表示光速; τ_m^{tro} 为站 m 上行信号由对流层引起的时延; τ_m^{ion} 为站 m 上行信号由电离层引起的时延; $\tau_{m, \text{Sag}}^{\text{up}}$ 为地球自转引起的 m 站上行信号的 Sagnac 效应时延修正。

观测站 n 下行链路的时间信号传输路径时延为

$$\tau_n^{\text{dn}} = \frac{\sqrt{(X - X_n)^2 + (Y - Y_n)^2 + (Z - Z_n)^2}}{c} + \tau_n^{\text{tro}} + \tau_n^{\text{ion}} + \tau_{n, \text{Sag}}^{\text{dn}}, \quad (4)$$

式 (4) 中, (X_n, Y_n, Z_n) 为观测站 n 的坐标; τ_n^{tro} 为站 n 下行信号由对流层引起的时延; τ_n^{ion} 为站 n 下行信号由电离层引起的时延; $\tau_{n, \text{Sag}}^{\text{dn}}$ 为地球自转引起的站 n 下行信号的 Sagnac 效应时延修正。

假设 m 与 n 观测站时间已精确同步, 即 $\Delta T_m = \Delta T_n$, 那么式 (2) 为

$$t_n = \tau_m^{\text{send}} + \tau_m^{\text{up}} + \tau^s + \tau_n^{\text{dn}} + \tau_n^{\text{recv}}. \quad (5)$$

对于转发式自发自收测轨模式观测方法, 式 (5) 变为

$$t_n = \tau_m^{\text{send}} + \tau_m^{\text{up}} + \tau^s + \tau_m^{\text{dn}} + \tau_m^{\text{recv}}. \quad (6)$$

图 3 为一发多收测轨模式的观测原理图, 假设观测站 A 是向卫星发射信号的地面主站, B, C, ..., i

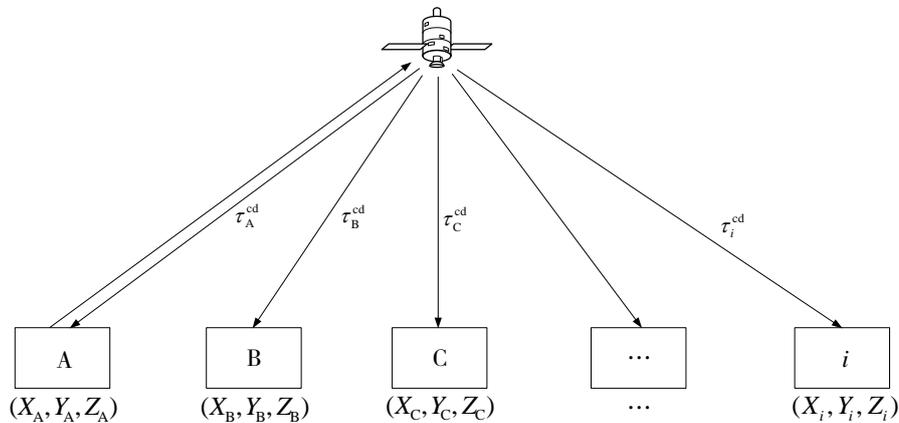


图 3 一发多收测轨示意图

分别为接收卫星信号的地面下行从站, 它们之间的时间已经精确同步, 而且对仪器误差、电离层、对流层、Sagnac 效应等时延进行修正, 式 (6) (地面主站) 简化为

$$T_n = \frac{2 \times \sqrt{(X - X_n)^2 + (Y - Y_n)^2 + (Z - Z_n)^2}}{c} + \tau^s. \quad (7)$$

式 (5) (地面下行从站) 简化为

$$T_n = \frac{\sqrt{(X - X_m)^2 + (Y - Y_m)^2 + (Z - Z_m)^2}}{c} + \frac{\sqrt{(X - X_n)^2 + (Y - Y_n)^2 + (Z - Z_n)^2}}{c} + \tau^s. \quad (8)$$

式(7)和式(8)为一发多收测轨模式的最终观测方程。

1.2 GEO 卫星一发多收测定轨方案设计

为了确保 GEO 卫星星历精度,采用动力学定轨方案^[19-20]。地面观测站为西安站、长春站以及喀什站,每个地面观测站采用双向卫星时间频率传递保证各观测站之间时间精确同步,即 $\Delta T_n - \Delta T_m = 0$,各地面观测站接收设备和发射设备事先进行时延标定,对流层、电离层和 Sagnac 效应时延进行了修正^[21-22]。

在动力学模式中考虑的卫星受到的摄动力有:地球引力(包括非球对称部分),日、月引力摄动,太阳辐射压、地球反照辐射压,类大气阻力等^[23]。其中假设卫星截面积保持为常数 100 m^2 、卫星质量保持为 $1\ 000 \text{ kg}$ 。太阳辐射压的模制误差较大,其原因是太阳辐射压正比于卫星的横截面积,而卫星的翼板或天线总是处于不断调整中。为克服模制不准的问题,精密定轨时通过估计一些经验参数估计来提高精度^[24]。除了这些摄动因素外,由卫星的热辐射或液体气体泄漏导致的微小随机摄动对精密定轨也有一定的影响,这种随机影响与卫星本体的状态密切相关并且难以模制。

2 结果精度分析与评估

为了对卫星轨道确定精度进行准确的分析与评估,文章首先使用重叠弧段的方法对卫星轨道确定精度进行分析与评估^[25-26],然后将一发多收定轨结果与自发自收定轨结果进行了比对。

2.1 重叠弧段比对

轨道精度评估方法如图4所示,第一个轨道使用连续72 h测轨数据进行定轨计算,第二个轨道以第一个轨道定轨起始时间后的12 h为起点,使用连续72 h数据进行定轨计算,然后对两个轨道中36 h重叠的部分进行比较。统计两次定轨结果的差即为该次定轨的轨道精度,统计多次轨道精度的 RMS 平均结果作为精密轨道精度。

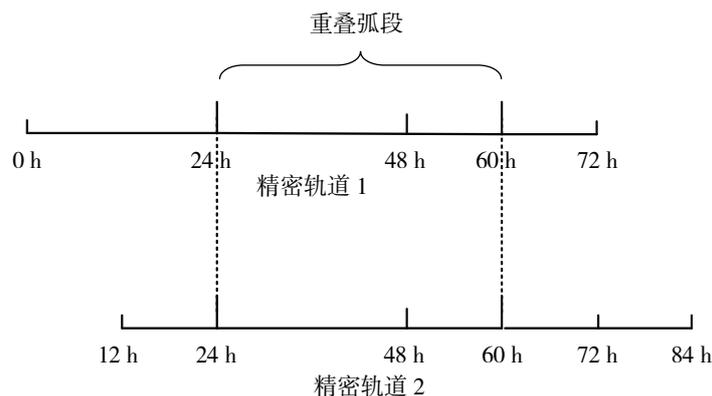


图4 轨道精度评估方法

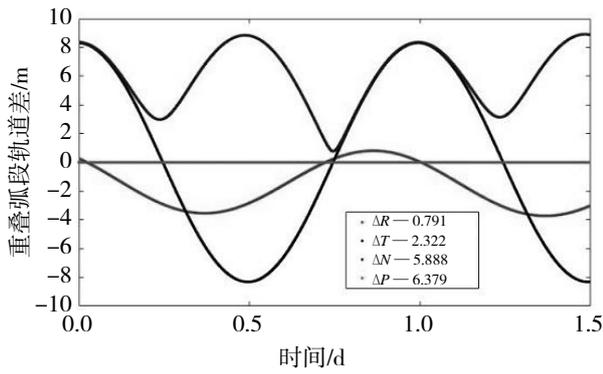
本试验以西安为主站,长春、喀什为副站,选择2017年8月19日00:00:00至2017年8月28日00:00:00对中星12号卫星(GEO)的一发多收观测数据进行分析处理。卫星轨道定轨弧段3 d,每天24 h观测,采样率为1 s,每半小时前5 min用于测量观测设备的系统误差。定轨模式解8个参数:6个轨道参数,1个太阳光压参数,1个转发器时延参数。一发多收观测资料的定轨结果统计见表1和图5。重叠弧段轨道误差平均值:径向为0.411 m、切向为1.455 m、法向为3.112 m、位置误差为3.495 m。系统差平均

值为-68.609 5 m、其起伏 0.248 2 m，残差为 1.398 m。

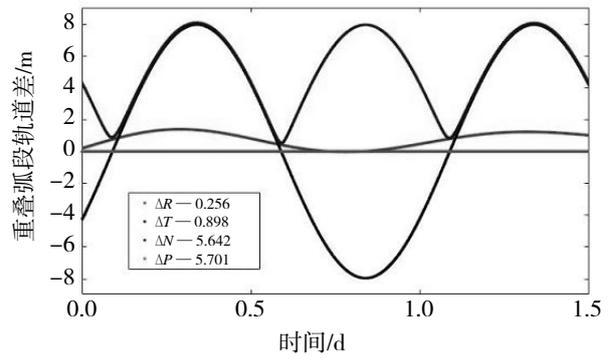
表 1 一发多收观测资料的定轨结果统计

m

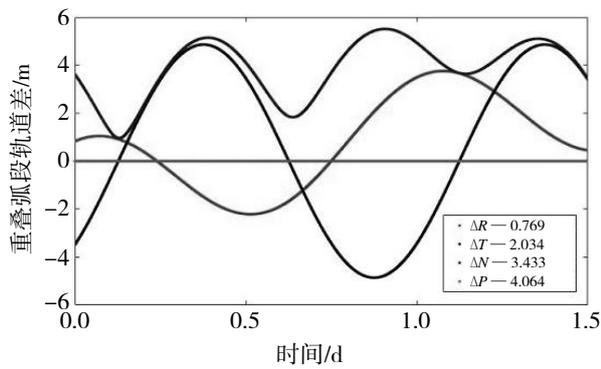
定轨弧段	观测站名	观测资料数	残差	重叠弧段轨道差				系统差
				径向 R	切向 T	法向 N	位置误差 P	
2017-08-19T00:00/ 2017-08-22T12:00	CHANGCHUN (2)	320 839	2.397					
	XIAN (3)	339 265	2.153	0.791	2.322	5.888	6.379	-68.364 6
	KASHI (5)	356 176	2.012					
2017-08-19T12:00/ 2017-08-23T00:00	CHANGCHUN (2)	321 015	2.389					
	XIAN (3)	339 874	2.162	0.256	0.898	5.624	5.701	-68.830 1
	KASHI (5)	355 391	1.974					
2017-08-20T00:00/ 2017-08-23T12:00	CHANGCHUN (2)	322 008	2.269					
	XIAN (3)	340 775	2.050	0.769	2.034	3.433	4.064	-68.365 2
	KASHI (5)	356 738	1.863					
2017-08-20T12:00/ 2017-08-24T00:00	CHANGCHUN (2)	321 950	1.945					
	XIAN (3)	340 841	1.806	0.450	1.857	3.579	4.057	-69.140 0
	KASHI (5)	356 668	1.631					
2017-08-21T00:00/ 2017-08-24T12:00	CHANGCHUN (2)	319 437	1.592					
	XIAN (3)	340 939	1.536	0.315	1.065	3.055	3.251	-68.413 9
	KASHI (5)	356 273	1.304					
2017-08-21T12:00/ 2017-08-25T00:00	CHANGCHUN (2)	316 590	1.407					
	XIAN (3)	342 019	1.368	0.291	1.318	1.623	2.111	-68.971 7
	KASHI (5)	355 884	1.097					
2017-08-22T00:00/ 2017-08-25T12:00	CHANGCHUN (2)	317 067	1.125					
	XIAN (3)	343 767	1.123	0.395	1.332	2.227	2.625	-68.433 2
	KASHI (5)	359 279	0.794					
2017-08-22T12:00/ 2017-08-26T00:00	CHANGCHUN (2)	319 359	1.146					
	XIAN (3)	344 544	1.118	0.343	1.391	2.803	3.148	-68.600 3
	KASHI (5)	362 676	0.807					
2017-08-23T00:00/ 2017-08-26T12:00	CHANGCHUN (2)	319 685	1.103					
	XIAN (3)	344 694	1.088	0.262	0.805	1.639	1.845	-68.479 4
	KASHI (5)	362 669	0.749					
2017-08-23T12:00/ 2017-08-27T00:00	CHANGCHUN (2)	321 100	1.075					
	XIAN (3)	344 768	0.749	0.285	1.180	2.161	2.479	-68.759 4
	KASHI (5)	362 690	0.970					
2017-08-24T00:00/ 2017-08-27T12:00	CHANGCHUN (2)	322 473	0.988					
	XIAN (3)	344 918	1.014	0.460	1.310	2.327	2.709	-68.565 9
	KASHI (5)	363 105	0.667					
2017-08-24T12:00/ 2017-08-28T00:00	CHANGCHUN (2)	320 791	0.953					
	XIAN (3)	344 835	0.974	0.316	1.948	2.987	3.580	-68.391 2
	KASHI (5)	363 492	0.633					



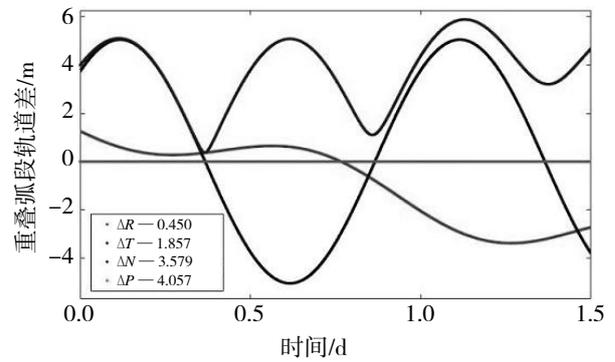
(a) 20170819T00:00/0822T12:00 轨道重叠误差



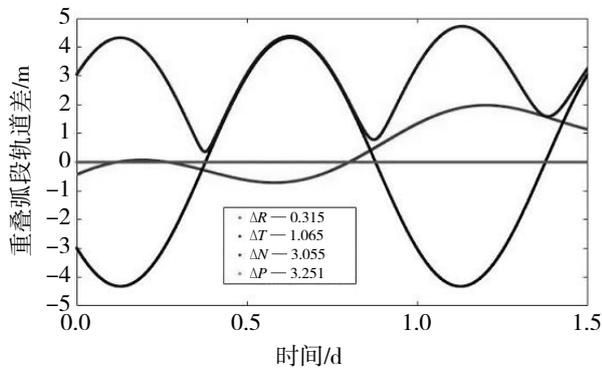
(b) 20170819T12:00/0823T00:00 轨道重叠误差



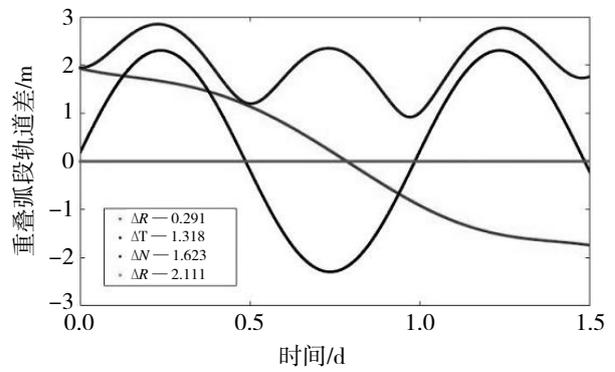
(c) 20170820T00:00/0823T12:00 轨道重叠误差



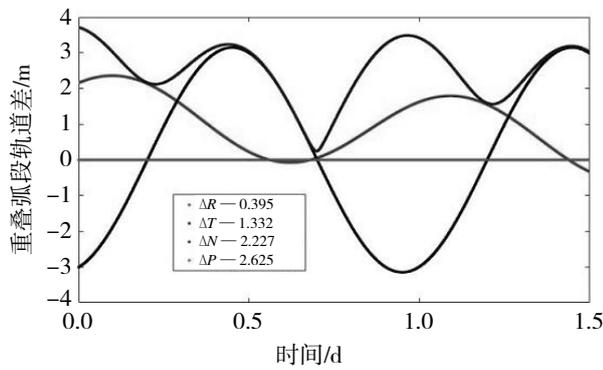
(d) 20170820T12:00/0824T00:00 轨道重叠误差



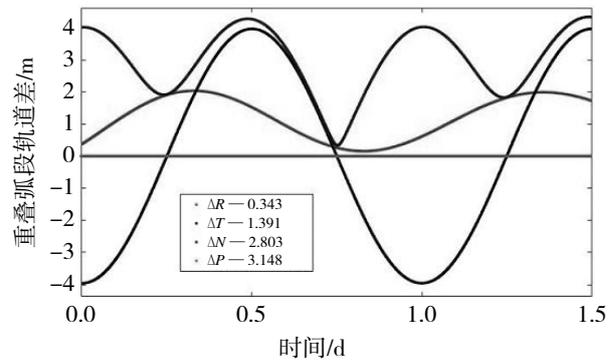
(e) 20170821T00:00/0824T12:00 轨道重叠误差



(f) 20170821T12:00/0825T00:00 轨道重叠误差



(g) 20170822T00:00/0825T12:00 轨道重叠误差



(h) 20170822T12:00/0826T00:00 轨道重叠误差

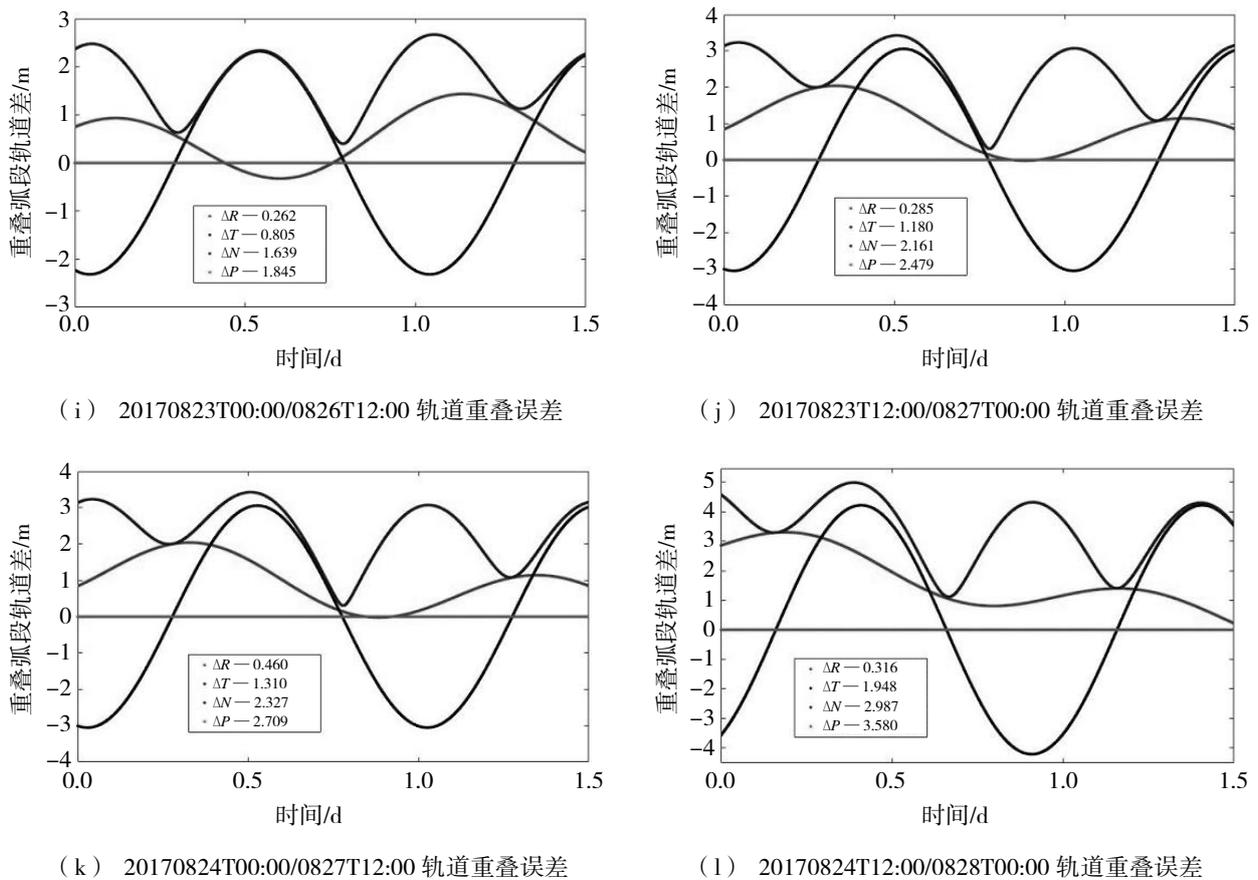


图 5 一发多收观测资料的轨道重叠误差

2.2 一发多收与自发自收定轨结果比对

在计算时首先使用 1 d 的一发多收测轨数据进行一发多收定轨，然后使用 1 d 的自发自收测轨数据进行自发自收定轨，最后对两种轨道结果进行比较，统计两次定轨结果的差即为该次定轨的轨道精度。一发多收与自发自收定轨结果比对统计见表 2。轨道误差平均值：径向为 0.835 m、切向为 5.896 m、法向为 4.994 m、位置误差为 7.992 m。

表 2 一发多收与自发自收定轨结果比对统计

m

定轨弧段	观测站名	观测资料数	重叠弧段轨道差			
			径向 R	切向 T	法向 N	位置误差 P
2017-08-19T00:00/ 2017-08-20T00:00	CHANGCHUN (2)	56 424	1.056	10.760	5.853	12.295
	XIAN (3)	62 963				
	KASHI (5)	64 399				
2017-08-20T00:00/ 2017-08-21T00:00	CHANGCHUN (2)	50 535	0.750	4.082	4.721	6.286
	XIAN (3)	63 242				
	KASHI (5)	67 108				
2017-08-21T00:00/ 2017-08-22T00:00	CHANGCHUN (2)	55 858	0.837	2.024	6.785	7.130
	XIAN (3)	62 035				
	KASHI (5)	67 211				

续表 2

定轨弧段	观测站名	观测 资料数	重叠弧段轨道差			
			径向 R	切向 T	法向 N	位置误差 P
2017-08-22T00:00/ 2017-08-23T00:00	CHANGCHUN (2)	58 235				
	XIAN (3)	63 641	0.591	3.485	2.583	4.378
	KASHI (5)	63 123				
2017-08-23T00:00/ 2017-08-24T00:00	CHANGCHUN (2)	57 152				
	XIAN (3)	63 357	1.089	5.027	5.840	7.783
	KASHI (5)	67 189				
2017-08-24T00:00/ 2017-08-25T00:00	CHANGCHUN (2)	57 646				
	XIAN (3)	63 387	0.754	3.565	3.952	5.376
	KASHI (5)	66 695				
2017-08-25T00:00/ 2017-08-26T00:00	CHANGCHUN (2)	60 440				
	XIAN (3)	64 323	0.706	5.913	4.327	7.361
	KASHI (5)	67 248				
2017-08-26T00:00/ 2017-08-27T00:00	CHANGCHUN (2)	58 722				
	XIAN (3)	63 468	1.049	9.760	6.548	11.800
	KASHI (5)	67 220				
2017-08-27T00:00/ 2017-08-28T00:00	CHANGCHUN (2)	56 942				
	XIAN (3)	63 352	0.684	8.448	4.338	9.521
	KASHI (5)	67 180				

3 结语

转发式一发多收卫星测定轨技术可应用于高精度的 GEO 卫星测定轨, 从转发式一发多收观测模式近 10 d 定轨结果分析确认, 与转发式自发自收观测模式相比转发式一发多收观测模式对 GEO 卫星定轨精度可达 10 m 量级, 证实一发多收观测模式对 GEO 卫星定轨有效性。

参考文献:

- [1] 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京: 解放军出版社, 1995.
- [2] 杜兰, 郑勇, 王宏, 等. 地球静止卫星精密测定轨技术的现状与发展[J]. 飞行器测控学报, 2005, 24(6): 14-18.
- [3] 谭述森. 北斗卫星导航系统的发展与思考[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 391-396.
- [4] 中国卫星导航系统管理办公室. BDS-OS-PS-1.0-2013. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范[S]. 1.0 版. 北京: 2013.
- [5] LI Z G, YANG X H, AI G X, et al. A new method for determination of satellite orbit by transfer[J]. Ser G-PhysMech Astron, 2009, 52(3): 384-392.
- [6] 李孝辉, 杨旭海, 刘娅, 等. 时间频率信号的精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 204-205.
- [7] MONTENBRUCK O, GILL E. Satellite orbits-models, methods, and application[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [8] 李志刚, 艾国祥, 施浒立, 等. 转发器式卫星测轨定轨方法: 中国: ZL 200310102197[P]. 2003-12-30.

- [9] 李志刚, 杨旭海, 李伟超, 等. 转发器式卫星测轨方法[J]. 时间频率学报, 2006, 29(2): 81-89.
- [10] 李志刚, 杨旭海, 施浒立, 等. 转发器式卫星轨道测定新方法[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38(12): 1711-1722.
- [11] 施浒立, 孙希延, 李志刚. 转发式卫星导航原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] CHENG X, LI Z G, YANG X H, et al. Chinese area positioning system with wide area augmentation[J]. The Journal of Navigation, 2012, 65(2): 339-349.
- [13] 孙乐, 陈亮, 杨旭海, 等. 用测站高程分量验证转发式定轨的精度[C]//2011 年青年通信国际会议论文集, 珠海: 2011 年青年通信国际会议组委会, 2011: 166-169.
- [14] BYRON D T, SCHUTZ E, BORN G H. Statistical Orbit Determination [M]. Holand: Elsevier Academic Press, 2004.
- [15] LEI H, LI Z G, YANG X H, et al. Geostationary orbit determination using SATRE[J]. Advances in Space Research, 2011, 48(5): 923-932.
- [16] 艾国祥, 施浒立, 吴海涛, 等. 基于通信卫星的定位系统原理[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38(12): 1615-1633.
- [17] 刘吉华. GEO 卫星精密定轨的关键技术问题研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2010.
- [18] 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(6): 428-434.
- [19] LOVE D P, TOOMB D S, WILKINSON D C, et al. Penetrating electron fluctuations associated with GEO spacecraft anomalies[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(6): 2075-2084.
- [20] 欧吉坤, 刘吉华, 孙保琪, 等. 镜面投影法确定地球同步卫星精密轨道[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(11): 975-979.
- [21] IMAE M. Basic measurement techniques on time and frequency transfer[J]. Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, 2003: 105-112.
- [22] 武文俊, 李志刚, 杨旭海, 等. 利用时间序列模型预报电离层 TEC[J]. 时间频率学报, 2009, 31(2): 141-146.
- [23] 雷伟伟, 张捍卫, 李凯. 岁差章动模型更新等因素对坐标转换的影响[J]. 飞行器测控学报, 2016, 35(1): 53-62.
- [24] 刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 560-565.
- [25] 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 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2010, 40(5): 520-527.
- [26] 管洪杰, 姚志成, 刘岩. 轨道数值积分方法适用性研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(36): 10 883-10 886.