

文章编号: 1001-893X(2012)05-0624-05

同步轨道卫星四站时差统计定轨精度分析^{*}

彭华峰¹, 郑超², 张 韬²

(1. 盲信号处理重点实验室, 成都 610041; 2. 西南电子电信技术研究所, 成都 610041)

摘 要: 基于卫星通信信号的多站时差测轨是一种重要的新型无源测轨方法, 分析其定轨精度对系统应用具有重要意义。介绍了四站时差测轨原理与系统组成, 提出了基于四站时差测量数据的自校准统计定轨策略, 采用计算机仿真了同步轨道卫星的统计定轨精度。仿真结果表明: 当无系统误差时, 24 h 观测数据统计定轨位置误差约为 11 m, 预报 1 周位置误差约 100 m; 当存在系统误差时, 可用自校准方法同步估计系统误差, 系统误差估计精度约为 4 m, 位置误差约为 120 m, 预报 1 周的位置误差约为 200 m。

关键词: 同步卫星; 四站时差; 无源测轨; 统计定轨; 定轨精度

中图分类号: TN971 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.05.004

Passive Orbit Measurement of Geosynchronous Satellite Based on Four-station's Time Difference of Arrival

PENG Hua-feng¹, ZHENG Chao², ZHANG Tao²

(1. National Key Laboratory of Blind Signals Processing, Chengdu 610041, China;

2. Southwest Electronics and Telecommunication Technology Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: Measuring time difference of arrival (TDOA) based on satellite's communication signal is one of the best and new passive orbit measurement methods. It is meaningful to analyse its orbit determination accuracy. In this paper, the principles and system composition of passive orbit measurement with four-station's TDOA are introduced. A self-calibration algorithm of accurate orbit determination for the system is proposed. Orbit determination accuracy of the system is simulated by computer, and the result reveals that: when there exists no system error, the position accuracy is 11 meters with 24 hours observation data, the position accuracy is 100 meters after 1 week's prediction; when there exists system error, the position accuracy is 120 meters with 24 hours observation data, the position accuracy is 200 meters after 1 week's prediction, and the estimated system error accuracy is 4 meters.

Key words: geo-synchronous satellite; four-station's time difference of arrival; passive orbit measurement; statistical orbit determination; orbit measurement accuracy

1 引 言

地球同步轨道(GEO)卫星的精密测定轨一直是精密测定轨领域的研究难点和热点问题, 是确保高精度卫星导航、定位等的基础^[1]。有源精密测距定

轨方法是目前主要的精密测轨手段之一, 其测轨精度可达厘米级水平^[2]。光学测轨是同步卫星的主要无源测轨方式, 但是容易受天气等因素影响。

基于同步卫星通信信号四站时差测量的同步卫星无源测轨方法, 通过 1 个中心站和 3 个副站同时

^{*} 收稿日期: 2012-02-20; 修回日期: 2012-04-05

接收卫星通信信号,并将副站采集数据传输给主站求取时差后实现对卫星测轨。该方法具有测轨精度较高、轨道和信号直接关联等特点,为无源测轨提供了一种新的解决思路。

目前,基于四站时差测量的定位技术已经开展了相关研究,主要侧重在定位算法研究、定位精度分析以及优化布站等方面^[3-7]。将四站时差定位技术应用于同步轨道卫星测轨则未见报导。因此,本文开展四站时差定位技术进行同步卫星测轨的研究,分析其统计定轨精度,对推进四站时差测轨技术的应用具有重要的指导意义。

2 四站时差无源测轨

2.1 测量原理

四站时差无源测轨是在卫星同一波束范围内的 4 个测轨参考站同时接收卫星发射的同一宽带 BP-SK 或 QPSK 通信信号。主站把接收到的信号进行解调,将解调后得到的隐含有发射时间信息的序列码及接收时间信息通过通信网络发送给各个副站,副站利用接收到的主站序列码与自己接收解调后的序列码进行相关比对,找到同源序列码及该信号到各副站的接收时间信息,这样就可以解算出卫星同源信号到达主站与 3 个副站之间的时间差,从而实现同步卫星的精确测轨。这种测轨技术有测量精度高、能全天候工作等特点。该方法的测轨原理如图 1 所示。

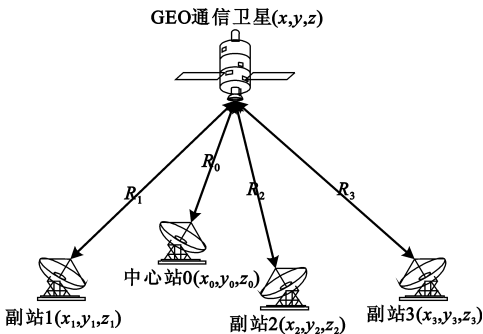


图 1 四站时差无源测轨原理示意图

Fig.1 Principle figure of orbit measurement with four-station's time difference of arrival

2.2 系统组成

同步卫星四站时差测轨系统基本组成如图 2 所示,主要包括 4 个接收站和 1 个监控与数据处理中心。各站数据接收与采集系统主要由天伺馈系统、测轨 ODU、中频矩阵和时间系统 4 部分组成。

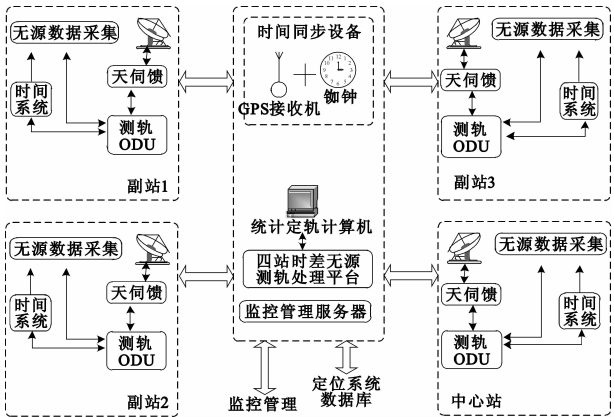


图 2 四站时差无源测轨系统组成框图

Fig.2 System composition of orbit measurement with four-station's time difference of arrival

3 统计定轨原理

3.1 动力学模型

在惯性坐标系中,应用牛顿第二定律可得人造地球卫星的运动方程如下:

$$\ddot{\mathbf{R}} = \mathbf{f}_{\text{TB}} + \mathbf{f}_{\text{NS}} + \mathbf{f}_{\text{NB}} + \mathbf{f}_{\text{TD}} + \mathbf{f}_{\text{SP}} + \cdots \quad (1)$$

式中, $\mathbf{f}_{\text{TB}}$ 为二体问题作用力(见文献[3-5],下同); $\mathbf{f}_{\text{NS}}$ 为地球非球形摄动力,采用 JGM3 模型; $\mathbf{f}_{\text{NB}}$ 为三体摄动作用力,采用 JPL 的 DE200 行星星历进行计算; $\mathbf{f}_{\text{TD}}$ 为固体潮摄动引力,同样采用 JPL 的 DE200 行星星历进行计算; $\mathbf{f}_{\text{SP}}$ 为太阳光压摄动引力。

3.2 测量模型

假设卫星位置为 $\mathbf{R}_s = [x_s, y_s, z_s]^T$, 4 个观测站的坐标分别为 $\mathbf{R}_i = [x_i, y_i, z_i]^T, i = 0, 1, 2, 3$, 其中 0 表示主站,其他表示副站。测量数据中通常还至少包含地面站传输线时延等系统误差,这些误差在定轨时段内可认为是较稳定的未知常值,可以在定轨同时进行估计得到,这个常值用系统误差 $s_i (i = 1, 2, 3)$ 描述。则观测方程为

$$\rho_i = l_i - l_0 + s_i, i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

式中, $l_i (i = 0, 1, \cdots, 3)$ 为卫星到观测站的斜距,表达式为

$$l_i = |\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_i| = \sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2 + (z_s - z_i)^2} \quad (3)$$

观测向量对卫星位置向量的偏导数为

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial \mathbf{R}^T} = \left[\frac{\partial \rho_i}{\partial x_s}, \frac{\partial \rho_i}{\partial y_s}, \frac{\partial \rho_i}{\partial z_s} \right] = \mathbf{u}_i^T - \mathbf{u}_0^T \quad (4)$$

式中, $\mathbf{u}_i^T (i = 0, 1, 2, 3)$ 为单位向量,表达式为

$$\mathbf{u}_i = \frac{\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_i}{|\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_i|} \quad (5)$$

观测向量对系统误差的偏导数为

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial s_i^T} = \mathbf{h}_i^T \quad (6)$$

式中, h_i 中第 i 个元素值为 1, 其他元素值为 0。

3.3 迭代加权最小二乘统计定轨算法^[8-11]

从前面的论述中可知, 待估参数包括 t_0 时刻卫星的状态、系统误差等共 9 个参数, 用向量 $X_0 = [x_0, y_0, z_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0, s_1, s_2, s_3]^T$ 表示。同时, 将卫星运动方程和观测方程进行线性化可得

$$y(t) = H(t)x_0 + \varepsilon \tag{7}$$

令 y_i 表示 i 时刻的观测数据, 对应的偏导数向量为 H_i , 权系数为 $w_i = R_i^{-1}$, 则总的观测向量为 $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$, 权矩阵表示为 $W = \text{diag}(w_1, w_2, \dots, w_n)$, 偏导数矩阵为 $H = [H_1, H_2, \dots, H_n]^T$, 则方程为

$$y = Hx_0 + \varepsilon \tag{8}$$

则加权最小二乘的最佳估值为

$$\hat{x}_0 = PH^TWy \tag{9}$$

通过上式估值后修正初始状态进行迭代, 直至收敛:

$$X_0 = X_0 + \hat{x}_0 \tag{10}$$

当存在系统误差时, 可以采用自校准方法进行估计, 此时测量方程可表示为

$$y = Hx_0 + Gb_0 + \varepsilon \tag{11}$$

式中, G 为单位矩阵, b_0 为系统误差向量, 此时方程可转化为

$$y = H'X_0 + \varepsilon \tag{12}$$

式中, $H' = [H \ G], X_0 = [x_0 \ b_0]^T$, 方程同样通过加权最小二乘迭代估计得到卫星状态及系统误差的估计。

4 测轨精度仿真分析

4.1 仿真条件

本文采用通过 Monte - Carlo 仿真方法, 开展对同步轨道卫星四站时差测轨进行仿真分析。通过卫星真实星历模拟计算真实时差测量数据, 然后对真实测量数据加入噪声方差为 3 m 即 10 ns 的高斯白噪声。3 m 的噪声方差代表了目前所能够达到的较好的时间同步精度和测量精度水平。将仿真数据进行统计定轨后得到卫星状态估计, 将其与真实星历进行比较后得到定轨误差。为比较定轨结果噪声方差分布, 将上述模拟过程进行 100 次 Monte - Carlo 仿真, 最后用 100 次 Monte - Carlo 定轨结果的统计方差评价定轨精度。100 次 Monte - Carlo 定轨结果已经能够基本反映统计定轨的误差方差分布。定轨算法采用迭代加权最小二乘统计定轨算法, 并忽略模型误差的影响。轨道计算、数据模拟及统计定轨算法均采用 C# 语言开发。仿真所用观测站主站位于华东地区, 其余 3 个副站分别位于东北、华北和华南地区。定轨弧长为 1 天, 测量间隔为 1 min。

4.2 无系统误差时的定轨精度

通过计算机 100 次 Monte - Carlo 仿真得到的位置误差和速度误差如图 3 所示, 图中直线对应定轨误差的统计方差。从图中可以看出, 当无系统误差时, 统计定轨位置误差约为 11 m, 速度误差约为 1 mm/s。图 4 给出了预报一周的位置和速度误差。从图中可以看出, 预报一周后, 位置误差约 100 m, 速度误差约 8 mm/s。以上仿真结果证明四站时差测轨可以获得较高的定轨精度和预报精度。

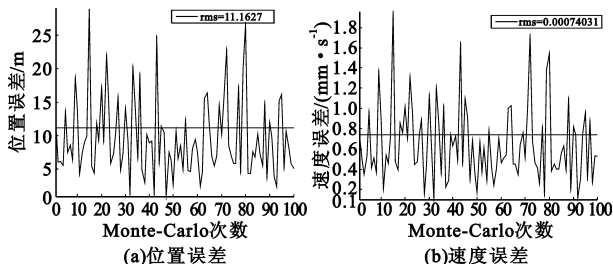


图 3 无系统误差时 100 次 Monte - Carlo 统计定轨误差
Fig.3 The accuracy of 100 times Monte - Carlo orbit determination without system error

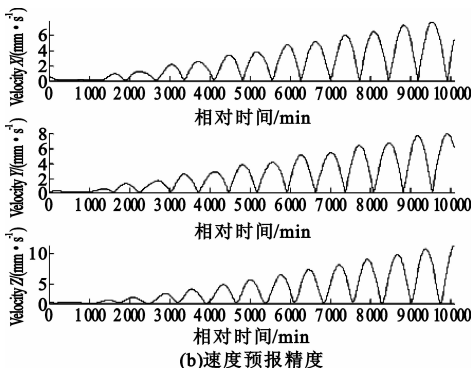
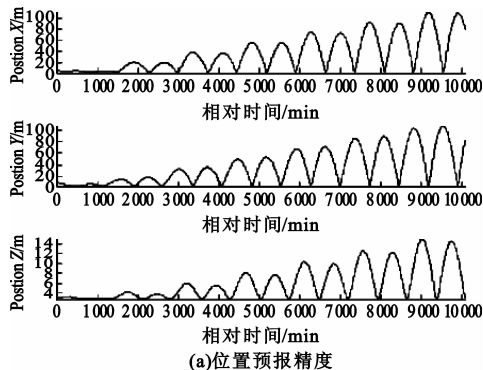


图 4 无系统误差时预报 1 周的误差
Fig.4 The accuracy of 1 - week prediction without system error

4.3 估计系统误差时的定轨精度

通过计算机 100 次 Monte - Carlo 仿真得到的状态误差和系统误差分别如图 5 和图 6 所示, 图中直线对应定轨误差的统计方差。图 7 为预报一周的位置和速度误差。

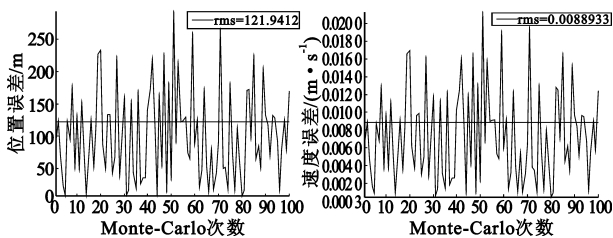


图 5 估计系统误差时 100 次 Monte - Carlo 定轨误差
Fig.5 The position accuracy of 100 times Monte - Carlo orbit determination with system - error estimated

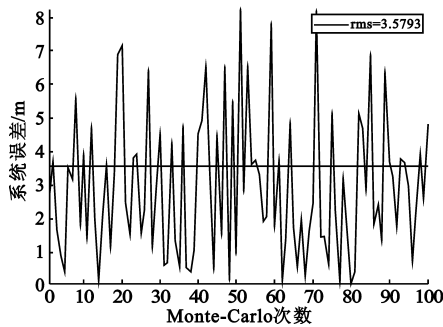


图 6 估计系统误差时 100 次 Monte - Carlo 定轨结果系统误差估计偏差
Fig.6 The system - error accuracy of 100 times Monte - Carlo orbit determination with system - error estimated

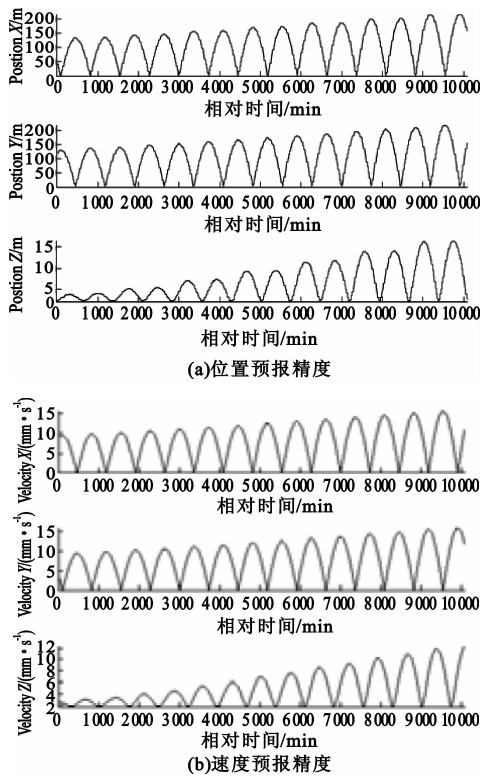


图 7 估计系统误差时预报 1 周的轨道误差
Fig.7 The orbit accuracy of 1 - week prediction with system - error estimated

从图中可以看出,当有系统误差时,可以通过自校准方法估计系统误差,系统误差估计精度约为 4 m/s。此时,统计定轨误差相对较大,位置误差约为 120 m,速度误差约为 9 mm/s,预报 1 周的位置误差约为 200 m,速度误差约为 15 mm/s。证明存在系统误差时,仍然可以获得较高的定轨精度和预报精度。

比较有系统误差和无系统误差时的定轨结果可知,测量系统应该尽可能地消除系统误差,以便进一步提高定轨精度。

5 结 论

本文介绍了基于同步卫星信号四站时差测量的无源测轨原理,给出了该系统的基本组成,提出了基于四站时差的同步卫星自校准定轨方法。通过 Monte - Carlo 仿真,重点对同步卫星的统计定轨精度进行了分析。仿真结果表明,当无系统误差时,统计定轨精度可达到 11 m,1 周的预报精度约为 100 m;当存在系统误差时,可通过自校准方法进行同步估计系统误差,此时定轨精度可达到 120 m,1 周的预报精度约为 200 m。

值得指出的是,四站时差测轨的站址布局对定轨精度影响较大,可视区内的不同卫星定轨精度可能存在较大差异,具体应用中要针对具体卫星和站址几何进行分析。有关站址几何对四站时差测轨精度影响的详细分析将另文讨论。

参考文献:

[1] 郭睿,刘雁语,谭红力,等. 基于自发自收测距的 GEO 卫星精密定轨[J]. 测绘科学技术学报,2009, 26(5): 333 - 336.
GUO Rui, LIU Yan - yu, TAN Hong - li, et al. Analysis Of GEO Satellite Precise Orbit Determination Based on Self - Sending and Self - Receiving Ranging Data[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2009, 26(5): 333 - 336. (in Chinese)
[2] 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,2008,38(12):1711 - 1722.
LI Zhi - gang, YANG Xu - hai, SHI Hu - li, et al. New Method of Satellite Orbit Survey with Transfer[J]. Scientia Sinica(Series G), 2008, 38(12): 1711 - 1722. (in Chinese)
[3] 李建军. 四星时差定位算法研究[J]. 电子对抗技术, 2004, 19(4): 3 - 6.
LI Jian - jun. Research of Location Algorithm on TDOA With Four Satellites[J]. Electronic Countermeasure Technology, 2004, 19(4): 3 - 6. (in Chinese)

- [4] 俞志强. 四站时差定位精度分析[J]. 空军雷达学院学报, 2010, 24(6): 400–402.
YU Zhi-qiang. Analysis of 4-Station TDOA Location Accuracy[J]. The Academic Journal of the College of Air Force, 2010, 24 (6): 400–402. (in Chinese)
- [5] 张政超, 童力. 四站时差无源定位精度分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(6): 582–585.
ZHANG Zheng-chao, TONG Li. Precision Analysis of Passive Location of 4-stations Based on TDOA[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2010, 5(6): 582–585. (in Chinese)
- [6] 俞志强, 王宏远, 武文. 四站时差定位布站研究[J]. 电子学报, 2005, 33(12A): 2308–2311.
YU Zhi-qiang, WANG Hong-yuan, WU Wen. 4-Station Disposition Research of Position Location Using TDOA[J]. ACTA Electronica Sinica, 2005, 33(12A): 2308–2311. (in Chinese)
- [7] 俞志强, 叶朝谋. 四站三维时差定位模糊分析[J]. 空军雷达学院学报, 2009, 23(5): 370–372.
YU Zhi-qiang, YE Chao-mou. Analysis of Ambiguity of 4-Station 3D TDOA Positioning[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2009, 23(5): 370–372. (in Chinese)
- [8] 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京: 解放军出版社, 1995.
LI Ji-sheng. The satellite precision orbit determination [M]. Beijing: PLA Press, 1995. (in Chinese)
- [9] 汤锡生, 陈贻迎, 朱民才. 载人飞船轨道确定和返回控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
TANG Xi-sheng, CHEN Yi-ying, ZHU Min-cai. Manned spacecraft orbit determination and return control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [10] 王威, 于志坚. 航天器轨道确定——模型与算法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
WANG Wei, YU Zhi-jian. Spacecraft Orbit Confirm: Modeling and Algorithm [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)

- [11] 周庆勇, 杜兰, 蓝朝桢. 基于高轨光学监视平台的定轨精度分析[J]. 光电工程, 2010, 37(9): 80–85.
ZHOU Qing-yong, DU Lan, LAN Chao-zhen. Analysis of the Orbit Determination Accuracy for Space Objects Based on High-Orbit Surveillance Platform[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(9): 80–85. (in Chinese)

作者简介:

彭华峰(1979—), 男, 湖南新化人, 2006 年于四川大学获硕士学位, 现为工程师、博士研究生, 主要研究方向为目标定位、跟踪和测轨等;

PENG Hua-feng was born in Xinhua, Hunan Province, in 1979. He received the M. S. degree from Sichuan University in 2006. He is now an engineer and currently working toward the Ph.D. degree. His research concerns target location, tracking and satellite orbit measurement.

Email: hualong913@sina.com

郑超(1980—), 男, 湖北宜都人, 2007 年于西南电子科技大学研究所获硕士学位, 现为工程师, 主要研究方向为信号处理、目标定位和卫星测轨等;

ZHENG Chao was born in Yidu, Hubei Province, in 1980. He received the M.S. degree from Southwest Electronics and Telecommunication Technology Research Institute in 2007. He is now an engineer. His research concerns signal processing, target location, and satellite orbit measurement.

Email: zhengchao_2@sina.com

张韬(1981—), 男, 四川巴中人, 2005 年于西南电子科技大学研究所获硕士学位, 现为工程师、博士研究生, 主要研究方向为信号处理和卫星测轨等。

ZHANG Tao was born in Bazhong, Sichuan Province, in 1979. He received the M. S. degree from Southwest Electronics and Telecommunication Technology Research Institute in 2005. He is now an engineer and currently working toward the Ph.D. degree. His research concerns signal processing and satellite orbit measurement.

Email: zt19810101@sina.cn