

顾及系统误差的 GEO 卫星几何法定轨 PDOP 值分析

贺凯飞¹, 徐天河^{2,3}

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079; 3. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对 GEO 卫星几何法定轨中系统误差对 PDOP 值的影响进行研究, 首先回顾了经典几何法定轨的基本原理, 然后根据顾及系统误差的几何法定轨原理推导出 PDOP 值计算公式, 并利用 5 个跟踪站的模拟数据, 计算了多种系统误差情况下 PDOP 值。结果表明: 系统误差对 GEO 卫星几何法定轨的 PDOP 值影响很大; 采用顾及系统误差的几何法定轨方法可以较好地削弱系统误差对 PDOP 值的影响; 国外布设跟踪站比仅在中国布设跟踪站能更好地削弱系统误差对 PDOP 值的影响。

关键词: GEO 卫星; 几何法定轨; 系统误差; PDOP; 跟踪站

中图分类号: P228.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)02-0211-04

Study on PDOP of Geometry Orbit Determination for GEO Satellite with Systematic Errors

HE Kai-fei¹, XU Tian-he^{2,3}

(1. School of Geology Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, Hubei, China;
3. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract Effect of systematic error on Position Dilution of Precision (PDOP) of geometry orbit determination for Geostationary Earth Orbit (GEO) satellite was discussed. Firstly, the fundamental principle of classical geometry orbit determination was reviewed; secondly, the formula calculating PDOP was deduced by the method of geometry orbit determination with systematic error; thirdly, PDOP with multi systematic errors was computed by simulated data from five tracking stations. The result showed that the influence of systematic errors on PDOP of geometry orbit determination for GEO satellite was significant; the influence could be efficiently weakened with the method of geometry orbit determination with systematic error; compared with the tracking stations selected only in China, overseas tracking stations selected could weaken the influence of systematic errors on PDOP more efficiently.

Key words: GEO satellite; geometry orbit determination; systematic error; PDOP; tracking station

0 引言

地球静止轨道 (Geostationary Earth Orbit, GEO) 卫星已广泛应用于通信、气象、侦察、导航定

位、精密授时、跟踪与数据中继以及科学研究等领域^[1]。中国新一代导航定位系统是由 5 颗 GEO 卫星、3 颗 IGSO 卫星以及 4 颗 MEO 卫星组成。这对 GEO 卫星轨道确定提出了更高的要求。目

收稿日期: 2009-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40604003); 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目 (2007B51); 中国博士后科学基金项目 (20080430148 200902444)

作者简介: 贺凯飞 (1982-), 男, 陕西咸阳人, 工学硕士研究生, 从事 GEO 卫星精密定轨理论与方法研究。E-mail: hekaifei1983@163.com

前, 确定导航卫星轨道的研究多为动力法, 几何法定轨方法的研究也多集中在中低轨卫星上^[1-10], 而对于 GEO 卫星几何法定轨方法的研究鲜有报道。GEO 卫星轨道计算和预报的难点是太阳光压摄动力和较为频繁的轨控姿控力的精确建模^[1-6], 而几何法定轨方法不受这类动力学模型的限制, 特别是在卫星机动和恢复期间仍能获取可靠轨道^[2]。因此, 对 GEO 卫星几何法定轨方法展开研究非常有必要。

卫星导航定位精度取决于等效测距误差的大小和精度因子(Dilution of Precision, DOP)值的大小^[3]。等效测距误差包括跟踪站钟差、卫星钟差、用户测距误差等; DOP 值作为常用的定位图形强度度量数值指标, 直接关系到导航定位的精度, 它反映的是卫星空间几何分布对定位精度影响。同理, GEO 卫星几何法定轨精度由测距误差的大小和位置精度衰减因子(Position Dilution of Precision, PDOP)决定。GEO 卫星几何法定轨的系统误差是影响定轨精度的主要因素^[1-2, 11-12], 探讨顾及系统误差的 PDOP 值变化对于提高 GEO 卫星的定轨精度具有重要意义。

1 经典几何法定轨的 PDOP 值

在经典几何法定轨中, 第 i 历元伪距观测值的误差方程可表示为

$$V_i = A_i X_i - L_i \quad (1)$$

式中: V_i 为第 i 历元观测值残差向量; A_i 为第 i 历元伪距对坐标分量的偏导数; X_i 为第 i 历元的卫星位置状态向量, $X_i = (x, y, z)$; L_i 为第 i 历元的观测值。

应用最小二乘平差原理可得到反映第 i 历元定位精度的未知参数 X_i 的协方差矩阵 $\bar{\Sigma}_{X_i}$ 为

$$\bar{\Sigma}_{X_i} = \sigma_0^2 \bar{Q}_{X_i} \quad (2)$$

$$\bar{Q}_{X_i} = (A_i^T P_i A_i)^{-1} \quad (3)$$

式中: σ_0 为单位权中误差, 为方便计算将其定义为 $\sigma_0 = 1$; \bar{Q}_{X_i} 为位置参数的协因数矩阵; P_i 为第 i 历元观测值的权矩阵。

可以得到衡量跟踪站空间分布对 GEO 卫星定轨精度影响的三维 PDOP 值的计算公式

$$P_{PDOPi} = \sqrt{q_{xxi} + q_{yyi} + q_{zzi}} \quad (4)$$

式中: P_{PDOPi} 为第 i 历元的 PDOP 值; q_{xxi} 、 q_{yyi} 、 q_{zzi} 为

\bar{Q}_{X_i} 的对角线元素。

2 顾及系统误差的几何法定轨的 PDOP 值

若伪距观测值中含有系统误差, 则第 i 历元的误差方程可表示为

$$V_i = A_i X_i + B_i Y - L_i \quad (5)$$

式中: B_i 为系统误差参数对应的系数矩阵; Y 为系统误差向量。

顾及系统误差的几何法定轨思想是利用整个弧段的观测值求得系统误差, 然后回代逐历元求取位置参数。这与含有系统误差的序贯导航解^[4]和基于双频相位观测值的非差几何法定轨处理模糊度参数^[5]的思想类似。采用该方法可得到第 i 历元未知参数的协方差矩阵 $\bar{\Sigma}_{X_i}$ 和协因数矩阵 \bar{Q}_{X_i} 为

$$\bar{\Sigma}_{X_i} = \sigma_0^2 \bar{Q}_{X_i} \quad (6)$$

$$\bar{Q}_{X_i} = Q_{X_i} + \Delta \bar{Q}_{X_i} \quad (7)$$

$$\Delta \bar{Q}_{X_i} = (Q_{X_i} A_i^T P_i B_i) \bar{Q}_Y (Q_{X_i} A_i^T P_i B_i)^T \quad (8)$$

$$\bar{Q}_Y = \left[\sum_{i=1}^n (B_i^T P_i B_i) - (B_i^T P_i A_i) \cdot (A_i^T P_i A_i)^{-1} (A_i^T P_i B_i) \right]^{-1} \quad (9)$$

式中: $\Delta \bar{Q}_{X_i}$ 、 \bar{Q}_Y 为中间变量。

由此可以得到第 i 历元的 PDOP 值计算公式

$$P_{PDOPi} = \sqrt{\bar{q}_{xxi} + \bar{q}_{yyi} + \bar{q}_{zzi}} \quad (10)$$

式中: \bar{q}_{xxi} 、 \bar{q}_{yyi} 、 \bar{q}_{zzi} 为 \bar{Q}_{X_i} 的对角线元素。

公式(7)的推导详见文献[2]。与经典几何法定轨的未知参数协因数矩阵 Q_{X_i} 相比, 该公式多了一项与系统误差参数有关系的影响量 $\Delta \bar{Q}_{X_i}$, 由于 $\Delta \bar{Q}_{X_i}$ 为正定矩阵, 因此矩阵的迹 $Tr(\bar{Q}_{X_i})$ 和 $Tr(Q_{X_i})$ 的关系为

$$Tr(\bar{Q}_{X_i}) > Tr(Q_{X_i}) \quad (11)$$

这表明, 一旦观测值中含有系统误差, PDOP 值都会放大。

3 算例分析

采用轨道高度为 4.2×10^4 km, 定点于 $110^\circ 5'E$ 赤道上空的 GEO 卫星, 地面跟踪网由西安、上海、长春、昆明、乌鲁木齐 5 个地面跟踪站组成。模拟 1

d 的伪距观测数据(除测距中误差和系统误差外, 不考虑其他误差), 数据采样率为 60 s。系统误差通常为常数、线性或二次多项式等^[2], 文中系统误差以二次多项式形式的卫星钟差和常数项形式的测站偏差为例。为了分析系统误差对 PDOP 值的影响, 分别采用 5 种方案进行计算, 计算出的 PDOP 值见表 1 和图 1~5。

表 1 不同方案 PDOP 值统计结果

Tab. 1 Statistical Result of PDOP in Different Schemes			
方案	均值	最小值	最大值
A	36.475	36.356	36.597
B	1 553.833	1 551.957	1 555.804
C	78.079	65.845	127.963
D	81.375	69.597	129.940
E	53.260	43.056	93.576

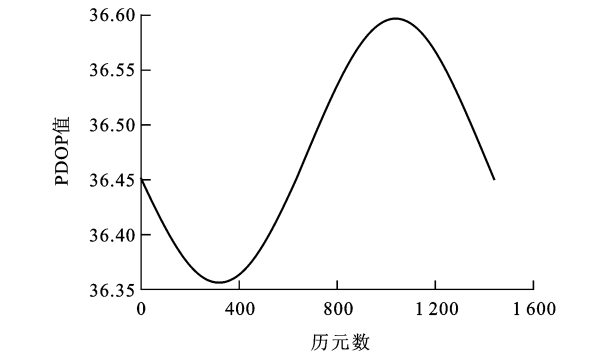


图 1 方案 A 的 PDOP 值
Fig. 1 PDOP of Scheme A

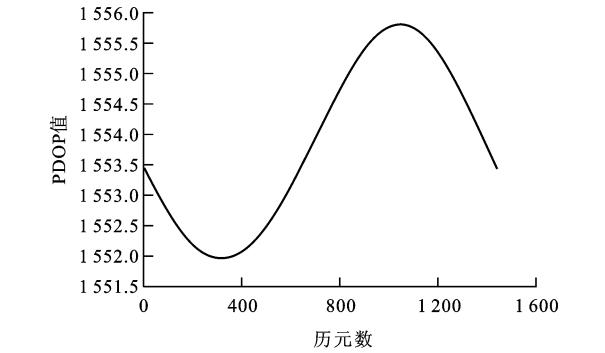


图 2 方案 B 的 PDOP 值
Fig. 2 PDOP of Scheme B

方案A: 无系统误差的经典几何法定轨的 PDOP 值。

方案 B: 有系统误差(如卫星钟差), 单历元解算卫星钟差经典几何法定轨的 PDOP 值。

方案 C: 误差同方案 B, 采用顾及系统误差几何

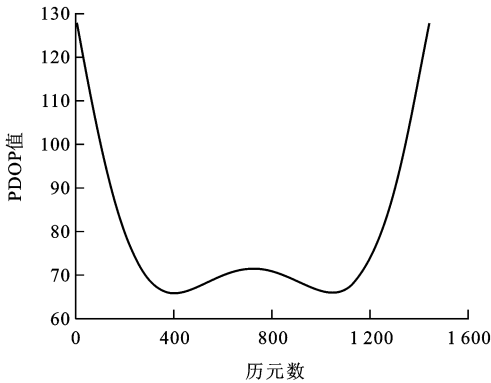


图 3 方案 C 的 PDOP 值
Fig. 3 PDOP of Scheme C

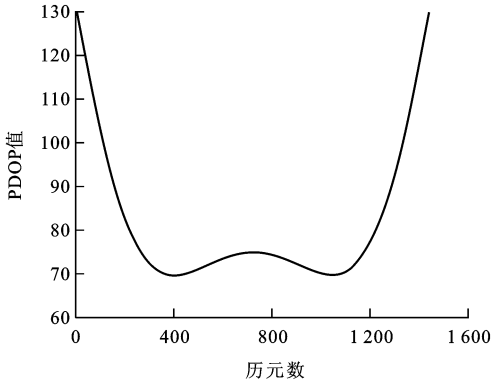


图 4 方案 D 的 PDOP 值
Fig. 4 PDOP of Scheme D

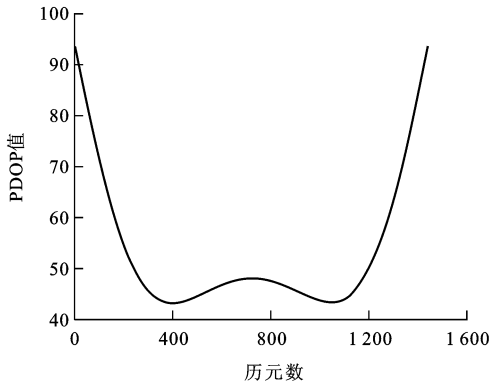


图 5 方案 E 的 PDOP 值
Fig. 5 PDOP of Scheme E

法定轨的 PDOP 值。

方案 D: 误差同方案 B, 并加入 1 个跟踪站偏差, 采用顾及系统误差几何法定轨的 PDOP 值。

方案 E: 误差同方案 B, 测距跟踪网选用中国的 WUHN 站、澳大利亚的 TOWN 站和 YAR2 站、印度的 HYDE 站、日本的 AIRA 站共 5 个跟踪站组成, 采用顾及系统的几何法定轨 PDOP 值。

从上述结果可以看出:

(1)在无系统误差的情况下,利用中国 5 个跟踪站,用经典几何法对 GEO 卫星定轨时,得到的 PDOP 值在 36.475 附近。

(2)基于单历元估计卫星钟差参数几何法定轨的 PDOP 值急剧增大至 1 553 左右,由此可知定轨结果的不稳定,严重偏离真值。这是因为中国处于北半球中纬度地区,基于区域跟踪的 GEO 卫星定轨几何结构较差且历元间相关性较强,单历元同时解算卫星轨道和系统误差如卫星钟差,方程的病态性会急剧加重,因此在含有系统误差时不宜使用该方法。

(3)顾及系统误差几何法定轨的 PDOP 值在 65.845 和 127.963 之间,均值为 78.097,且随时间变化明显。与方案 B 相比该方法能有效削弱系统误差的影响,但仍存在残余的系统误差影响。

(4)系统误差中再加入 1 个跟踪站偏差后,顾及系统误差几何法定轨的 PDOP 值在 69.597 和 129.940 之间,均值为 81.375。这说明当系统误差为 1 个跟踪站偏差和卫星钟差时,系统误差的影响仍然可以被削弱,但加入跟踪站偏差后 PDOP 值有所增大。

(5)与方案 C 相比,采用国外布设跟踪站的顾及系统误差的几何法定轨 PDOP 值在 43.056 和 93.576 之间,均值为 53.240,比仅在中国布设跟踪站的 PDOP 值小。这是由于国外布设跟踪站对卫星观测的几何结构比仅在中国好。今后可以考虑在外国增加跟踪站。

4 结语

主要分析了 GEO 卫星的经典几何法定轨和顾

及系统误差几何法定轨中系统误差对 PDOP 值的影响情况。通过 5 个跟踪站的模拟数据计算,分析结果表明,系统误差对 GEO 卫星经典几何法定轨的 PDOP 值影响较大;顾及系统误差几何法定轨可以较好削弱系统误差对 PDOP 值的影响,但不能彻底消除;当系统误差除卫星钟差外还有 1 个跟踪站偏差时,系统误差可以得到有效消除;国外布设跟踪站比仅在中国布设跟踪站能更好地削弱系统误差的影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 徐天河, 贺凯飞. 顾及系统误差的 GEO 卫星几何法定轨[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(1): 64-69.
- [3] 李 卓, 马林立. 基于 PDOP 加权的模糊卡尔曼滤波在 GLONASS 单点定位中的应用[J]. 导航, 2004(2): 39-46.
- [4] 杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京: 测绘出版社, 2006.
- [5] 韩保民. 基于星载 GPS 的低轨卫星几何法定轨理论研究[R]. 西安: 西安测绘研究所, 2008.
- [6] 胡国荣, 欧吉坤. 星载 GPS 低轨卫星几何法精密定轨研究[J]. 空间科学学报, 2000, 20(1): 32-39.
- [7] 蒋 虎, 李国通, 余金培. GALILEO 卫星导航和定位系统 PDOP 仿真[J]. 天文研究与技术, 2006, 3(3): 258-263.
- [8] 丛 丽. Abidat A 1 谈展中, 卫星导航几何因子的分析和仿真[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2204-2208.
- [9] 张双成, 高为广. 基于系统误差及其协方差阵拟合的抗差自适应滤波[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(2): 60-62.
- [10] 田晓振, 陈正阳, 李 旋, 等. Galileo 系统卫星可见性和 DOP 值分析[J]. 测绘工程, 2007, 16(4): 30-32.
- [11] 贺凯飞, 徐天河. 基于 Kalman 滤波的 GEO 卫星运动学定轨[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(6): 109-112.
- [12] 贺凯飞, 徐天河. 顾及系统误差的地球静止轨道卫星 PDOP 值加权几何法定轨[J]. 海洋测绘, 2009, 29(5): 1-4.

《地球科学与环境学报》被美国《地质参考》数据库收录

据中国高等学校自然科学学报研究会对外联络委员会消息,《地球科学与环境学报》已被美国《地质参考》(GR)数据库收录。截至 2007 年,该数据库收录本刊文献总共 221 篇。美国《地质参考》(GR)数据库是美国地质学会于 1966 年创办的,是世界范围内地球科学领域最全面的数据库,包含了超过 2 400 000 条来自于地球科学领域的期刊文献、书籍、地图、会议文献、报告及论文的记录。目前,该数据库收录中国期刊 64 种。