

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.02.07

星基增强系统 10 参数广播星历拟合分析

陆 畅^{1,2}, 胡小工¹, 周善石¹, 唐成盼¹, 董文丽¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为满足多种卫星轨道的应用需求, 在星基增强系统新增的 L5 信号接口中重新设计了一种 10 参数星历模型。使用 2016 年北斗卫星系统地球同步轨道卫星、倾斜地球同步轨道卫星和中地球轨道卫星的精密轨道数据, 在内符合精度、拟合成功率以及运算速度等方面, 分别评估了 10 参数星历模型在这些卫星轨道上的拟合效果。试验结果表明, 10 参数星历模型可以保证 10^{-3} cm 左右的内符合精度。但地球同步轨道卫星和倾斜地球同步轨道卫星的拟合成功率分别为 89.36% 和 99.17%。尝试去除 i_{dot} 参数以解决拟合失败的问题, 结果表明, 该处理可以实现 100% 的拟合成功率, 但拟合误差有所上升, 且对不同的轨道类型, 拟合运算速度有不同程度的提升或下降。

关键词: 星基增强系统; 星历拟合; L5 信号, 全球导航卫星系统

中图分类号: P135 **文献标识码:** A

1 引 言

广播星历是卫星导航系统中不可缺少的重要信息。通过对卫星在轨运动的近似描述, 人们可利用参数模型给导航定位服务提供所需的卫星位置信息。目前广播星历参数模型主要有美国全球定位系统 (global positioning system, GPS) 采用的基于开普勒根数的广播星历模型和俄罗斯全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GLONASS) 使用的基于卫星位置、速度和加速度的参数模型^[1]。GPS 广播星历模型又分为较早的 16 参数模型和后来新增的 18 参数模型^[2]。各种广播星历模型在精度、可靠性和拟合效率等方面均有所不同。基于不同的应用场景, 应选取合适的广播星历模型, 以满足时效性和模型精度的需求。

星基增强系统 (satellite-based augmentation system, SBAS) 作为对全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 的补充与改进, 能够有效地提高系统服务精度、可用性、完好性和连续性。目前星基增强系统的星历模型采用的是与 GLONASS 系统类似的卫星位置、速度和加速度模型。随着 SBAS 的发展, 未来用于播发增强信号的卫星将不再

收稿日期: 2017-09-12; 修回日期: 2017-11-03

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0501900)

通讯作者: 陆畅, lc@shao.ac.cn

局限于以往的地球同步轨道 (geosynchronous orbit, GEO) 卫星。这就要求星历参数模型能够满足准确描述诸如高椭圆轨道 (highly elliptical orbit, HEO)、倾斜地球同步轨道 (inclined geosynchronous satellite orbit, IGSO)、中地球轨道 (medium earth orbit, MEO) 及近地轨道 (low earth orbit, LEO) 等多种轨道的卫星位置的需求。因此, 星基增强系统在新增的 L5 信号接口中重新设计了增强卫星的星历格式, 简化了 GPS 所采用的基于开普勒根数的 16 参数模型, 选取其中 10 个参数, 组成了星基增强系统 10 参数星历模型。

在此之前, GPS 广播星历 16 参数模型的算法及应用性能等方面已有大量研究。黄勇等人^[3]分析了应用 16 参数模型的 GEO, IGSO 和 MEO 三种不同类型卫星轨道的星历拟合精度; 何峰等人^[4]设计了多种抑制 GEO 卫星星历参数超限的方法; 阮仁桂等人^[5]和陈刘成等人^[6]通过坐标面旋转方法解决了 GEO 卫星小倾角奇点问题; 黄华^[7]通过采用第一类无奇点根数的方法解决了小偏心率奇点问题; 张中凯等人^[8]基于第二类无奇点根数, 改造了标准 16 参数星历模型, 同时解决了小偏心率和小倾角奇点问题。但是, 针对星基增强系统新增的 10 参数星历模型的分析相对较少。斯坦福大学 Reid 等人^[9,10]利用模拟轨道分析了在多种轨道类型上应用 10 参数星历模型的效果; 何峰等人^[11]从参数动力学含义和拟合精度等方面考察了不同弧长条件下 10 参数与 16 参数模型的差异。

本文对星基增强系统新增的 10 参数星历模型进行了拟合试验, 采用 GEO, IGSO 和 MEO 三种不同类型的实际卫星轨道数据, 分别分析了该模型在三条试验轨道上的拟合精度和拟合效率。此外, 还针对拟合中出现拟合失败的现象, 给出了可行的解决方法, 有效地评估了模型特性, 并为 10 参数星历模型的广泛应用提供了参考。

2 10 参数星历模型介绍

10 参数星历模型是针对已用于或将要被用于 GNSS 和 SBAS 系统的多种轨道类型, 包括 HEO, GEO, IGSO, MEO 和 LEO 等而设计的, 其 10 个参数选自原有的 GPS 广播星历的 16 个参数, 它们分别如表 1 所示^[12]。

表 1 10 参数星历模型的参数

参数	定义	参数	定义
t_{oe}	参考历元	i_0/rad	t_{oe} 时刻轨道倾角
a/m	轨道半长径	$i_{dot}/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	轨道倾角变化率
e	轨道偏心率	Ω_0/rad	t_{oe} 时刻升交点经度
M_0/rad	t_{oe} 时刻平近点角	C_{uc}/rad	纬度幅角的余弦修正值
ω/rad	近地点角距	C_{us}/rad	纬度幅角的正弦修正值

16 参数星历模型中, 除了 6 个轨道参数和 1 个参考历元以外, 其余 9 个摄动参数分为 6 个短周期调和改正项振幅, 以及 3 个长期和长周期项, 其中短周期项描述了径向距离 r 、迹向幅角 u 和轨道倾角 i 的变化, 长期和长周期项中平均角速度改正值 Δn 对迹向幅角进行了

修正, $i_{\dot{\text{dot}}}$ 和升交点经度变化率 $\dot{\Omega}$ 对轨道面摆动进行了修正。由于 SBAS 要求 10 参数星历模型最大更新间隔为 120 s, 因此, 在弧段较短的情况下, 径向变化可以忽略。在短周期变化中, 迹向幅角的变化最大; 长期项中轨道倾角的摆动对轨道面影响最大。因此, 保留 16 参数星历模型 9 个摄动参数中的轨道倾角变化率 $i_{\dot{\text{dot}}}$, 以及纬度幅角修正值 C_{uc} 和 C_{us} , 即可对短弧段情况的卫星轨道摄动进行修正。

3 拟合分析

本文选取北斗系统 1 号星、8 号星和 14 号星 (分别代表 GEO, IGSO 和 MEO) 实际的精密轨道数据进行 10 参数星历模型的拟合。SBAS 要求 10 参数模型的最大更新间隔为 120 s^[12], 而北斗精密轨道数据是每 5 min 才有 1 个数据点, 故采用切比雪夫多项式对精密轨道数据进行采样间隔为 1 s 的插值。每 120 个插值点组成弧长 120 s 的数据, 以用于拟合。数据总长度为 2016 年 1 月 1 日—2017 年 1 月 2 日, 共计 368 d。拟合内符合精度计算公式为:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_1^{120} (\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2)}{120}}, \quad (1)$$

其中 Δ 为三维拟合误差, ΔX , ΔY , ΔZ 分别为拟合轨道与数值轨道在 X , Y , Z 方向上的偏差。

由于使用开普勒根数表达卫星轨道时存在小倾角和小偏心率两个奇点问题, 这会造成拟合误差增大, 甚至拟合失败的情况, 故在拟合迭代过程中使用第一类无奇点根数代替开普勒根数, 以解决小偏心率问题, 具体计算公式为^[7]:

$$\begin{cases} \xi = e \cos \omega \\ \eta = e \sin \omega \\ \lambda = \omega + M \end{cases}, \quad (2)$$

其中, M 为平近点角, ξ , η 和 λ 为所使用的 3 个无奇点根数。

而对于小倾角问题, 目前主要使用坐标面旋转法来解决, 这需要用户对算法作出相应调整。但 SBAS L5 接口文件中所给出的用户算法并没有对坐标面进行旋转的处理, 所以在本文的拟合计算中没有对小倾角问题进行特殊处理。下面对 10 参数星历模型拟合结果进行分析。

图 1 为 10 参数星历模型的拟合成功率示意图, 其中蓝色点表示拟合成功的历元, 红色圆圈表示拟合失败的历元。表 2 列出拟合结果的统计。

由图 1 和表 2 可以看出, 1 号星和 8 号星存在大量拟合失败的情况, 且其分布存在约 12 h 的周期性。通过统计发生拟合失败弧段的数量可知, 对于 1 号星, 每个轨道周期内平均有 76 次拟合失败, 平均大约每 2.5 h 的弧段发生一次拟合失败的情况; 对于 8 号星, 每个轨道周期内平均有 6 次拟合失败, 平均大约每 12 min 的弧段发生一次拟合失败的情况。

14 号星在 2016 年全年仅有两次拟合失败的情况。虽然其情况比 1 号星和 8 号星要改善很多, 但也说明在所考察的 GEO, IGSO 和 MEO 轨道上, 10 参数星历模型均有拟合失败的

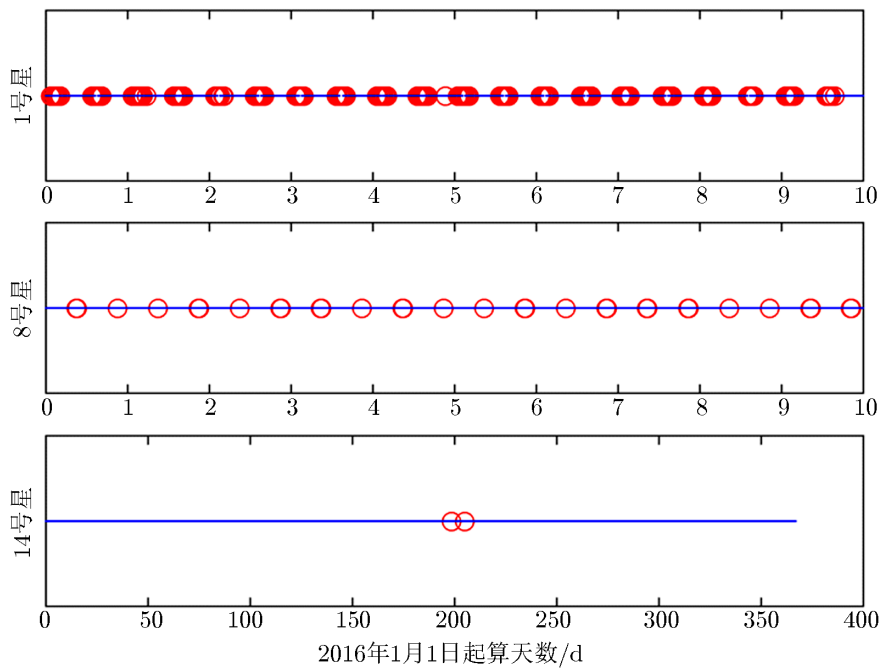


图 1 10 参数星历模型拟合成功率示意图

表 2 拟合结果统计

卫星	总历元数	拟合失败历元数	轨道周期内拟合失败次数
1 号星	265 682	28 265	76.598
8 号星	264 962	2 199	5.975
14 号星	264 242	2	0.002 93

可能性。

图 2 为误差分布情况的百分比示意图。图中数据点为拟合误差小于某值的历元数占总历元数的百分比。由于拟合误差的最大值与最小值相差较大，为了更清楚地表示曲线的走势，纵轴采用以厘米为单位的误差的对数值。可以发现，虽然 1 号星和 8 号星有很多拟合失败的情况，但对于 90% 以上拟合成功的数据来说，1 号星和 8 号星的拟合误差比 14 号星低 1 个量级左右，达到 10^{-3} cm。但 1 号星和 8 号星拟合误差的波动很大，少数历元中甚至达到 1 cm 量级。而 14 号星拟合误差最大值约为 10^{-1} cm 量级，波动较小。拟合误差大幅波动的情况说明 10 参数模型的拟合稳定性较差。

虽然这几颗卫星都存在拟合异常的可能性，但在拟合成功的情况下，拟合误差总体上能保证 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm 量级，最好的情况能达到 10^{-4} cm。若能够针对拟合中出现的异常情况进行一些处理，改善参数拟合过程，部分消除乃至完全规避拟合失败的情况，则 10 参数星历模型是能够正确描述卫星在轨运动的。

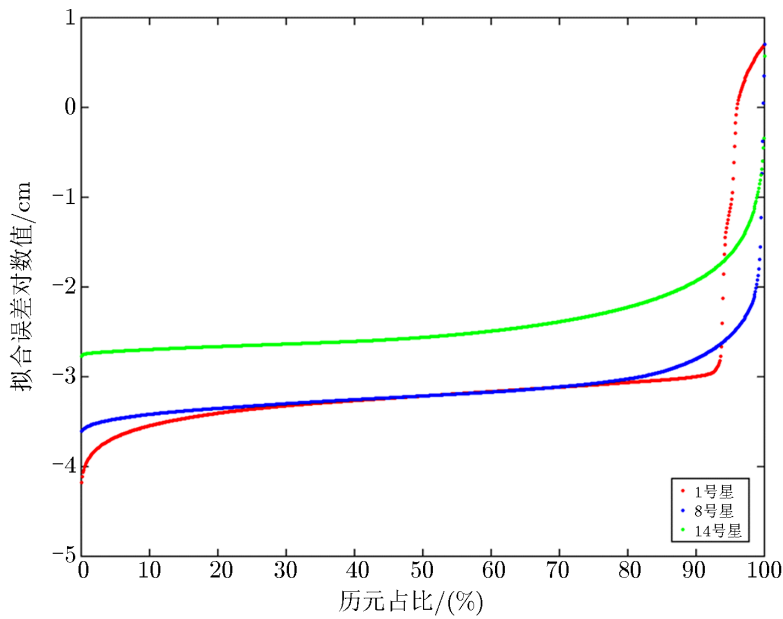


图 2 误差分布的百分比示意图

4 去除 i_{dot} 参数对拟合的影响

通过查阅文献及大量试算, 我们发现, 若在拟合中剔除 i_{dot} 参数, 即仅拟合除 i_{dot} 以外的 9 个参数, 可以提高拟合的稳定性^[9]。下面对此方法进行详细介绍。

经统计, 在所有历元的 10 参数星历模型拟合中均剔除 i_{dot} 参数后, 未出现拟合失败的情况 (见表 3)。

表 3 无 i_{dot} 的拟合结果统计

卫星号	总历元数	拟合失败历元数
1 号星	265 682	0
8 号星	264 962	0
14 号星	264 242	0

图 3 为去除 i_{dot} 参数后拟合误差分布的百分比示意图。由图上能够明显地看出, 去除 i_{dot} 参数后的拟合稳定性有显著提升。三条曲线变化趋势较为平稳, 拟合误差均集中在某一水平线上下, 与图 2 的曲线相比已不存在陡变的情况。但与完整的 10 参数拟合相比, 拟合误差上升了 2~3 个量级, 除 1 号星总体保持在 10^{-1} cm 量级以外, 8 号星和 14 号星的拟合误差均为 1 cm 量级。由此可见, 去除 i_{dot} 参数后, 拟合稳定性有了提升, 但拟合精度有所下降。

此外, 运算速度也是拟合算法的一个重要的性能特性。我们比较了有和无 i_{dot} 参与拟合

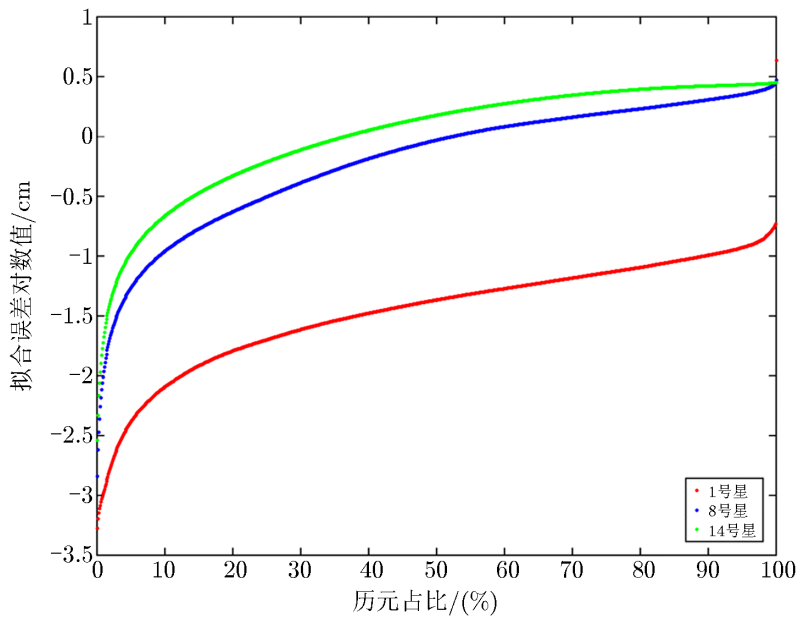


图 3 去除 i_{dot} 参数后拟合误差百分比示意图

对拟合算法运算速度的影响。这里使用平均每一历元的迭代次数用于统计。从表 4 可以看出，去除 i_{dot} 参数后，1 号星的拟合次数明显下降，而 8 号星和 14 号星拟合次数有所上升，因此，1 号星的拟合运算速度变为原来的 3 倍，8 号星和 14 号星的拟合运算速度分别为原来的 $1/4$ 和 $1/2$ 。

表 4 平均拟合迭代次数比较

	有 i_{dot} 的拟合次数	无 i_{dot} 的拟合次数
1 号星	25.25	8.11
8 号星	11.67	42.55
14 号星	8.48	17.27

综合上述 3 种卫星轨道类型的拟合情况，去除 i_{dot} 参数后的星历拟合有着很高的稳定性，没有出现拟合失败的情况。但与完整的 10 参数拟合相比，精度下降了 2~3 个量级。对于 GEO 轨道，去除 i_{dot} 参数可以极大地提升拟合运算速度；而对于 IGSO 和 MEO 轨道，拟合运算速度有所降低。

5 结 论

本文使用北斗系统 GEO, IGSO 和 MEO 卫星的实际精密轨道数据，对星基增强系统新增的 10 参数星历模型进行拟合试验。结果表明，10 参数模型总体拟合精度可达 10^{-3} cm，

但拟合稳定性较差, 拟合成功率较低, 且拟合误差波动很大。

从 10 参数模型中剔除 i_{dot} 参数再进行拟合是一种有效的处理方法。在去除 i_{dot} 参数后, 3 条实验轨道上的拟合稳定性有明显提升, 在所有历元均拟合成功。对于 GEO, 拟合程序的运算速度也得到明显提升, 拟合误差小于 10^{-1} cm 量级; 对于 IGSO 和 MEO, 则存在拟合精度和运算速度上的损失, 拟合误差约为 1 cm 量级, 运算速度大幅降低。本文建议, 针对 10 参数模型拟合中可能出现的拟合失败的情况, 可以尝试采用无 i_{dot} 参数拟合, 以避免拟合失败。

致谢

非常感谢审稿人提出的许多重要建议。审稿人耐心而认真的指导是本文质量得到提升的关键, 对我们今后的研究工作也很有帮助。也非常感谢《天文学进展》期刊编辑在论文审稿和接收过程中的细致工作。

参考文献:

- [1] 胡松杰. 飞行器测控学报, 2005, 24(3): 37
- [2] 崔先强, 焦文海, 贾小林, 等. 空间科学学报, 2006, 26(5): 382
- [3] 黄勇, 胡小工, 王小亚, 等. 天文学进展, 2006, 24(1): 81
- [4] 何峰, 王刚, 刘利, 等. 测绘学报, 2011, 40(s1): 52
- [5] 阮仁桂, 贾小林, 吴显兵, 等. 测绘学报, 2011, 40(s1): 149
- [6] 陈刘成, 韩春好, 陈金平. 测绘科学, 2007, 32(3): 12
- [7] 黄华. 博士论文. 南京: 南京大学, 2012: 66
- [8] 张中凯, 杜兰, 刘利, 等. 测绘学报, 2014, 43(5): 452
- [9] Reid T, Walter T, Enge P. Proceedings ION GNSS 2013. Nashville, TN: Institute of Navigation, 2013: 825
- [10] Reid T, Walter T, Enge P, et al. GPS Solut, 2016, 20: 737
- [11] 何峰, 胡小工, 常志巧, 等. 测绘科学, 2017, 42(6): 13
- [12] Satellite Based Augmentation System Interoperability Working Group. SBAS L5 DFMC Interface Control Document. Issue 1, Rev 3. Dakar: SBAS IWG, 2016: 35

Analysis in Fitting SBAS 10-Parameter Broadcast Ephemeris Model

LU Chang^{1,2}, HU Xiao-gong¹, ZHOU Shan-shi¹, TANG Cheng-pan¹, DONG Wen-li¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: SBAS designed a new 10-parameter ephemeris model, which would be broadcast on the new SBAS signal at L5. The model was a subset of GPS 16-parameter ephemeris

model, which was based on an augmented set of Kepler orbital elements. The purpose of this model was to support the wide range of orbit classes being considered for SBAS, such as MEO and IGSO. Based on a year of Beidou GEO, IGSO and MEO satellite precise orbit data, this paper evaluated the new SBAS ephemeris model in terms of the fitting accuracy and failure rate, as well as the computational effort. To avoid fitting failure, this paper tried a method which was to exclude the IDOT term in the model fitting. The conclusion was that SBAS 10-parameter ephemeris model can achieve a 10^{-3} cm fitting accuracy on average. Excluding the IDOT term was effective to avoid failure in some circumstances during the calculation. Fitting without the IDOT term can avoid fitting failure, but in the cost of decreasing the accuracy to about 10^{-1} cm to 1 cm. Moreover, for different classes of orbit, the computational effort has different degree of increasing or decreasing after excluding the IDOT term.

Key words: satellite-based augmentation system; ephemeris fitting; signal L5; global navigation satellite system