

文章编号: 1001-1595(2011)S-0052-07

# 地球静止轨道卫星广播星历参数拟合与试验分析

何 峰<sup>1,2</sup>, 王 刚<sup>1</sup>, 刘 利<sup>1</sup>, 陈刘成<sup>1</sup>, 胡小工<sup>2</sup>, 黄 勇<sup>2</sup>, 宋叶志<sup>2</sup>, 阮仁桂<sup>3</sup>

1. 北京环球信息应用开发中心, 北京 100094; 2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 3. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054

## Ephemeris Fitting and Experiments Analysis of GEO Satellite

HE Feng<sup>1,2</sup>, WANG Gang<sup>1</sup>, LIU Li<sup>1</sup>, CHEN Liucheng<sup>1</sup>, HU Xiaogong<sup>2</sup>, HUANG Yong<sup>2</sup>, SONG Yezhi<sup>2</sup>, RUAN Rengui<sup>3</sup>

1. Beijing Global Information Application and Development Center, Beijing 100094, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

Abstract: The phenomenon and regulation of parameter's exceeding limitation in the operation of system are introduced, and then the reasons are illustrated according to the ill-conditioned equation and the orbital characteristics, some fitting algorithms are designed on the condition of avoiding accuracy losing, and the experiments are carried out with the actual observation data. The results show that it is efficient to eliminate the parameter exceeding for the method of fixing one parameter while computing the others or the method of parameter ridge estimate.

Key words: GEO; ephemeris fitting; correlation; ridge estimate

摘 要: 介绍 GEO 卫星广播星历参数超限的现象和规律, 根据解算方程病态性和轨道动力学特性分析该参数超限的原因, 设计在不显著损失精度前提下多种改善参数超限的拟合方案, 利用实测数据进行试验。结果表明: 固定超限参数的同时解算其余星历参数和进行参数岭估计的方法, 都能够有效地抑制并解决参数超限问题。

关键词: 地球静止轨道; 星历拟合; 相关性; 岭估计

中图分类号: P 135 文献标识码: A

## 1 引 言

广播星历参数是卫星导航电文的主要内容之一, 它的选择和设计不仅决定了广播星历所能达到的精度, 而且还决定了用户算法的复杂程度。广播星历参数的选择和设计, 以及精度和外推能力是影响导航系统可靠性和地面控制复杂程度的重要因素。广播星历是对精密星历的近似或逼近, 一般可通过近似的分析解或者数值拟合得到, 它的精度除受精密星历本身的精度制约外, 在很大程度上和广播星历参数的选择, 采用的导航参数设计算法以及用户算法的精度有关。现有的卫星导航系统中, GPS 和 GLONASS 采用不同的参数表达形式<sup>[1]</sup>, 两种星历参数表达方式的特点如表 1 所示。

我国的区域卫星导航系统 Compass 向用户发布的导航电文采用了与 GPS 相同的参数化方案。其中, 广播星历利用考虑一阶摄动影响的 15 个轨道根数描述卫星轨道, 同时利用二阶多项式的 3 个参数描述卫星的钟差预报。与 GPS 系统采用全星座 MEO 卫星不同, Compass 系统采用 GEO+ISGO+MEO 三种卫星的混合星座, 其中 GEO 卫星在轨

道特性方面具有高轨道、小倾角的特点, 与 MEO 卫星相比存在较大差异, 因此沿用 GPS 的广播星历参数描述 GEO 卫星存在潜在的不适应性。

表 1 GPS 和 GLONASS 的广播星历参数和性能特点  
Tab. 1 Ephemeris characteristics of GPS and GLONASS

	GPS	GLONASS
轨道参数	$t_e, \sqrt{a}, e, i, \Omega, \omega, M$	$t_b, x_n(t_b), y_n(t_b), z_n(t_b), x_n(t_b), y_n(t_b), z_n(t_b)$
摄动参数	$\Delta n, \Omega, di/dt$ $C_{is}, C_{ie}, C_{is}, C_{ie}, C_{is}, C_{ie}$	$\dots, x_n(t_b), y_n(t_b), z_n(t_b)$
坐标系	WGS-84	PZ-90
更新频率	1 h	15 min
外推能力	$\geq 2$ h, 跟用于拟合的数 据弧段长度有关	30 min
精度	约 20 m, 其中径向约 2 m	径向 5 m、沿迹 20 m 和法向 10 m

针对导航广播星历拟合计算方法, 已有大量的研究工作, 包括广播星历用户算法的有效性、参数估计方法和高轨小倾角卫星拟合算法等<sup>[2-5]</sup>, 这些算法解决了不同类型卫星星历拟合的成功率和拟合精度问题。然而, 实际系统组网运行过程中发现在克服精度损失问题后, 在特定时段, GEO

广播星历部分参数在编码导航电文时超过了系统设计分配给该参数的比特位限制,即参数超限。在同样的算法条件下,IGSO卫星未发现星历超限现象。针对上述问题,首先介绍不同类型卫星进行星历参数拟合过程中超限参数 $\Delta n$ 的变化规律,详细分析GEO卫星星历拟合中参数超过接口范围的数学和动力学原因,设计了抑制 $\Delta n$ 超限的算法,并通过实测数据对算法有效性进行验证,解决星历参数超限问题。

## 2 星历拟合中参数变化特性与原因分析

### 2.1 参数变化特性分析

卫星广播星历15个参数中, $\Delta n$ 主要描述卫星轨道运动平均角速度的修正项。为了分析参数 $\Delta n$ 的变化特性,分别利用不同轨位的在轨卫星2010年6月、10月和12月中实际测定轨数据对星历参数进行拟合,得到参数 $\Delta n$ 的变化曲线如图1~图4所示(图1~图3中横线为接口设定门限)。

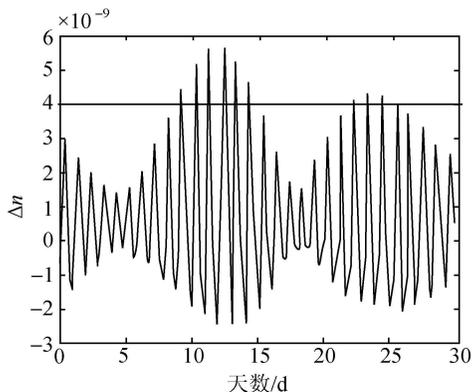


图1 2010-06月GEO-A拟合 $\Delta n$ 曲线

Fig. 1  $\Delta n$  fitting result of GEO-A in 2010-06

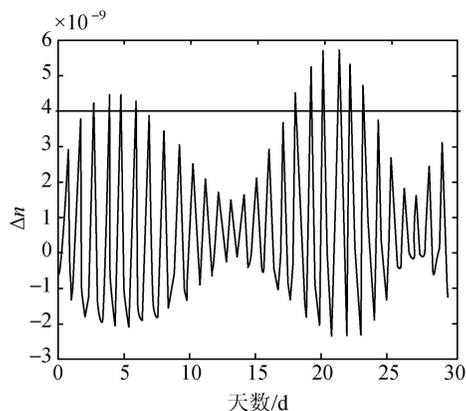


图2 2010-12月GEO-A拟合 $\Delta n$ 曲线

Fig. 2  $\Delta n$  fitting result of GEO-A in 2010-12

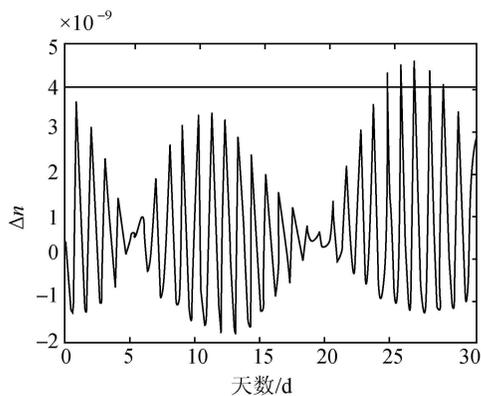


图3 2010-10月GEO-B拟合 $\Delta n$ 曲线

Fig. 3  $\Delta n$  fitting result of GEO-B in 2010-10

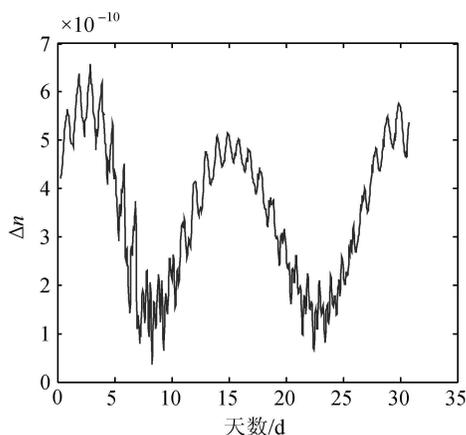


图4 2010-10月IGSO-A拟合 $\Delta n$ 曲线

Fig. 4  $\Delta n$  fitting result of IGSO-A in 2010-10

从不同卫星星历拟合参数一个月中 $\Delta n$ 长期变化曲线来看, $\Delta n$ 值存在在以1 d为周期的变化,每日峰值则存在约15 d为周期的近似正弦变化,峰值超过接口规定范围的时段,即出现参数超限现象。从图中结果可以看出,对于GEO-A卫星,6月和12月均存在两个阶段 $\Delta n$ 值达到峰值并超过接口规定范围,GEO-B卫星也有相似现象,而IGSO-A卫星则未发现星历参数超限现象,经计算发现其余月份也有类似结果。

### 2.2 参数相关性分析

GEO卫星存在高轨道、小倾角等特点,星历拟合中尽管采用了参考坐标面小角度旋转的策略,保证拟合的成功率<sup>[4-5]</sup>,但仍然无法从根本上完全避免拟合方程的病态性。为了验证实测数据条件下方程的病态程度,采用2010年6月和10月不同卫星实际定轨数据对星历参数间的相关性进行分析。不同类型卫星拟合时,参数 $\Delta n$ 与其

余 14 参数相关性如表 2 所示。

表 2 GEO-A 卫星拟合时  $\Delta n$  与其余 14 个参数的相关系数表

Tab. 2 Correlation coefficient between  $\Delta n$  and others of GEO-A

第一组	第二组	第三组	参数
1	1	1	$\Delta n$
<b>0.999 9</b>	<b>0.999 9</b>	<b>0.999 9</b>	$\Omega$
<b>0.392 2</b>	<b>0.790 6</b>	<b>0.948 6</b>	$di/dt$
0.023 0	0.036 4	0.031 1	$C_{ie}$
0.009 1	0.019 2	0.025 1	$C_{is}$
0.011 4	0.009 2	0.021 2	$C_{re}$
0.024 7	0.022 1	0.018 8	$C_{rs}$
<b>0.999 5</b>	<b>0.999 1</b>	<b>0.996 9</b>	$C_{ic}$
<b>0.380 7</b>	<b>0.782 7</b>	<b>0.951 3</b>	$C_{is}$
0.022 2	0.007 4	0.019 7	$\sqrt{a}$
0.020 1	0.002 9	0.020 2	$e$
<b>0.999 9</b>	<b>0.999 9</b>	<b>0.999 9</b>	$i$
<b>0.999 9</b>	<b>0.999 9</b>	<b>0.999 9</b>	$\Omega$
0.008 7	0.022 1	0.009 8	$\omega$
0.009 4	0.019 2	0.007 2	$M$

表 3 IGSO-A 卫星拟合时  $\Delta n$  与其余 14 个参数的相关系数表

Tab. 3 Correlation coefficient between  $\Delta n$  and others of IGSO-A

第一组	第二组	第三组	参数
1	1	1	$\Delta n$
<b>0.956 5</b>	<b>0.982 6</b>	<b>0.981 0</b>	$\Omega$
<b>0.951 0</b>	<b>0.968 1</b>	<b>0.972 3</b>	$di/dt$
0.277 6	0.177 0	0.189 8	$C_{ie}$
0.284 4	0.167 0	0.201 1	$C_{is}$
0.276 4	0.178 1	0.195 6	$C_{re}$
0.286 4	0.180 7	0.192 2	$C_{rs}$
<b>0.949 1</b>	<b>0.961 0</b>	<b>0.863 7</b>	$C_{ic}$
<b>0.880 9</b>	<b>0.974 0</b>	<b>0.978 3</b>	$C_{is}$
0.292 5	0.193 7	0.183 4	$\sqrt{a}$
0.291 2	0.190 4	0.186 0	$e$
<b>0.952 2</b>	<b>0.982 5</b>	<b>0.980 9</b>	$i$
<b>0.956 0</b>	<b>0.982 6</b>	<b>0.981 0</b>	$\Omega$
0.286 4	0.180 0	0.191 4	$\omega$
0.290 4	0.185 1	0.186 7	$M$

从计算结果来看, 参数  $\Delta n$  与  $\Omega$ 、 $di/dt$ 、 $C_{ie}$ 、 $C_{is}$ 、 $i$ 、 $\Omega$  具有较强的相关性, 这是导致方程病态的一个重要原因。对于 GEO 卫星, 与  $\Delta n$  相关系数超过 0.99 的参数有 4 个, 而对于 IGSO 卫星来说, 则无任何参数与  $\Delta n$  相关系数大于 0.99。这也说明, IGSO 卫星拟合时  $\Delta n$  与其他参数的相关性相对较小, 法方程病态程度相对较弱。

相关系数如图 5、图 6 所示。

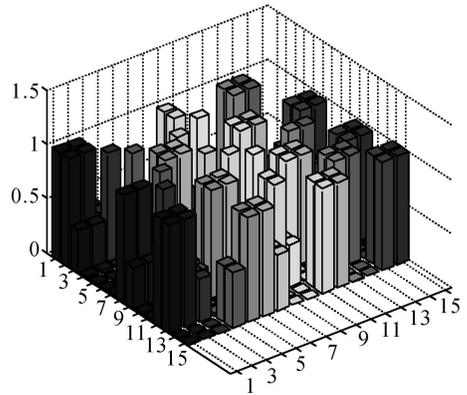


图 5 2010-06-02 日参数间相关系数

Fig. 5 Correlation coefficient between all parameters in 2010-06-02

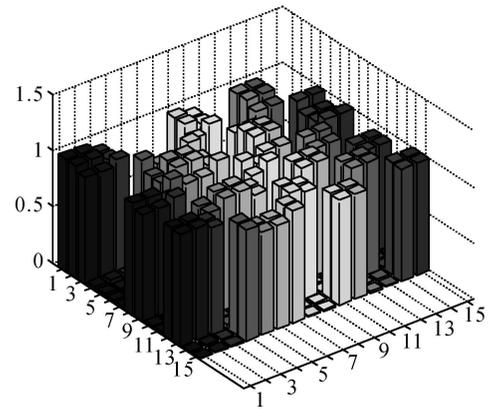


图 6 2010-06-12 日参数间相关系数

Fig. 6 Correlation coefficient between all parameters in 2010-06-12

从图中结果可以看出, 对于 GEO 卫星, 15 个参数之间均存在较强的相关性, 多数参数之间的相关系统接近 1, 拟合方程病态程度较强, 这使得方程求解时部分参数偏离其真实值存在一定的可能性。

### 2.3 $\Delta n$ 参数近似值计算

从广播星历参数相关性分析可知, 星历拟合方程的病态性导致参数解算结果偏离其真实值存在一定的可能。为了验证参数实际解算值偏离其真实值的程度, 采用数值方法对参数  $\Delta n$  的近似值进行计算, 通过对近似值进行分析, 判断拟合值在数值量级上偏离其真实值的程度。

用户使用的广播星历用户算法中, 在某组星历有效期的 1 h 内有

$$\bar{n} = n_{ioe} + \Delta n \quad (1)$$

式中,  $\bar{n}$  为星历有效期 1 h 内的平均角速度;  $n_{ioe}$

为星历参考时刻的瞬时角速度。因此可得

$$\Delta n = \bar{n} - n_{toe} \quad (2)$$

星历拟合时, 采用 4 h 轨道数据进行参数拟合, 得到包括  $\Delta n$  在内的 15 个参数。在此, 为了计算  $\Delta n$  的近似值, 取 4 h 中每 5 min 一个历元的轨道结果 (共 48 个值), 分别计算对应时刻的角速度值  $n_i$ , 由于所取点时间间隔较小, 4 h 内点密度足够大, 可以将 4 h 内角速度平均值近似等价于平均角速度  $\bar{n}$ , 再由  $\Delta n = \bar{n} - n_{toe}$ , 可得  $\Delta n$  的近似值。基于上述原理, 利用不同卫星实际定轨数据计算  $\Delta n$  近似值如图 7、图 8 所示。

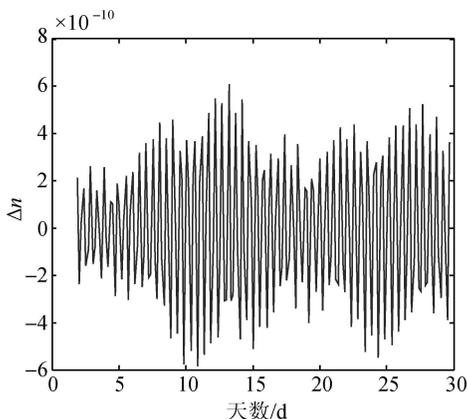


图 7 2010-06 月 GEO-A 计算  $\Delta n$  近似值

Fig. 7 Approximate  $\Delta n$  value of GEO-A in 2010-06

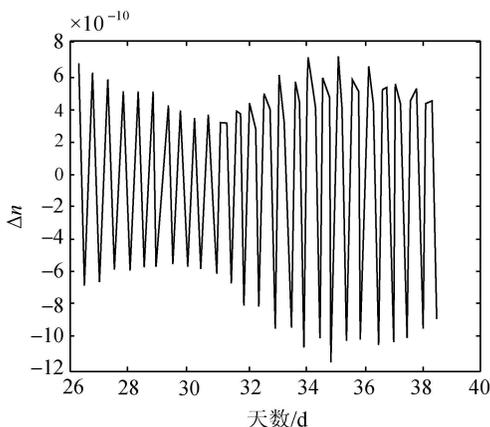


图 8 2010-10 月—11 月 IGSO-A 计算  $\Delta n$  近似值

Fig. 8 Approximate  $\Delta n$  value of IGSO-A in 2010-10 and 2010-11

对不同卫星的拟合结果和计算近似值进行比较, 结果如表 4 所示。

从两颗卫星的近似值计算结果来看,  $\Delta n$  的计算值与实际拟合值在峰值曲线变化上均呈现一定的一致性, 但对于 GEO 卫星, 计算结果与拟合

结果相差一个量级, 对于 IGSO 卫星, 计算结果峰值量级与实际拟合结果基本一致, 这也从另一方面说明与 GEO 卫星相比, IGSO 卫星拟合法方程病态程度较轻。

表 4 不同卫星  $\Delta n$  计算值与拟合值的比较

Tab. 4 Contrast between computing value and fitting value of  $\Delta n$  for different satellite

卫星	近似值峰值	拟合值峰值
GEO-A	$6.2 \times 10^{-10}$	$5.8 \times 10^{-9}$
IGSO-A	$6.5 \times 10^{-10}$	$6.5 \times 10^{-10}$

### 2.4 摄动影响分析

分析 GEO 卫星参数  $\Delta n$  的曲线图可以看出 (如图 9、图 10),  $\Delta n$  的变化除周日周期以外, 每日峰值呈现近半月周期变化, 考虑卫星受摄运动所有周期特性, 推测可能与月球第三体摄动相关。与 MEO 卫星相比, 高轨 GEO 卫星受到的月球三体摄动超过 MEO 卫星, 因而 GEO 轨道一阶摄动解的相应项量级大于 MEO 的相应摄动量级, 进一步分析 6 月和 12 月两个月中的  $\Delta n$  变化规律可以发现其中一个峰值从 6 月的 12 日提前到 12 月的 6 日 (如图 9、图 10), 峰值变化为 6 d, 这正好与月球摄动 28 d 的周期相吻合。

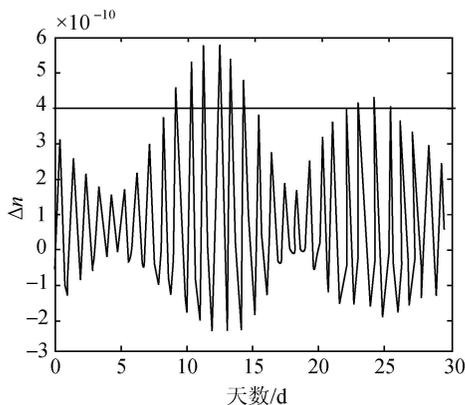


图 9 2010-06 月 GEO-A 拟合  $\Delta n$  曲线

Fig. 9  $\Delta n$  fitting result of GEO-A in 2010-06

为了进一步验证月球摄动的影响, 利用实际定轨得到的 GEO 卫星和 IGSO 卫星的初始轨道和动力学参数, 在不考虑月球摄动的条件下分别积分轨道, 利用积分轨道拟合广播星历参数, 对得到的参数  $\Delta n$  进行分析。参数  $\Delta n$  拟合结果如图 11、图 12 所示, 从图中可以看出, 忽略月球摄动之后, 两种卫星的  $\Delta n$  值变化曲线完全消除峰值的半月周期变化, 拟合得到的峰值只存在小幅度的近

似线性变化,这说明月球摄动是  $\Delta n$  参数拟合值每日峰值出现近似半月周期变化的主要原因之一。

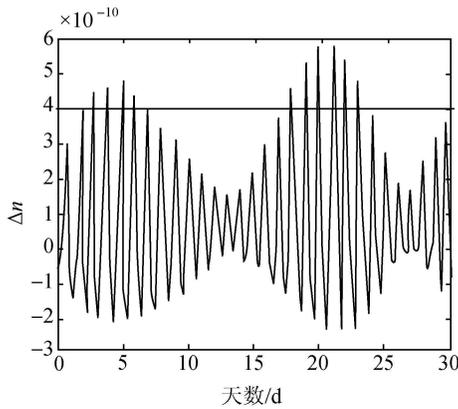


图 10 2010-12 月 GEO-A 拟合  $\Delta n$  曲线

Fig. 10  $\Delta n$  fitting result of GEO-A in 2010-12

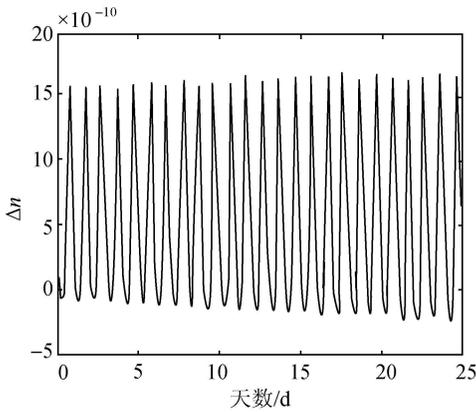


图 11 未考虑月球摄动时 GEO-A 拟合  $\Delta n$  曲线

Fig. 11  $\Delta n$  fitting result of ignoring lunar perturbation

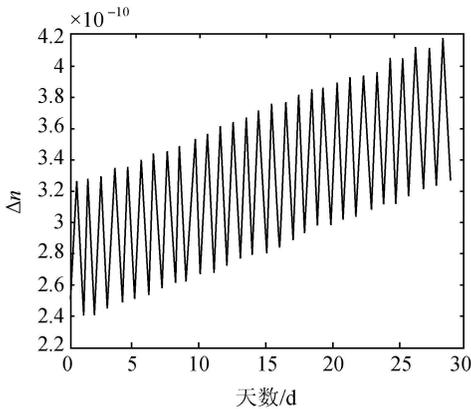


图 12 未考虑月球摄动时 IGSO-A 拟合  $\Delta n$  曲线

Fig. 12  $\Delta n$  fitting result of ignoring lunar perturbation

综合上述分析可以看出,对于  $\Delta n$  与其余参数相关性较强的 GEO 卫星,  $\Delta n$  的拟合值峰值远大于计算的近似值,而对于  $\Delta n$  与其余参数相关性相对较弱的 IGSO 卫星,  $\Delta n$  的拟合值峰值与计

算的近似值基本一致,其中  $\Delta n$  近半月峰值周期变化是由于月球第三体摄动引起,因此可以认为 GEO 卫星解算得到的  $\Delta n$  值中既包含了轨道的摄动周期特性,又吸收了由于方程严重病态导致的其他误差,  $\Delta n$  严重偏离其理论值并造成超出接口范围的原因是星历参数之间强相关性与轨道摄动之间复杂的综合结果。

### 3 参数超限抑制算法与验证

#### 3.1 固定 $\Delta n$ 解算其余 14 个参数的算法

从前面的参数相关性分析中可以看出,对于 GEO 卫星来说,进行星历拟合过程中,  $\Delta n$  与其余参数存在较强的相关性,在此,为了降低方程求解时的相关性,采用将  $\Delta n$  固定的方式,求解其余 14 个参数的方法,  $\Delta n$  的值取为与门限接近的  $3.999e-9$ 。基于以上算法原理,对 6 月份 5 个不同时段定轨文件进行星历拟合试验,拟合得到超限星历组数统计如表 5 所示。

表 5 超限星历组数统计表

Tab. 5 Statistics of over-limitation ephemeris

定轨文件 时间	星历 组数	$e$ 超限 组数	$di/dt$ 超 限组数	$e+di/dt$ 超限	超限 组数
2010-06-02	200	9	13	1	21
2010-06-07	200	15	4	0	19
2010-06-12	200	3	5	0	8
2010-06-17	200	4	7	0	11
2010-06-22	200	9	2	0	11

从拟合结果看出,固定  $\Delta n$  条件下拟合其余 14 个参数,出现参数  $e$  和  $di/dt$  超限的现象,说明采用固定  $\Delta n$  + 固定拟合弧长的方法无法完全解决参数超限问题。

在计算结果不满足要求的条件下采用调整拟合数据弧长的策略,对 2010-06 月定轨数据重新进行星历拟合计算,结果如表 6 所示。

表 6 超限星历组数统计表

Tab. 6 Statistics of over-limitation ephemeris

时间	星历 组数	$\Delta n$ 超 限组数	固定 $\Delta n$ 时	固定 $\Delta n$ 时
			4 h 数据求解 后超限组数	5 h 或者 3 h 数据 求解后超限组数
2010-06-02	281	54	1	0
2010-06-07	281	67	4	0
2010-06-12	281	49	1	1
2010-06-17	281	53	1	1
2010-06-22	281	52	5	0

从表中数据可以看出, 通过固定  $\Delta n$  值的同时调整拟合数据弧段长度, 在 4 h 数据拟合超限后调整数据弧段为 5 h 或 3 h。6 月份 5 个时段定轨文件拟合的星历中,  $\Delta n$  超限的组数均有明显的减少, 一个月中超限星历组数减少到 2 组, 可见上述方法对于抑制  $\Delta n$  超限的现象具有明显的效果。

### 3.2 有偏估计算法

有偏估计是解决方程病态性问题的方法之一, 针对 GEO 卫星星历拟合的方程病态问题, 采用有偏估计的方式降低方程的病态性, 压缩待估计参数的模, 在保证拟合误差的前提条件下, 将参数控制在接口范围门限以内。

具体策略是当  $\Delta n$  参数超限后, 对  $\Delta n$  进行参数岭估计, 考虑到工程的实际需求, 岭参数确定的原则并不以最优为准则, 而只要满足拟合结果要求即可。基于此策略对 6 月份的 GEO-A 卫星定轨结果进行星历拟合试验, 结果如下。

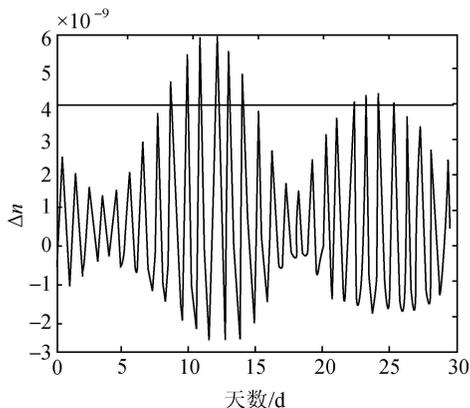


图 13 未进行参数岭估计条件下的  $\Delta n$  曲线  
Fig. 13  $\Delta n$  fitting result without ridge estimate

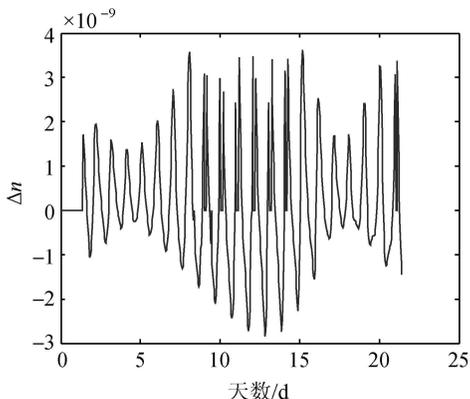


图 14 参数岭估计条件下的  $\Delta n$  曲线

Fig. 14  $\Delta n$  fitting result with ridge estimate

从 6 月份的数据看来, 在拟合的  $\Delta n$  参数超限后通过岭估计的方法, 将  $\Delta n$  值控制在设定限值以内, 从而完全消除  $\Delta n$  超限现象。

### 3.3 抑制参数超限的综合算法

基于前面设计的不同算法在抑制  $\Delta n$  参数超限中的性能, 综合各算法有效性设计了解决  $\Delta n$  超限问题的新算法。算法基本原理如下:

(1) 采用原星历拟合算法解算星历参数时如果发现参数超限则启动新算法;

(2) 算法中采用了固定  $\Delta n$  参数、参数岭估计、调整拟合弧长的策略。

基于 12 月份系统中 3 颗 GEO 卫星的定轨实测数据对新算法进行了星历拟合验证, 拟合结果表明, 在新算法条件下, 3 颗 GEO 卫星拟合结果超限现象完全消除。3 颗卫星 12 月份拟合结果如图 15 ~ 图 17 所示。

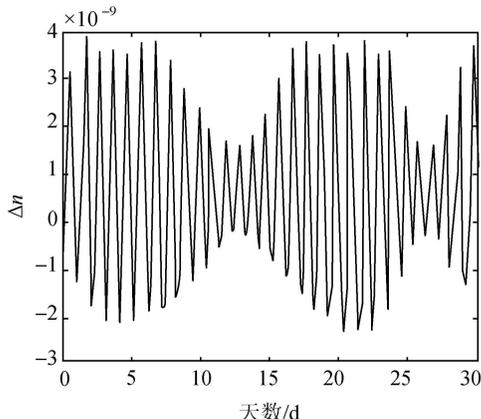


图 15 2010-12 月 GEO-A 新算法拟合  $\Delta n$  曲线  
Fig. 15  $\Delta n$  fitting result with new algorithms of GEO-A

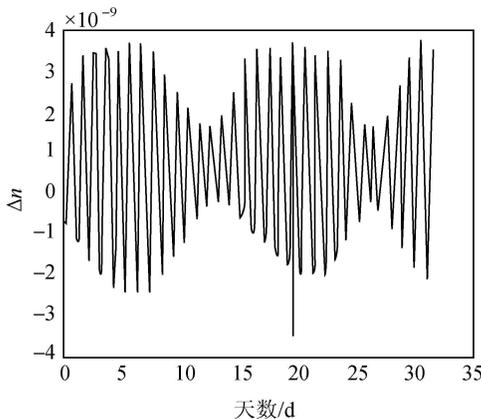


图 16 2010-12 月 GEO-B 新算法拟合  $\Delta n$  曲线

Fig. 16  $\Delta n$  fitting result with new algorithms of GEO-B

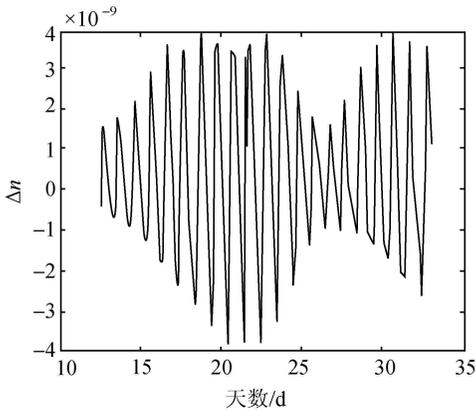


图 17 2010-12 月 GEO-C 新算法拟合  $\Delta n$  曲线

Fig. 17  $\Delta n$  fitting result with new algorithms of GEO-C

## 4 结束语

提高星历拟合精度是保证卫星导航系统精度的重要因素之一, 针对实际工程中出现的 GEO 卫星星历参数超过接口范围并导致用户定位出现误差的现象, 从数学机理和卫星动力学规律等多方面分析 GEO 卫星星历参数超限的原因, 指出月球摄动力和解算方程病态性的综合因素导致 GEO 的卫星星历拟合参数超限; 基于 GEO 卫星实际测定轨数据的特性, 设计固定部分参数、调整拟合弧段以及进行有偏估计等抑制参数超限的算法, 并通过实际测定轨数据进行验证。试验结果表明: 三种方法对于抑制星历超限都有明显效果, 基于三种方法原理设计的新算法能够有效解决参数超限问题。

## 参考文献:

[1] HU Songjie. Research on the Broadcast Ephemeris Parameters of GPS and GLONASS[J]. Journal of Spacecraft TT and C Technology, 2005, 26(3): 5-8. (胡松杰. GPS 和 GLONASS 广播星历参数分析及算法[J]. 飞行器测控学报, 2005, 26(3): 5-8.)

[2] CUI Xianqiang, JIAO Wenhai, JIA Xiaolin et al. Comparisons of two Kinds of GPS Broadcast Ephemeris Parameter Algorithms [J]. Chinese Journal of Space Science, 2006, 26(5): 382-387. (崔先强, 焦文海, 贾小林, 等. 两种 GPS 广播星历参数算法比较[J]. 空间科学学报, 2006 26(5): 382-387.)

[3] CUI Xianqiang. Solving Similar GPS Broadcast Ephemeris Parameters Using Givens Transformation [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2006, 28(4): 22-25. (崔先强. 用基于 Givens 变换的 QR 分解计算类 GPS 广播星历参数[J]. 测绘工程, 2006, 28(4): 22-25.)

[4] CHEN Liucheng, HAN Chunhao, CHEN Jingping. The Research of Satellites Broadcast Ephemeris Parameters

Fitting Arithmetic [J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(3): 12-14. (陈刘成, 韩春好, 陈金平. 广播星历参数拟合算法研究[J]. 测绘科学, 2007, 32(3): 12-14.)

- [5] HUANG Yong, HU Xiaogong, WANG Xiaoya, et al. Precision Analysis of Broadcast Ephemeris for Medium and High Orbit Satellite [J]. Process in Astronomy, 2006, 24(1): 81-87. (黄勇, 胡小工, 王小亚, 等. 中高轨卫星广播星历精度分析[J]. 天文学进展, 2006, 24(1): 81-87.)
- [6] CUI Xianqiang, JIAO Wenhai, JIA Xiaolin, et al. The Fitting Algorithm of GPS Broadcast Ephemeris Parameters [J]. Journal of Institute of Mapping and Surveying, 2004, 21(4): 244-246. (崔先强, 焦文海, 贾小林, 等. GPS 广播星历参数拟合算法[J]. 测绘学院学报, 2004, 21(4): 244-246.)
- [7] GAO Yudong, XI Xiaoning, WANG Wei. An Improved Fitting Algorithm Design of Broadcast Ephemeris for GEO Satellite [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(5): 18-22. (高玉东, 郝晓宁, 王威. GEO 导航星广播星历拟合改进算法设计[J]. 国防科学技术大学学报, 2007, 29(5): 18-22.)
- [8] YANG Weilian. Spectral Analysis of Satellite Orbit Perturbation [J]. Journal of Astronautics, 1995, 16(4): 1-8. (杨维廉. 卫星轨道摄动频谱分析[J]. 宇航学报, 1995 16(4): 1-8.)
- [9] YANG Weilian. An Accurate Mathematical Model for Satellite Ephemeris [J]. Chinese Journal of Space Science, 1999, 19(2): 148-153. (杨维廉. 一种高精度的卫星星历模型[J]. 空间科学学报, 1999, 19(2): 148-153.)
- [10] DING Wenwu, LIU Wankun, LI Zhenghang. Satellites Broadcast Ephemeris Based GPS Coordinate Polynomial Fitting Algorithm [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2007, 27(6): 4-7. (丁文武, 刘万科, 李征航. 基于广播星历的 GPS 卫星坐标的多项式拟合算法[J]. 海洋测绘, 2007, 27(6): 4-7.)
- [11] CHEN Zhengyang, YI Chonghai. Using Chebyshev Polynomials to GPS Satellite Orbit Standardized [J]. Mine Surveying, 2002(2): 5-7. (陈正阳, 易重海. 用切比雪夫多项式进行 GPS 卫星轨道标准化[J]. 矿山测量, 2002(2): 5-7.)
- [12] YOUSIF H, RABBANY A E. Assessment of Several Interpolation Methods for Precise GPS Orbit [J]. THE Journal of Navigation, 2007, 60(3): 443-455.
- [13] JEFFERSON D, BARS Y. Accuracy and Consistency of Broadcast GPS Ephemeris Data [C] // Proceedings of ION-GPS-2000. Salt Lake City: [s. n.], 2000: 391-395.

(责任编辑: 宋启凡)

收稿日期: 2011-01-31

修回日期: 2011-03-15

第一作者简介: 何峰(1982—), 男, 工程师, 研究方向为卫星导航与精密测量控制技术。

First author: HE Feng(1982—), male, engineer, majors in satellite navigation and precise surveying and controlling technology.

E-mail: ch00c82815@yahoo.com.cn