

# 利用 IGS 星历预报 GPS 卫星轨道

何仕强<sup>1,2</sup>, 吴 斌<sup>1</sup>, 陈俊平<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 在动力学轨道拟合以及轨道积分的基础上, 提出了基于 IGS 精密星历的 GPS 卫星轨道预报方法。该方法首先利用已知的 IGS 精密星历作为虚拟观测值, 采用动力学方法拟合出 GPS 卫星的初始轨道和动力学参数, 然后再通过积分来预报 GPS 卫星的轨道。主要讨论了基于不同弧段的 IGS 星历时, 该方法对 GPS 卫星轨道的拟合和预报情况。研究结果显示: 对于 6 d 弧段以内的 IGS 精密星历, 其拟合轨道与 IGS 精密星历差值的三维 RMS 值均优于 4 cm, 随着拟合弧段的增加, 拟合残差变大; 当利用 2~6 d 弧段的 IGS 星历来预报 GPS 轨道时, 大部分卫星第 1 天、第 7 天和第 30 天的三维预报精度可优于 0.1 m、3 m 和 100 m。其中, 2 d 弧段的 IGS 星历对 GPS 卫星第 1 天和第 7 天的预报结果最好, 5 d 弧段的 IGS 星历对 GPS 卫星第 30 天的预报结果最好。

**关 键 词:** GPS; IGS; 轨道拟合; 轨道预报

**中图分类号:** P197.5, P122

## 1 前 言

随着 GPS (Global Positioning System) 应用的不断深入, GPS 已被广泛运用到精密单点定位、低轨卫星星载 GPS 精密定轨等高精度的定位技术中。这些技术的应用是以高精度的 GPS 卫星星历为前提的, 常用的 GPS 卫星星历是通过一系列已知坐标的地面跟踪站来实现的。为了确保 GPS 系统在地面跟踪网瘫痪的情况下, 仍能提供一定精度的卫星坐标, 有必要实现 GPS 系统在无地面跟踪数据支持下的自主定轨。

全球导航卫星系统 GNSS (Global Navigation Satellite System) 的发展目标为能在一定时期内脱离地面跟踪站支持, 该系统利用星间测量技术来实现卫星轨道和钟差的计算<sup>[1]</sup>。截至 2010 年, GPS 系统已经连续部署了 Block II R、Block II F 型的 GPS 卫星, 这些卫星具有星间链路功能<sup>[2]</sup>, 可以不需要地面站的支持而实现自主导航; 此外, 俄罗斯正在研制的新型导航卫星系统 GLONASS-K 也将增加星间链路功能; 同时, 欧洲 GALILEO 导航系统也制定了卫星自主导航的发展规划。而基于星间链路的自主导航技术的关键是需要一定程度的卫星轨道和钟差参数的预报技术支持。因此, 预报导航卫星在一定时期内的轨道有着一定的理论和实际意义, 值得深入研究。

因此, 本文提出了基于 IGS (International GNSS Service) 星历<sup>[3]</sup>的 GPS 卫星轨道预报方法。该方法首先以 15 min 采样间隔的 IGS 星历作为虚拟观测值, 采用动力学方法拟合 GPS 卫星的初始轨道和动力学参数, 然后再通过轨道积分预报 GPS 卫星轨道。该方法的优点在于不需要任何的观测值, 并可以实时快速地预报 GPS 卫星的中、长期轨道。

该方法对 GPS 轨道的预报精度主要与所选取的 IGS 星历的弧段长度有关, 本文分别取拟合弧段长度为 1~12 d 的 IGS 星历来预报卫星轨道, 并预报了 2008 年年积日为 287 到 316 的 GPS 卫星轨道。

## 2 预报原理

### 2.1 预报过程

目前, GPS 卫星星历主要来源于 IGS 分析中心发布的轨道产品, 主要包括事后精密轨道 (IGS)、快速轨道 (IGR) 和超快速轨道 (IGU) 3 种类型, 其中 IGS 星历的精度最高, 轨道精度优于 5 cm, 钟差优于 0.1 ns, 时间延迟约为 13 d, 本文利用 15 min 采样率的 IGS 星历作为虚拟观测值, 预报 GPS 卫星的轨道。

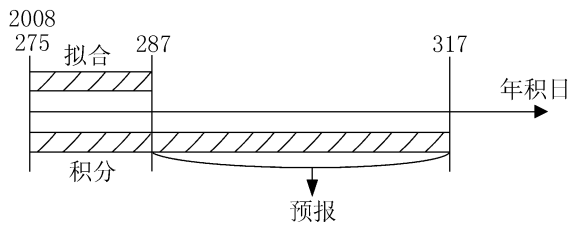


图 1 GPS 卫星轨道预报示意图

如图 1 所示, 本文的预报过程主要包括: (1) 从 GPS 卫星的运动方程出发, 积分得到卫星的动力学轨道, 根据积分轨道与 IGS 星历拟合 GPS 卫星的初始状态参数; (2) 利用拟合的状态参数重新积分卫星轨道, 此时积分区间为拟合弧段与预报弧段的总长度, 分别得到拟合轨道以及预报轨道。

由此可知, 本文所述的预报方法主要包括 GPS 卫星动力学轨道的积分和拟合两个部分, 有关卫星的动力学轨道积分在文献 [4] 和文献 [5] 中有详细介绍, 本文主要介绍 GPS 卫星的轨道拟合部分。

### 2.2 动力学轨道拟合

GPS 卫星动力学轨道的拟合主要是基于虚拟观测值的 IGS 星历, 对初始位置矢量以及动力学参数进行估计 [6], 其估计过程如下所述。

设 GPS 卫星的初始位置和速度为  $(\mathbf{r}_0, \dot{\mathbf{r}}_0)$ , 对 GPS 卫星动力学方程积分得到  $t$  时刻 GPS 卫星的位置和速度  $(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}})$ :

$$(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}) = g(t, \mathbf{r}_0, \dot{\mathbf{r}}_0, \mathbf{p}) \quad (1)$$

式中  $\mathbf{p}$  为 GPS 卫星所受到的摄动参数状态矢量, 主要包括太阳光压参数。由此可以写出某颗 GPS 卫星的位置矢量:

$$\begin{cases} X_c = f_X(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, \mathbf{p}) \\ Y_c = f_Y(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, \mathbf{p}) \\ Z_c = f_Z(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, \mathbf{p}) \end{cases} \quad (2)$$

设  $t$  时刻对应的 IGS 星历中 GPS 卫星的位置为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , 则 GPS 动力学轨道拟合的观测方程可表示为:

$$\begin{cases} X_0 - X_c = \frac{\partial X_c}{\partial \mathbf{r}_0} \Delta \mathbf{r}_0 + \frac{\partial X_c}{\partial \dot{\mathbf{r}}_0} \Delta \dot{\mathbf{r}}_0 + \frac{\partial X_c}{\partial \mathbf{p}} \Delta \mathbf{p} \\ Y_0 - Y_c = \frac{\partial Y_c}{\partial \mathbf{r}_0} \Delta \mathbf{r}_0 + \frac{\partial Y_c}{\partial \dot{\mathbf{r}}_0} \Delta \dot{\mathbf{r}}_0 + \frac{\partial Y_c}{\partial \mathbf{p}} \Delta \mathbf{p} \\ Z_0 - Z_c = \frac{\partial Z_c}{\partial \mathbf{r}_0} \Delta \mathbf{r}_0 + \frac{\partial Z_c}{\partial \dot{\mathbf{r}}_0} \Delta \dot{\mathbf{r}}_0 + \frac{\partial Z_c}{\partial \mathbf{p}} \Delta \mathbf{p} \end{cases} \quad (3)$$

对观测方程进行最小二乘估计, 得到 GPS 卫星的初始位置、速度和摄动参数状态矢量的改正值, 即可达到对 GPS 卫星轨道的动力学拟合。

### 3 数据处理及分析

本文采用了阿达姆斯积分器, 积分步长为 9.375 s; 所采用的卫星动力学模型<sup>[7,8]</sup>为地球重力场、固体潮、海潮、太阳及月亮引力以及太阳光压等摄动模型; 所采用的计算程序由 GAMIT 软件相关程序改编而得。GPS 卫星离地高度为 20 200 km 左右, 光压摄动是最大的误差源, 在计算 GPS 卫星轨道时, 需要精细考虑光压摄动的影响。本文所采用的光压模型是 Bern 大学基于欧洲定轨中心 (CODE) 1992 年以来的数据建立的 BERN2 模型, 该模型又称为 ECOM 模型<sup>[9,10]</sup>, 对大部分类型的 GPS 卫星都适用。

由第 2 节可知, 该方法对 GPS 卫星轨道的预报精度主要与所选取的 IGS 拟合弧段有关。本文选取了不同弧段的 IGS 星历, 研究不同弧段的 IGS 星历对 GPS 卫星轨道拟合和预报的影响, 并通过与独立的 IGS 轨道比较以评定预报精度, 评定参数为预报轨道与 IGS 轨道间的三维位置偏差的 RMS (Root Mean Square) 值和最大位置偏差 (max error) 值。表 1 详细列出了本文各方案所应用的 IGS 星历的拟合弧段及拟合弧段长度。

表 1 GPS 卫星预报方案

预报方案	拟合弧段长度/d	拟合弧段/年积日
FA1	1	286
FA2	2	285~286
FA3	3	284~286
FA4	4	283~286
FA5	5	282~286
FA6	6	281~286
FA7	8	279~286
FA8	10	277~286
FA9	12	275~286

为了对不同方案的预报精度进行分析, 本文选取了 GPS 卫星在 2008 年年积日为 275~286 的 IGS 星历作为虚拟观测值, 并将 GPS 卫星轨道外推 30 d (316)。通过大量的数据计算, 图 2 统计了上述各方案对 GPS 卫星 PRN03 拟合轨道的 3D-RMS 和 max error 值, 图 3、图 4、图 5 表示了各方案对 PRN03 卫星分别预报到第 1 天、第 7 天和第 30 天的精度。

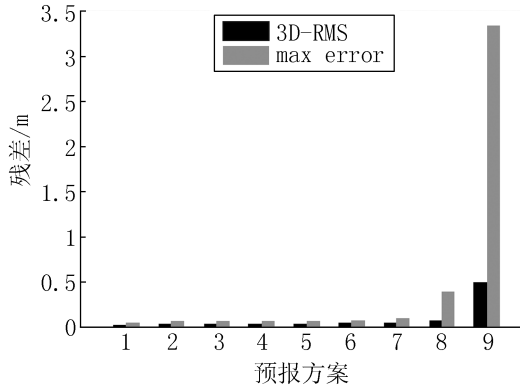


图 2 不同方案对 PRN03 卫星的拟合轨道与 IGS 轨道比较

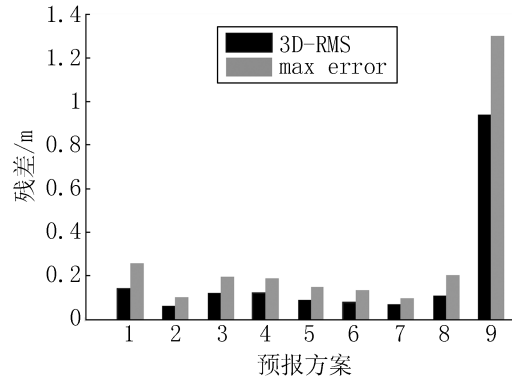


图 3 不同方案对 PRN03 卫星的第 1 天预报轨道与 IGS 轨道比较

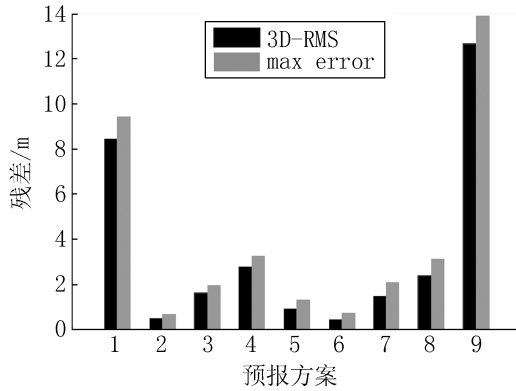


图 4 不同方案对 PRN03 卫星的第 7 天预报轨道与 IGS 轨道比较

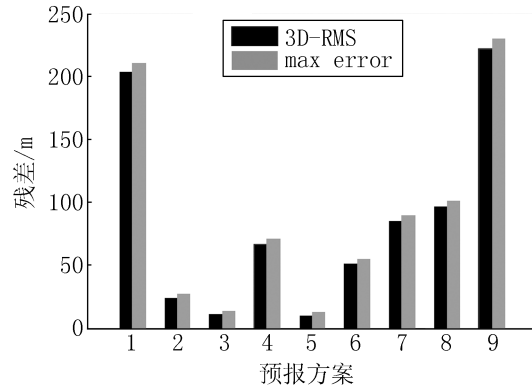


图 5 各方案对 PRN03 卫星的第 30 天预报轨道与 IGS 轨道比较

由图 2 可以看出: (1) 由于方案 1 的拟合数据最少, 拟合残差较小, PRN03 卫星的 3D-RMS 值为 1.8 cm, 最大残差为 3.1 cm; (2) 随着拟合数据的增加, 拟合残差越来越大, 方案 2、方案 3、方案 4、方案 5、方案 6、方案 7 的 3D-RMS 值保持在 4.0 cm 以内, 最大残差优于 9.0 cm; (3) 随着拟合数据的逐渐增多, 拟合残差增加得越来越快, 其中方案 8 的三维拟合残差和最大残差分别为 6.5 cm 和 38.7 cm, 方案 9 为 49.0 cm 和 333.1 cm。

由图 3、图 4、图 5 可以看出: (1) 虽然方案 1 对 PRN03 卫星的拟合残差最好, 但其预报精度却较差, 方案 1 对 PRN03 卫星第 1 天、第 7 天和第 30 天预报轨道的 3D-RMS 值分别为 0.14 m、8.43 m 和 203.70 m。(2) 对于第 1 天的短期预报, 方案 2、方案 3、方案 4、方案

5、方案 6、方案 7 的预报结果较好, 其 3D-RMS 值可保持在 0.10 m 左右, 最大误差也优于 0.20 m。其中方案 2 的预报结果最好, 其 3D-RMS 值和 max error 值分别为 0.06 m 和 0.10 m, 方案 8 的预报结果较差, 为 0.11 m 和 0.20 m, 方案 9 的预报结果最差, 为 0.94 m 和 1.30 m。(3) 对于第 7 天的中期 GPS 轨道预报, 方案 2 和方案 6 的预报结果较好, 其 3D-RMS 值均保持在 0.44 m 左右, 最大误差也可优于 0.71 m。方案 9 的预报结果最差, 为 12.64 m 和 13.90 m。(4) 对于第 30 天的长期 GPS 轨道预报, 方案 5 的结果最好, 其 3D-RMS 值和 max error 值分别为 9.37 m 和 12.33 m。

图 6 给出了方案 2 对 PRN03 卫星从第 1 天到第 30 天的轨道预报精度, 横轴表示预报的时间, 纵轴表示该天 PRN03 卫星预报轨道的 3D-RMS 和 max error 值。从图 6 可以看出, 方案 2 对 PRN03 卫星的预报呈现正常的预报规律, 其第 13 天的 3D-RMS 值优于 2.65 m, 第 30 天的 3D-RMS 值优于 24.11 m。

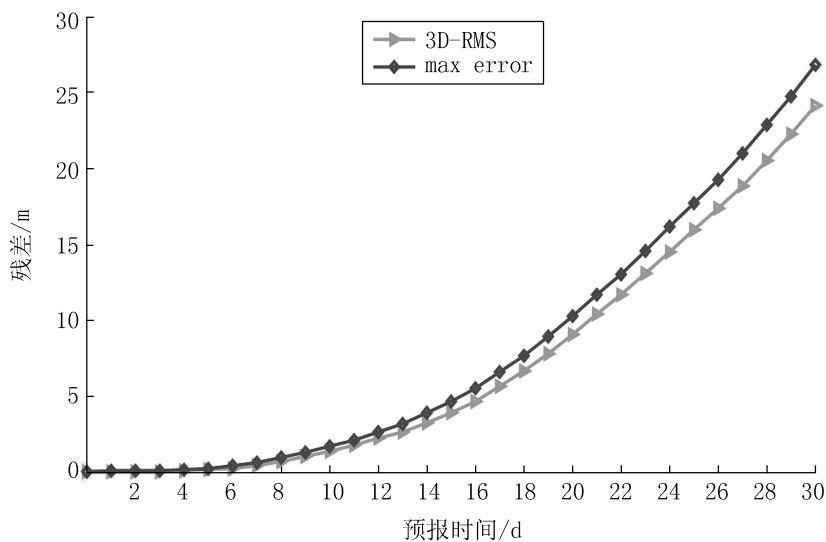


图 6 方案 2 对 PRN03 卫星的预报精度分析

表 2、表 3、表 4 分别统计了各方案对每颗 GPS 卫星第 1 天、第 7 天和第 30 天的预报轨道与 IGS 精密轨道的 3D-RMS 值。

从表 2—表 4 可以看出, 用本文方法对 GPS 卫星轨道进行短期预报时, 不同卫星的预报精度基本相同; 但对 GPS 卫星轨道进行中期 (第 7 天) 和长期 (第 30 天) 预报时, 不同卫星的预报精度相差较大。这主要是因为 GPS 卫星分别分布在 6 个不同的轨道面上, 而且同一轨道面上不同的卫星还有不同的 Block 类型, 表 5 和表 6 详细统计了方案 2 对不同轨道面和不同 Block 类型的卫星的拟合及预报精度。此外, 由于预报弧段内 PRN02 号卫星发生变轨, 当 GPS 卫星轨道外推到第 30 天时, PRN02 卫星的预报出现错误, 因此表 4 没有列出 PRN02 卫星的相关情况。

表 2 各个方案对每颗卫星第 1 天预报结果的 3D-RMS 值

卫星编号	3D-RMS /m								
	FA1	FA2	FA3	FA4	FA5	FA6	FA7	FA8	FA9
2	0.045	0.050	0.113	0.105 1	0.110 1	0.151	0.192	0.373	0.950
3	0.137	0.061	0.119	0.118	0.089	0.077	0.068	0.106	0.937
4	0.107	0.070	0.160	0.158	0.066	0.101	0.223	0.702	0.224
5	0.101	0.067	0.099	0.126	0.138	0.142	0.175	0.164	1.731
6	0.156	0.076	0.126	0.127	0.106	0.118	0.114	0.070	0.839
7	0.217	0.081	0.095	0.090	0.077	0.063	0.070	0.183	0.397
8	0.191	0.052 1	0.046	0.058	0.050	0.045	0.087	0.069	0.399
9	0.193	0.058 0	0.044	0.039	0.039	0.040	0.085	0.089	0.645
10	0.153	0.157 1	0.150	0.161	0.159	0.161	0.193	0.186	0.255
11	0.200	0.104 8	0.076	0.088	0.085	0.102	0.225	0.278	0.562
12	0.158	0.051	0.072	0.105	0.153	0.198	0.314	0.423	1.404
13	0.182	0.049	0.062	0.071	0.046	0.046	0.051	0.137	0.948
14	0.083	0.097	0.057	0.051	0.081	0.091	0.102	0.096	0.896
15	0.079	0.062	0.056	0.052	0.097	0.152	0.220	0.207	0.750
16	0.054	0.045	0.043	0.040	0.050	0.064	0.109	0.170	0.879
17	0.087	0.042	0.056	0.073	0.087	0.108	0.190	0.283	0.775
18	0.083	0.046	0.109	0.150	0.175	0.176	0.266	0.402	0.313
19	0.168	0.084	0.087	0.081	0.092	0.106	0.155	0.220	0.613
20	0.076	0.057	0.055	0.059	0.063	0.077	0.121	0.190	0.518
21	0.072	0.039	0.056	0.051	0.056	0.084	0.113	0.215	0.992
22	0.140	0.099	0.118	0.109	0.114	0.116	0.161	0.160	0.302
23	0.162	0.049	0.053	0.066	0.071	0.076	0.099	0.154	0.708
24	0.191	0.111	0.190	0.183	0.206	0.278	0.184	0.228	0.891
25	0.247	0.054	0.093	0.104	0.098	0.112	0.161	0.063	0.774
26	0.092	0.060	0.047	0.040	0.083	0.085	0.068	0.137	0.774
27	0.238	0.043	0.061	0.074	0.058	0.063	0.086	0.070	0.748
28	0.224	0.097	0.121	0.127	0.158	0.200	0.332	0.484	1.042
30	0.079	0.081	0.074	0.081	0.077	0.079	0.089	0.081	1.522
31	0.059	0.079	0.055	0.058	0.057	0.064	0.105	0.125	0.631
32	0.227	0.133	0.149	0.140	0.149	0.146	0.141	0.106	0.329
平均值	0.140	0.072	0.088	0.093	0.096	0.111	0.150	0.206	0.758

表 3 各个方案对每颗卫星第 7 天预报结果的 3D-RMS 值

卫星编号	3D-RMS /m								
	FA1	FA2	FA3	FA4	FA5	FA6	FA7	FA8	FA9
2	2.181	1.281	0.466	1.864	1.721	0.697	1.895	6.097	16.226
3	8.426	0.448	1.608	2.748	0.912	0.413	1.452	2.339	12.642
4	2.015	4.962	6.260	4.633	2.401	8.964	0.751	12.411	3.757
5	2.923	1.188	2.246	2.756	2.994	3.145	4.807	4.486	35.110
6	8.301	2.573	3.027	2.819	1.303	1.678	1.609	0.374	12.718
7	7.981	2.141	3.347	4.680	3.358	2.456	1.189	3.471	5.280
8	5.530	2.232	0.718	0.880	0.267	0.789	0.526	0.814	5.657
9	5.041	1.527	2.882	3.184	2.169	2.629	4.731	1.774	13.652
10	4.835	6.958	6.775	6.991	7.248	7.672	8.859	8.488	5.589
11	9.185	5.005	6.147	8.972	6.131	6.007	10.914	2.731	14.294
12	3.221	3.134	3.716	4.254	4.820	5.203	5.524	3.979	31.332
13	5.972	2.406	4.002	3.913	0.405	0.336	1.138	2.183	14.325
14	1.491	4.321	1.746	1.920	4.974	5.664	6.155	5.933	9.524
15	4.301	2.339	2.523	2.811	0.374	2.670	4.844	4.288	10.431
16	2.958	0.691	1.445	1.123	0.919	0.838	0.754	2.514	18.695
17	0.794	1.685	0.863	1.284	2.545	4.592	7.211	8.296	4.779
18	2.613	1.018	2.289	2.676	2.878	2.550	4.820	7.191	3.539
19	8.462	2.576	1.987	1.130	0.729	0.811	1.396	1.872	8.258
20	3.713	2.684	3.002	3.161	2.920	2.794	2.138	2.015	7.036
21	1.396	1.198	1.535	2.286	2.385	1.173	1.933	0.829	20.423
22	3.295	0.651	1.258	1.010	1.124	1.495	3.072	2.809	2.575
23	6.822	1.042	1.716	1.556	0.522	0.519	2.136	3.477	9.107
24	10.414	5.461	6.609	2.535	3.271	6.863	3.475	3.998	16.002
25	8.750	0.382	2.015	2.045	0.984	1.594	3.038	0.790	12.509
26	2.091	0.426	0.722	0.641	2.805	3.040	2.298	3.670	14.699
27	8.675	0.305	1.673	2.442	0.669	0.779	1.124	0.324	12.529
28	9.528	2.238	2.943	2.333	1.999	1.666	1.655	3.117	15.492
30	0.554	3.358	3.186	3.470	3.493	3.547	4.557	3.515	34.652
31	0.767	1.310	1.037	1.350	1.481	1.604	1.069	0.968	10.516
32	5.932	3.091	3.783	3.654	3.718	3.597	3.139	1.876	2.406
平均值	4.939	2.288	2.718	2.837	2.384	2.860	3.273	3.554	12.792

表4 各个方案对每颗卫星第30天预报结果的3D-RMS值

卫星编号	3D-RMS /m								
	FA1	FA2	FA3	FA4	FA5	FA6	FA7	FA8	FA9
3	203.770	24.110	10.910	66.370	9.370	50.720	84.900	96.120	221.330
4	633.970	801.200	744.520	620.650	218.710	136.320	307.620	783.670	225.160
5	133.100	57.900	40.800	41.900	39.600	32.200	66.300	43.800	1448.500
6	209.350	58.140	15.980	2.610	69.080	59.340	59.330	82.660	197.230
7	292.670	162.300	210.630	312.810	236.240	191.130	44.540	35.100	223.240
8	169.450	13.160	10.330	99.600	38.120	6.410	57.890	17.020	219.960
9	96.930	130.360	188.490	202.140	142.920	163.820	254.020	157.140	504.310
10	65.930	192.030	207.450	214.020	229.980	246.610	282.900	266.530	256.940
11	634.720	475.070	570.290	702.460	612.610	609.090	720.150	490.770	753.700
12	74.800	42.900	54.800	63.800	64.400	72.000	41.300	98.500	1317.700
13	9.380	209.290	225.360	206.300	16.770	5.900	50.740	57.720	404.960
14	81.130	41.810	65.180	33.650	129.040	162.950	184.720	174.290	260.680
15	45.170	87.620	107.660	118.490	29.220	139.660	226.140	204.210	209.150
16	46.160	1.080	13.410	8.540	2.610	8.180	21.890	158.560	969.930
17	53.710	37.250	21.560	51.360	111.600	193.020	278.150	294.400	15.220
18	16.020	43.120	32.770	29.470	34.180	22.730	87.070	139.300	98.240
19	232.620	25.700	19.390	58.250	87.240	101.900	122.510	122.900	106.670
20	105.330	66.920	61.050	57.330	46.400	38.740	18.410	18.140	49.620
21	327.760	213.000	134.170	80.170	69.930	135.250	102.910	158.280	549.110
22	74.520	108.630	81.890	85.320	77.340	61.920	12.300	23.340	97.210
23	61.170	146.030	144.820	112.880	41.820	22.970	54.760	98.420	251.140
24	740.370	614.530	559.790	231.360	264.230	468.020	305.810	321.630	410.800
25	254.000	51.570	90.330	81.380	21.790	50.590	109.180	10.080	358.320
26	69.190	20.660	39.250	22.590	152.040	164.980	135.680	178.870	514.030
27	309.370	134.220	173.320	211.870	111.270	116.340	128.780	106.010	462.040
28	142.590	2.140	9.280	2.580	14.570	10.850	27.800	186.600	749.460
30	27.120	19.610	17.820	21.220	28.320	27.320	93.700	28.900	1536.10
31	24.460	32.105	40.2120	63.690	72.635	76.669	16.857	13.235	317.306
32	108.850	67.800	91.090	93.490	94.740	92.160	79.870	39.810	14.510
平均值	180.810	133.800	137.330	134.360	105.750	119.580	137.110	151.930	439.390

从表5可以看出,本文对不同轨道面卫星的拟合残差和短期预报精度基本一致,但对GPS卫星进行长期预报时,不同轨道面卫星的预报精度出现较大差别,其中B轨道面的卫星预报精度最好,其平均3D-RMS值可达到24.72 m, A、C、E、F轨道面的卫星预报结果较好,其平均3D-RMS值优于100 m, D轨道面的卫星预报精度最差,其平均预报精度超过了500 m。如表4所示,第30天预报精度较差的PRN04、PRN11、PRN21、PRN24等几颗卫星都分布在D轨道面上。

由于2008年大部分GPS卫星都是Block IIA或Block IIA以上的类型,本文所使用的ECOM光压模型对此类卫星普遍适用,所以不同Block类型卫星的预报精度相差较小,这与



表 5 不同轨道面卫星的预报精度分析

轨道面	分布的卫星编号	平均 3D-RMS 值/m			
		拟合	第 1 天预报	第 7 天预报	第 30 天预报
A	7,8,9,25,27,31	0.030	0.061	1.316	87.289
B	5,12,16,28,30	0.042	0.068	2.122	24.722
C	3,6,17,19,29	0.026	0.066	1.820	36.301
D	2,4,11,21,24	0.028	0.075	3.582	525.952
E	10,18,20,22,32	0.031	0.098	2.880	95.701
F	13,14,15,23,26	0.029	0.064	2.107	101.083

表 6 不同 Block 类型卫星的预报精度分析

Block 类型	对应的卫星编号	平均 3D-RMS 值/m			
		拟合	第 1 天预报	第 7 天预报	第 30 天预报
Block IIA	3,4,5,6,8,9,10, 24,25,26,27,30,32	0.032	0.079	2.532	168.103
Block IIR-A	11,13,14,16,18,20,21,28	0.033	0.067	2.445	131.556
Block IIR-B	2,19,22,23	0.029	0.070	1.388	93.454
Block IIR-M	7,12,15,17,29,31	0.030	0.057	2.341	107.865

表 6 的统计结果基本相符。

## 4 结 论

本文从 IGS 精密星历出发, 提出了利用 IGS 星历预报 GPS 卫星轨道的方法, 研究了基于不同弧段的 IGS 星历对 GPS 卫星轨道的短期、中期和长期的预报。研究表明:

(1) 2 ~ 6 d 的 IGS 星历对 GPS 卫星预报结果较好, 大部分卫星第 1 天、第 7 天和第 30 天的三维预报精度可优于 0.1 m、3 m 和 100 m。其中, 2 d 弧段的 IGS 星历对 GPS 卫星第 1 天和第 7 天的预报结果最好, 5 d 弧段的 IGS 星历对 GPS 卫星第 30 天的预报结果最好。

(2) 由于 GPS 卫星分别分布在 6 个不同的轨道面上, 而且不同轨道面上的卫星还有不同的 Block 类型, 因此不同卫星的中、长期预报精度各不相同。统计发现, 不同轨道面上卫星的预报结果相差较大, 而不同 Block 类型卫星的预报精度相差较小。

**致 谢:** 感谢 IGS 为本文提供 GPS 卫星的精密 IGS 轨道。

### 参考文献:

- [1] 刘经南, 曾旭平, 夏林元等. 武汉大学学报信息科学版, 2004, 29(12): 1040
- [2] 林益明, 秦子增, 初海彬等. 宇航学报, 2010, 31(9): 2088
- [3] <http://igsceb.jpl.nasa.gov/>
- [4] 李济生. 人造卫星精密轨道确定. 北京: 解放军出版社, 1995
- [5] 叶叔华, 黄斌. 天文地球动力学. 山东: 山东科技出版社, 2000
- [6] 张如伟, 刘根友. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(4): 115

- [7] Chen J P, Wang J X. *Geo-spatial Information Science*, 2009, 12(2): 95  
[8] 陈俊平, 王解先. *武汉大学学报信息科学版*, 2008, 33(5): 488  
[9] Schutz B E. PhD Thesis. Austin: The University of Texas, 2009  
[10] 陈俊平, 王解先. *天文学报*, 2006, 47(3): 310

## Orbit Predictions for GPS Satellites using IGS Ephemeris

HE Shi-qiang<sup>1,2</sup>, WU Bin<sup>1</sup>, CHEN Jun-ping<sup>1</sup>

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

**Abstract:** A method for GPS orbits' prediction based on IGS ephemeris is presented in this paper. Firstly, GPS initial orbits are estimated using IGS precise ephemeris as pseudo-observations and then GPS orbits are integrated based on these parameters. We investigated the influence of the length of orbit arc on accuracy of orbit fitting and prediction respectively. Results show when the length of arc is less than 6 days, the average 3D RMS (Root Mean Square) of the difference between fitted orbits and IGS orbits is better than 4 cm. Difference becomes larger with the increase of arc length. When the arc length is between 2 and 6 days, the first day, the seventh day and the thirtieth day's predicted orbits have an average 3D RMS of better than 0.1 m, 3 m and 140 m compared to IGS orbits respectively. The orbit accuracy achieves the best when the arc length is 2 days. However, for the thirtieth day's prediction, it achieves the best when the arc length is 5 days.

**Key words:** GPS; IGS; orbit fitting; orbit prediction