

# CPF 星历精度分析

陈国平<sup>1,2</sup>, 何冰<sup>1,2</sup>, 张志斌<sup>1,2,3</sup>, 董晓军<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;  
3. 中国科学院国家天文台乌鲁木齐观测站, 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 目前, 卫星激光测距中普遍采用 CPF 格式的卫星星历作为预报轨道。选用了 GPS、Lageos 和 Envisat 等不同高度的 5 颗卫星对 CPF 星历的精度进行评估, 其中, CODE 提供的 GPS36 卫星在 5 d 内的预报轨道精度可达到 2 m, Lageos-1 和 Ajisai 卫星 5 d 内的预报轨道精度在 2 m 以内, 非球形的 Envisat 和 Jason-1 卫星 1 d 预报精度一般在 10 m 以内。

**关键词:** 预报轨道; 精度分析; CPF 格式; SLR

**中图分类号:** P197.5, P122

## 1 引言

CPF (Consolidated Prediction Format) 格式的星历是目前国际激光测距服务 (International Laser Ranging Service, 简称 ILRS) 的官方预报星历, 为卫星激光测距提供跟踪引导。在 2006 年 6 月 30 日以前, ILRS 下属的几个预报中心向全球各个卫星激光测站提供 TIRV (Tuned Inter-Range Vectors) 格式的卫星星历。随着卫星激光测距技术的不断发展, 以及为了将来能对多种测距目标 (如月球附近激光转发器或太阳系行星际目标) 进行测距, ILRS 成立了专门的卫星预报星历研究小组, 该小组经过多年研究提出了 CPF 格式, 并被 ILRS 认定为新的标准格式<sup>[1]</sup>。目前, 共有 11 家机构提供不同目标的 CPF 星历, 每颗目标由 2 至 3 家机构提供, 其中 1 家为主提供方, 剩余 1 家或 2 家为备份提供方。

CPF 星历不仅能够提供带有激光反射器的人造地球卫星的预报星历, 还能够提供适用于月面激光反射器的预报、月球附近激光转发器位置预报等。对于不同的目标, CPF 星历的格式有所不同, 但是大体上都包括 3 个部分:

(1) 文件头部分, 包含了星历的预报中心名称、预报的起始时间及终止时间、预报目标名称和类型、数据时间间隔、卫星质心改正 (当预报人造地球卫星时有此项)、预期精度 (可选) 等信息;

(2) 数据记录部分, 这部分是 CPF 星历的核心。它以多行多列的整齐形式, 给出了在约简儒略日 (MJD) 和一天中的协调世界时 (UTC) 秒数所对应的时刻, 目标在一定参考系下的目标状态量 (位置或速度信息等)。以预报人造地球卫星为例, CPF 星历会以一定时间间隔给出该颗卫星依次在每一预报时刻的地固系下三维直角坐标值;

(3) 结束部分, 每一个 CPF 星历都是以数字 99 作为结束标志<sup>[2]</sup>。

---

收稿日期: 2010-07-12; 修回日期: 2010-08-18

资助项目: 上海市空间导航与定位技术重点实验室 (06DZ22101)

由于 CPF 星历是以一定的时间间隔给出目标的状态量,那么,激光测距台站在使用 CPF 星历时,可以直接通过插值方法(如 9 阶 Lagrange 插值方法<sup>[3]</sup>)算出所要求的目标状态量。这种方法直观简单,精度也可以得到较好的保证<sup>[1]</sup>。

由于 ILRS 提供了数十颗带有卫星后向反射器的激光卫星的 CPF 格式预报轨道,这些轨道中既有几百千米的中低轨道,也有 2 万多千米的中高轨道,其星历时间间隔一般为几分钟,而且可以采用较为简单的插值方法直接计算卫星的位置,这一特征为采用这些卫星对光学设备或无线电设备进行跟踪试验提供了一种便利的手段。文献 [1] 介绍了 Tuned IRV 旧星历与 CPF 星历的有关情况,通过对 Starlette 和 Lageos-2 这 2 颗卫星观测资料的预处理及距离的观测值与 CPF 和 IRV 星历预报值的对比,分析了 CPF 星历的精度。本文采用与卫星精密星历相比较的方法,对 CPF 星历的精度进行评估,以供 CPF 星历的使用者参考。

## 2 精度分析过程

### 2.1 目标选取

本文针对不同轨道高度和不同卫星形状选取 5 颗卫星作为分析对象,其中,中高轨选择了 20 000 千米左右的 GPS 卫星 1 颗,中轨道选择 6 000 千米左右的 Lageos-1 卫星,中低轨选择 1 500 千米左右的 Ajisai 球形卫星、1 300 多千米的 Jason-1 卫星、800 千米高度的 Envisat 卫星(见表 1)。这 5 颗卫星的 CPF 星历由 6 家机构提供,其中每颗卫星的 CPF 星历由 2~3 家提供,其中 1 家为主提供方,在表 1 中此提供机构采用黑体标出。

表 1 目标卫星的信息

卫星名称	轨道高度 /km	倾角 /( $^{\circ}$ )	形状	提供机构
GPS36	20 030	55	非球形	<b>CODE</b> 、HTSI
Ajisai	1 485	50	球形	<b>HTSI</b> 、NSGF、JAXA
Envisat	800	98	非球形	<b>ESOC</b> 、HTSI、NSGF
Jason-1	1 336	66	非球形	<b>CNES</b> 、HTSI、NSGF
Lageos-1	5 850	110	球形	<b>HTSI</b> 、NSGF、JAXA

这 6 家 CPF 星历的提供机构都是国际上长期从事卫星精密定轨方面研究工作的,其基本情况如表 2 所示。

表 2 预报星历提供方信息

机构简称	国别	英文名称	中文名称
CODE	瑞士	Center for Orbit Determination in Europe Astronomical Institute University of Bern	伯恩大学天文研究所, 欧洲定轨中心
HTSI	美国	Honeywell Technology Solutions Inc.	霍尼韦尔技术研发中心
ESOC	德国	European Space Operations Centre	欧洲空间业务中心
CNES	法国	Centre National d'Etudes Spatiales	法国国家空间研究中心
NSGF	英国	NERC Space Geodesy Facility	英国空间大地测量机构
JAXA	日本	Japan Aerospace Exploration Agency	日本宇宙航空研究开发机构

## 2.2 分析方法

本文采用 2 种方法对 CPF 星历精度进行分析。

方法 1: 以 GPS 精密星历为参考, 对比 CPF 星历。在 GPS 系统的卫星星座中, GPS35 (PRN5) 和 GPS36 (PRN6) 卫星除了可以主动地发播 GPS 导航定位信息外, 由于在它们的地一侧安装了后向激光反射器, 因而还可被动地实施激光测距观测<sup>[4]</sup>。国际全球导航卫星系统服务 (International GNSS service, IGS) 提供事后 GPS 卫星精密星历, 其位置精度可达 2.5 cm, 以此事后精密星历为参考, 对比 CPF 星历, 便能分析出后者的精度。

方法 2: 对于中低轨的 Ajisai, Lageos-1, Jason-1, Envisat 卫星, 利用全球激光跟踪站的 SLR 观测数据, 对这些卫星进行精密定轨, 得到待分析目标的精密轨道, 并将此精密轨道和 CPF 星历进行比较, 以分析 CPF 星历精度。

精密定轨采用的模型如下<sup>[5-8]</sup>:

参考架采用: (1) J2000 平赤道平春分点; (2) ITRF2000 的 SLR 测站坐标; (3) IAU1976 岁差模型; (4) IAU1980 章动模型+天极补偿; (5) DE414 行星星历。

测量模型采用: (1) Marini-Murray 折射模型; (2) 针对不同目标的质心改正; (3) 固体潮形变改正; (4) 海洋负荷形变改正; (5) 极潮改正; (6) 激光测距的相对论改正。

力学模型采用: (1) IERS2000 固体潮; (2) UTCSR 海潮模型; (3) JGM3 重力场模型; (4) 日月行星引力摄动; (5) 光压摄动; (6) 地球反照辐射压摄动; (7) 大气阻力摄动 (Jacchia 1977 模型); (8) 广义相对论摄动 (一体问题); (9) 地球自转形变附加摄动; (10) 月球扁率摄动; (11) *RTN* 类阻力经验加速度。

## 2.3 数据选取

本文选取 2009 年 8 月 1 日零时为时间起点, 8 月 10 日零时为时间终点, 时长为 9 d。

CPF 星历: 由于不同机构提供的 CPF 星历时长有所不同, 有的是 5 d, 有的则是 3 d, 一般均短于本文所设定的时间长度, 长度不足的部分, 由所缺时间的首天的星历文件补充。例如, 时长为 5 d 的 CPF 数据, 则选取 8 月 1 日和 8 月 6 日的 CPF 文件。

GPS 星历: 采用 2009 年 8 月 1 日至 8 月 10 日的 IGS 事后精密星历。

SLR 精密星历: 选取 2009 年 8 月 1 日至 8 月 10 日的激光观测资料, 利用 *utopia* 进行精密定轨, 获取此时间段内的精密轨道。

## 2.4 数据处理方法

由于 CPF 和 GPS 的星历数据并不在相同的时间节点上, 需要采用 9 阶 Lagrange 插值法将其插值到相同的时间节点上。CPF 星历使用的是 UTC 时间, GPS 精密星历是 GPS 时间, 在 2009 年 8 月, 两者相差 19 s, 即  $UTC = GPST - 19s$ 。处理数据时需要将 GPS 精密星历的时间转换为对应的 UTC 时间。

在卫星进行精密定轨时, 对软件的输入参数进行设置, 使其输出的 SLR 精密星历的时间节点与 CPF 星历相同, 避免再次插值计算。

为了能够直观地展示误差信息, 星历之间的误差均转换到 *RTN* 坐标系中。*RTN* 坐标系的定义为: 坐标原点在卫星质心; *R* 轴为径向, 与地心到卫星质心的向径方向一致; *T* 轴为横向, 在轨道面内与 *R* 轴垂直, 并指向卫星运动方向; *N* 轴为轨道面正法向, 与 *R, T* 轴成右手系。

### 3 数据处理结果

#### 3.1 GPS36 卫星

GPS 卫星的精密星历由 CODE 和 HTSI 这 2 家提供, 由于这 2 家的 CPF 星历时长都只有 5 d, 因此采用了 8 月 1 日和 8 月 6 日的星历进行拼接。从比较的结果 (见图 1 和表 3) 可以看出, CODE 的预报误差较小, 最大的  $T$  方向也不超过 2.4 m; 而 HTSI 的预报误差相对较大, 除呈现明显的轨道周期外, 还有随时间线性增长的趋势, 其在  $T$  方向的偏差在第 5 天超过了 60 m, 而对 8 月 6–10 日的第二个弧段, 其线形增长趋势虽然较第一个弧段小, 但也达到了 20~40 m。

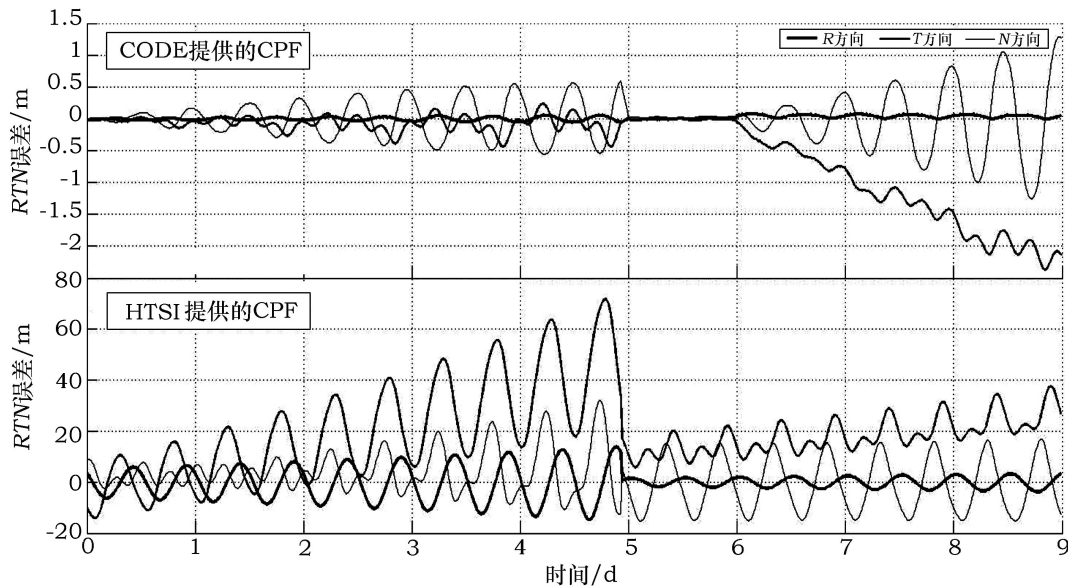


图1 GPS36 卫星 CPF 星历与 IGS 事后精密星历的比较, 起始历元为 2009 年 8 月 1 日

表 3 GPS36 卫星的 CPF 星历与 IGS 事后精密星历比较的误差统计表

机构简称	CPF 时长 /d	最大误差 /m		
		R 方向	T 方向	N 方向
CODE	5	0.1	2.4	1.3
HTSI	5	15	72	32

以上是 1 个算例得到的结果, 为了验证此结论的准确性, 我们增加了 2 个算例。图 2 是起始历元为 2009 年 3 月 1 日的比较结果, 图 3 是起始历元为 2009 年 11 月 1 日的比较结果。

图 3 所显示的 2 家机构的星历精度, 与图 1 较为相似; 图 2 所显示的精度要略低于图 1 和图 3。从 3 个算例总体上来看, CODE 的预报星历精度多数情况下好于 1 m, 但在 2009 年 3 月 1 日算例的前半段也出现了超过 10 m 的情况, 而 HTSI 的预报轨道精度一般在 20 m 左右, 坏的时候可能达到百米以上。

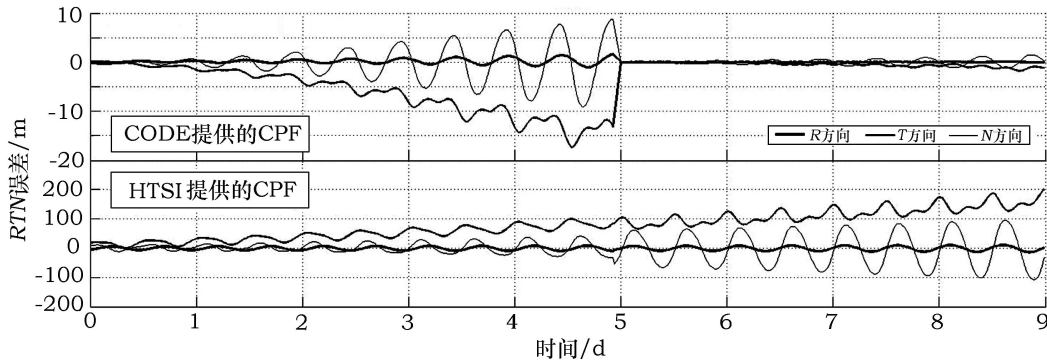


图 2 GPS36 卫星 CPF 星历与 IGS 事后精密星历的比较, 起始历元为 2009 年 3 月 1 日

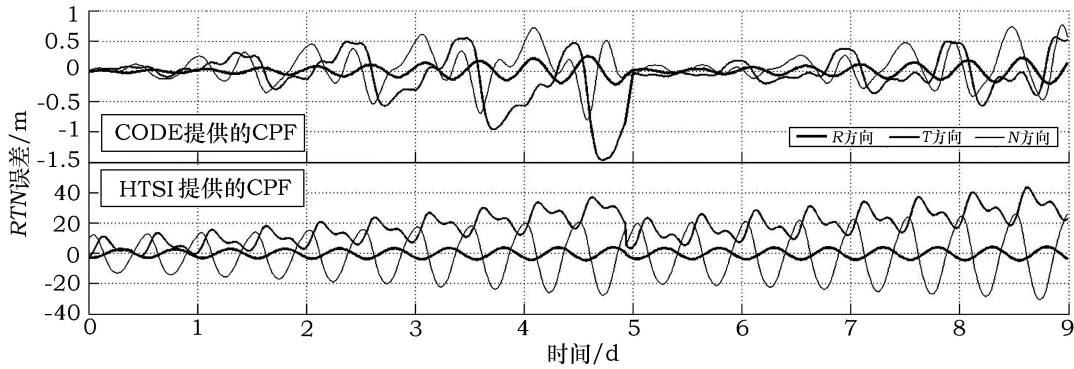


图 3 GPS36 卫星 CPF 星历与 IGS 事后精密星历的比较, 起始历元为 2009 年 11 月 1 日

### 3.2 Ajisai 卫星

Ajisai 卫星的参考轨道是采用对 SLR 数据进行精密定轨的方法得到的, 数据包括了全球 19 个跟踪站的 2941 个标准点数据。在精密定轨时, 估计了大气阻力、太阳光压和 RTN 类经验加速度等参数, 对大气阻力系数  $Cd$ 、太阳光压系数  $Cr$  和  $R$ 、 $T$ 、 $N$  系数每天估计 1 组, 得到的残差为 2.5 cm。

其定轨与 CPF 预报轨道结果的比较如图 4、表 4 所示。从结果可以看出, HTSI、JAXA 和 NSGF 这 3 家机构对 Ajisai 卫星的预报误差, 最大不超过 5.5 m, 其中  $R$  方向误差在 0.5 m 以内。这 3 家机构中, NSGF 预报的轨道最好, 最大误差低于 2 m。

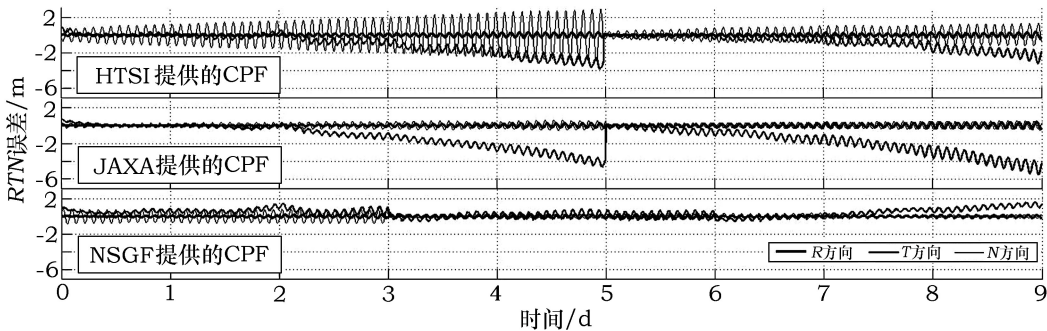


图 4 Ajisai 卫星 CPF 星历与 SLR 精密定轨结果的比较, 起始历元为 2009 年 8 月 1 日

表 4 Ajisai 卫星 CPF 星历与 SLR 精密定轨结果比较的误差统计表

机构简称	CPF 时长 /d	最大误差 /m		
		R 方向	T 方向	N 方向
HTSI	5	0.4	3.8	2.9
JAXA	5	0.4	5.5	0.6
NSGF	3	0.3	1.6	0.8

### 3.3 Envisat 卫星

Envisat 卫星的参考轨道也是采用 SLR 数据进行精密定轨得到的, 数据包括了全球 22 个跟踪站的 2 137 个标准点数据。在精密定轨时, 同样估计了大气阻力、太阳光压和  $RTN$  类经验加速度等参数, 对大气阻力系数  $Cd$ 、太阳光压系数  $Cr$  和  $R$ 、 $T$ 、 $N$  系数同样每天估计 1 组, 得到的残差为 7.8 cm。与 Ajisai 卫星相比, 误差较大的原因在于 Envisat 卫星的形状较为复杂, 由于本研究对预报轨道的评估在米级精度, 故在大气阻力和太阳光压摄动力建模时, 将卫星作为一个球形体考虑, 而没有进行精细建模。

其定轨结果与 CPF 星历的比较如图 5 和表 5 所示。由于 ESOC 没有提供 2009 年 8 月 1 日的 CPF 文件, 因此 8 月 1 日的的数据取自 7 月 30 日的 CPF 文件, 再联合 8 月 2 日和 8 月 6 日的 CPF 文件。

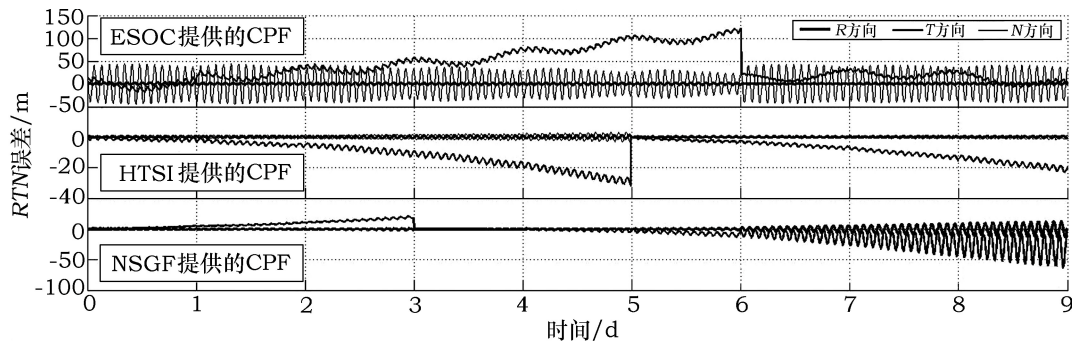


图 5 Envisat 卫星 CPF 星历与 SLR 精密定轨结果的比较, 起始历元为 2009 年 8 月 1 日

表 5 Envisat 卫星 CPF 星历与 SLR 精密定轨结果比较的误差统计表

机构简称	CPF 时长 /d	最大误差 /m		
		R 方向	T 方向	N 方向
ESOC	5	2.8	123.0	43.7
HTSI	5	1.5	30.4	3.1
NSGF	3	13.1	60.8	4.9

3 家机构的预报星历出现了明显差异, 其中 ESOC 的预报误差最大, 超过百米; HTSI 误差较小, 其中  $R$  方向误差只有 1.5 m。对于 Envisat 卫星而言, 即使比较结果最好的 HTSI, 5 d 的预报误差也会达到 30 m 左右, 但如果只使用其 1 d 的预报轨道,  $T$  方向的最大误差 4 m, 如图 6 所示。

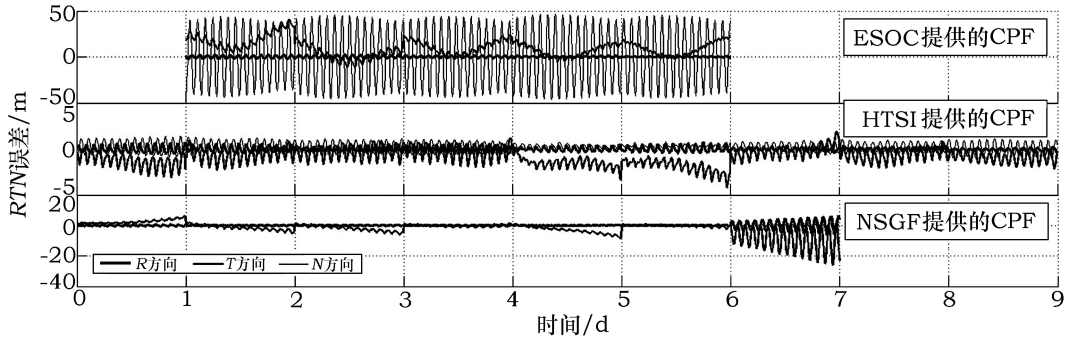


图 6 Envisat 卫星 1 d 的预报与精密定轨结果的比较, 起始历元为 2009 年 8 月 1 日

ESOC 没有提供 8 月 1、7、8、9 日这 4 d 的 CPF 文件, NSGF 没有提供 8 月 8、9 日 2 d 的 CPF 文件, 因此图 6 出现一些空白区域。对于 1 d 的预报轨道而言, ESOC 的结果较差, *N* 和 *T* 方向上的误差仍然接近 50 m 左右; 而 HTSI 和 NSGF 这 2 家的预报轨道则相对较好, 其中 NSGF 除 8 月 7 日的误差较大外, 其余 6 d 的误差都在 10 m 以内, 而 HTSI 的预报轨道误差, 在误差最大的 *T* 方向上, 除 8 月 5 日与 6 日达到 4 m 外, 其余 7 d 都好于 2 m。

### 3.4 Jason-1 卫星

Jason-1 卫星的参考轨道同样是采用 SLR 数据进行精密定轨得到的, 数据包括了全球 24 个跟踪站的 4261 个标准点数据。在精密定轨时, 采用 3 d 作为一个弧段, 对大气阻力系数 *C<sub>d</sub>*、太阳光压系数 *C<sub>r</sub>* 和 *R*、*T*、*N* 系数每 3 d 估计 1 组, 得到的残差为 25 cm, 其误差较大的原因以及我们的处理方式与对待 Envisat 卫星类似。

其结果与 CPF 星历的比较如图 7、表 6 所示。CNES、HTSI 和 NSGF 这 3 家机构对 Jason-1 的预报, 在 *T* 方向上的误差, 随着时间增大而迅速增大, 比较结果最差的 CNES 最大误差达到 255 m, 而在 *R* 方向上误差也达到了 7 m 左右。

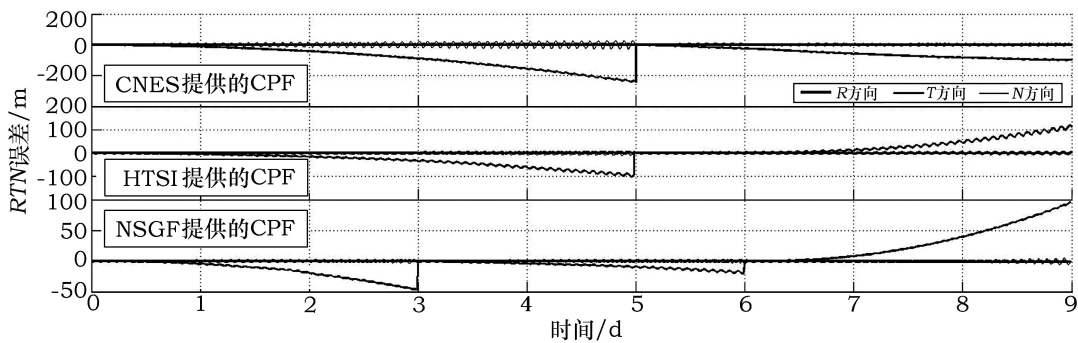


图 7 Jason-1 卫星 CPF 星历与 SLR 精密定轨结果的比较, 起始历元为 2009 年 8 月 1 日

为了考察预报轨道在弧段内第 1 天的精度, 我们将每天提供的 CPF 文件中只取当天的预报轨道, 将其拼接成 9 d 的预报轨道, 再与精密轨道进行比较 (图 8)。

对于 1 d 的预报轨道, CNES 的预报轨道 8 月 8 日的结果较好, 与精密轨道相差只有 5 m 左右, 而其余 8 d 在 10~30 m 不等; HTSI 的轨道误差在前 7 d 都好于 10 m, 而最后 2 d 则达到了 30 m 左右; NSGF 轨道误差除第 8 天达到 10 m 外, 其余 8 d 都在 10 m 以内。这 3 家的

表 6 Jason-1 卫星 CPF 星历与 SLR 精密定轨结果比较的误差统计表

机构简称	CPF 时长 /d	最大误差 /m		
		R 方向	T 方向	N 方向
CNES	5	7	255	27
HTSI	5	7	117	10
NSGF	3	6	93	6

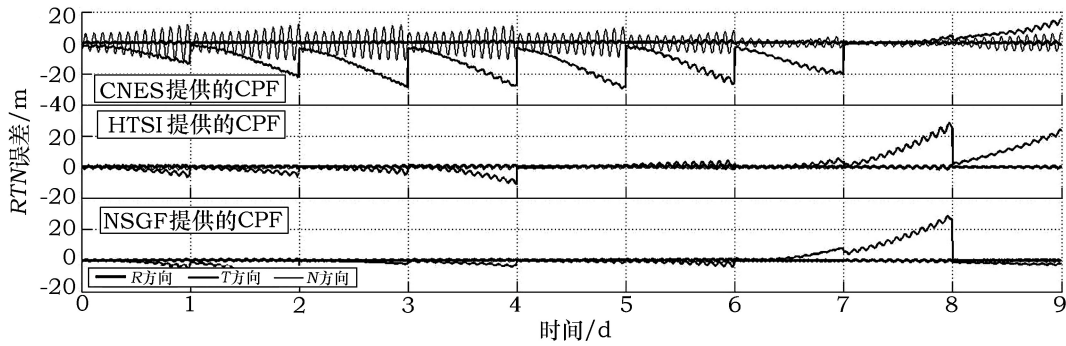


图 8 Jason-1 卫星 1 d 的预报与 SLR 精密定轨结果的比较, 起始历元为 2009 年 8 月 1 日

轨道主要误差都表现在  $T$  方向, 而在  $R$  方向上都较小, 一般都好于 2 m。

### 3.5 Lageos-1 卫星

Lageos-1 卫星的参考轨道是采用 SLR 数据进行精密定轨得到的, 数据包括了全球 18 个跟踪站的 1903 个标准点数据。在精密定轨时, 对大气阻力系数  $Cd$ 、太阳光压系数  $Cr$  和  $R$ 、 $T$ 、 $N$  系数每天估计 1 组, 得到的残差为 2.4 cm。

其与 CPF 星历的比较如图 9、表 7 所示。HTSI、NSGF 和 JAXA 等 3 家机构对 Lageos-1 的预报误差, 在  $T$  方向上, 最大只有 2.4 m;  $R$  方向上误差最大只有 0.2 m。其中最好的 JAXA, 在 3 个方向的误差都没有超过 1 m。

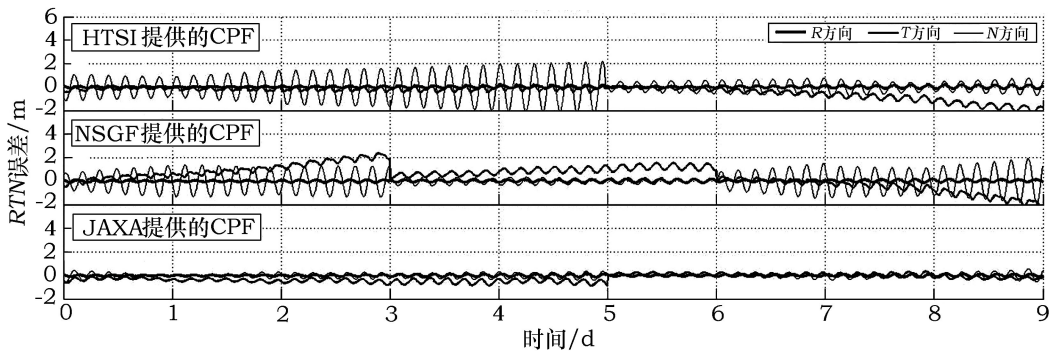


图 9 Lageos-1 卫星 CPF 星历与 SLR 精密定轨结果的比较, 起始历元为 2009 年 8 月 1 日

## 4 结 论

将以上分析的结果, 简单归集如下:



表 7 Lageos-1 卫星 CPF 星历与 SLR 精密定轨结果比较的误差统计表

机构简称	CPF 时长 /d	最大误差 /m		
		R 方向	T 方向	N 方向
HTSI	5	0.2	2.3	2.2
NSGF	3	0.2	2.4	2.0
JAXA	5	0.2	0.9	0.6

(1) 2 颗中低轨球形卫星的预报精度均在米级以内。其中 Lageos-1 卫星的 5 d 预报精度 3 家机构都好于 2 m; Ajisai 卫星的 5 d 预报精度 3 家都好于 5.5 m, 其中 NSGF 好于 1.6 m。

(2) 2 颗中低轨非球形卫星的 5 d 预报精度达到百米级, 主要误差表现在 T 方向, 最大可超过 200 m, 而在 R 方向上也达到 10 m 左右。对于 1 d 的预报轨道, 各家机构提供的星历精度不等, 其中对于 Envisat 卫星, HTSI 的预报星历较为稳定, 1 d 的精度在 4 m 以内, NSGF 的大部分情况也较好, 而 ESOC 则达到数十米; 对于 Jason-1 卫星 3 家机构都出现了 1 d 预报轨道在 T 方向上接近 30 m 的情况。总之, 对于中低轨的非球形卫星, 1 d 的预报精度虽然在大部分情况下都在 10 m 以内, 但仍然可能达到数十米, 因此, 对预报轨道精度的要求在米级时, 需要谨慎考虑对卫星和提供星历的机构的选择, 如尽量使用 Envisat 而不是 Jason-1 卫星。

(3) 主提供机构的预报轨道精度不一定是最好的。如对于 Envisat 卫星, 主提供机构 ESOC 的 1 d 预报精度就达到 50 m 左右, 明显低于其他 2 家的预报星历; Jason-1 的情况也类似。

(4) HTSI 提供了全部 5 颗卫星的轨道, 其对高轨的 GPS36 的预报精度较低, 5 d 的预报轨道精度达到 70 m; 但其对低轨卫星的预报轨道精度较为稳定, 如 Ajisai 卫星的 5 d 的预报精度好于 4 m, Envisat 卫星 1 d 的预报精度好于 4 m, Jason-1 卫星的 7 d 的预报精度好于 10 m, Ajisai 卫星的 5 d 预报精度好于 3 m, 因此, 在实际应用中可以作为参考轨道。

(5) 从精度分析结果看, 大气阻力是影响中低轨卫星预报精度的主要因素。预报精度最差的是低轨的 Envisat (800 km) 和 Jason-1 (1 336 km), Ajisai 的轨道虽然也不高 (1 485 km), 但由于其形状是球形, 便于大气阻力建模和预报, 因此预报精度较高。

## 参考文献:

- [1] 张海峰, 张忠萍. 中国科学院上海天文台年刊, 2006, 27: 8
- [2] Ricklefs R L. Consolidated Laser Ranging Prediction Format Version 1.01. Austin: The University of Texas / Center for Space Research, 2006
- [3] 奚梅成, 刘儒勋. 数值分析方法. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2007
- [4] 瞿锋, 王谭强, 陈现军等. 测绘通报, 2002, (2): 14
- [5] Feng Chugang. Determination of Chinese mobile SLR sites' coordinates. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(21): 2300
- [6] 李济生. 人造卫星精密轨道确定. 北京: 解放军出版社, 1995
- [7] 黄斌, 冯初刚. SLR 数据处理及其软件实现. 上海: 中国科学院上海天文台, 2003
- [8] 叶叔华, 黄斌. 天文地球动力学. 济南: 山东科学技术出版社, 2000

## Analysis of CPF Ephemeris' Accuracy

CHEN Guo-ping<sup>1,2</sup>, HE Bing<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-bing<sup>1,2,3</sup>, DONG Xiao-jun<sup>1</sup>

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030;*

2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;*

3. *Urumqi Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)*

**Abstract:** The CPF ephemeris is currently used for the prediction of the satellite orbits in SLR. The precision ephemeris of 5 satellites are used to assess the CPF ephemeris accuracy. The CPF ephemeris which predicts a 5-day period of the orbits of GPS36 provided by CODE has an accuracy of 2 meters, and the 5-days CPF prediction accuracy of LAGEOS-1 and Ajisai is less than 2 meter. On the other hand, the 1-day prediction accuracy of non-spherical satellite, such as Envisat and Jason-1, is a few meters, and some providers' prediction is worse.

**Key words:** CPF Ephemeris; GPS Precise Ephemeris; SLR Precise Orbit Determination