

# GPS 系列卫星广播星历轨道和钟的精度分析

郭 斐<sup>1</sup> 张小红<sup>1</sup> 李星星<sup>1</sup> 胡 权<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

**摘 要:**指出了在对 GPS 广播星历精度进行比较分析之前必须处理好的一些关键问题;统计了短期内(连续两周)所有 GPS 卫星的广播星历轨道误差及钟误差,并着重从卫星自身角度对其精度加以分析。分析结果表明,当前广播星历的轨道精度已经达到 2 m,钟差精度达到 10 ns 左右;不同类型卫星的精度状况有所差异,主要体现在其稳定性方面,Block IIR 卫星优于 Block IIA 卫星,铷钟卫星短期稳定性优于铯钟卫星。

**关键词:**GPS 广播星历;精密星历;轨道误差;钟误差

**中图法分类号:**P228.41

目前,IGS 提供的星历产品主要有事后精密星历(IGS 星历)、快速星历(IGR 星历)、超快速星历(IGU 星历)以及广播星历。论精度,IGS、IGR、IGU 星历均优于广播星历,但由于广播星历具有实时性、易获取等特点,因此它被众多实时导航定位用户所采用,其精度也是用户最为关注的一个问题。

文献[1,2]分别对 1993~2002 年、2002~2006 年期间 GPS 广播星历轨道的精度进行了长期的统计分析,得出其精度在逐年提高等一些结论。本文结合卫星自身特性,如卫星类型、卫星钟的差异来比较分析 GPS 系列卫星广播星历轨道与钟的精度。

## 1 分析策略及关键问题

IGS 精密星历提供了 15 min 等间隔的卫星位置和卫星钟差,其位置精度已优于 5 cm,钟差精度优于 0.1 ns,相对于目前广播星历的精度而言,可将 IGS 事后精密星历视作真值。比较广播星历与事后精密星历的差值即可认为是 GPS 广播星历的误差。广播星历每 2 h 播发一组,本文采用限制星历外推法计算每 15 min 等间隔的卫星位置和卫星钟差,并与 IGS 精密星历比较得到 GPS 广播星历的误差,并将轨道误差从地心地固

系转换到卫星轨道坐标系,从轨道径向、切向、法向 3 个方面加以分析。

在作具体分析之前,需要处理好以下几个关键问题。这些问题如果处理不当,也会影响到对广播星历精度的分析。

- 1) 参考框架的一致性。IGS 精密星历基于 ITRF 参考框架,而由 GPS 广播星历计算的卫星位置属于 WGS-84 坐标系,两者之间的偏差为 1~2 cm<sup>[3]</sup>。由于该偏差相对于 GPS 广播星历误差要小得多,因此比较时可以忽略不计。
- 2) 卫星天线相位中心改正。本文采用 GPS 系统的地面工作控制部分(OCS)提供的天线相位中心偏差值对所有卫星进行天线相位中心改正,消除系统性偏差后再作精度统计与分析。文献[4]给出了 OCS 实际采用的卫星天线相位中心偏差向量。
- 3) 星固系、轨道坐标系与地固系之间的转换。由于卫星星历基于地心地固系,卫星天线相位中心偏差向量则是基于星固系,而轨道误差通常由轨道切向、径向、法向进行描述,因此就涉及到 3 个坐标系之间的转换。

## 2 广播星历轨道精度分析

### 2.1 单天轨道精度分析

为了使所选的卫星具有代表性,依次在 GPS

星座 6 个轨道面上各选取 1 颗卫星,其中 3 颗 Block IIA 卫星、3 颗 Block IIR 卫星。计算 2007-10-28 单天广播星历轨道误差在径向  $R$ 、切向  $T$ 、

法向  $N$  的分量,并绘制了误差曲线图(见图 1)。图中,横轴代表 GPS 周秒,纵轴代表轨道误差值,单位为  $m$ 。

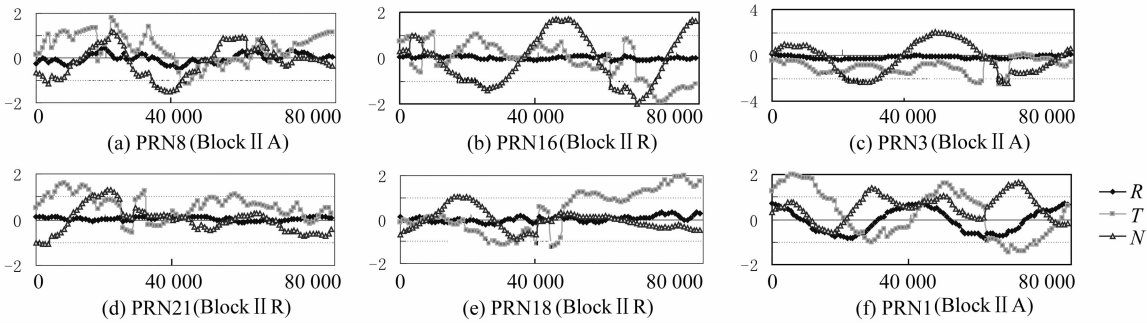


图 1 不同轨道面、不同类型卫星对应的单天广播星历轨道误差曲线  
Fig. 1 Broadcast Ephemeris Orbital Error of Satellites in Different Planes with Different Types

图 1 表明,广播星历的轨道误差在径向  $R$ 、切向  $T$  与法向  $N$  的分量均在  $\pm 2\text{ m}$  左右,且大致呈  $12\text{ h}$  的周期性。径向误差最小,最稳定;切向与法向误差的大小及变化范围都比较接近,且明显大于径向分量。其原因是由于地面站跟踪 GPS 卫星时,GPS 观测值对径向的变化相对其他两个方向更为敏感,且切向和法向的力模型不够完善;另外,根据开普勒定律,卫星轨道旋转时间的精确测定也能够估计出高精度的长半轴(径向方向)<sup>[5]</sup>,因此,广播星历径向的精度要明显优于切向与法向精度。

由于广播星历每  $2\text{ h}$  播发一组,相邻两组轨道参数之间存在一定的跳变,卫星轨道误差有时会发生  $\text{dm}$  至  $\text{m}$  级的跳跃现象,尤其是切向表现最为显著,法向其次,径向最小。

上述 6 个不同轨道面上的卫星广播星历精度状况基本一致,反映了广播星历误差与轨道面的分布没有太大关系,这主要是由于卫星定轨系统在各个轨道面上的定轨精度比较均匀。从卫星类型角度考虑,Block IIA 卫星与 Block IIR 卫星的轨道偏差在数值大小上差异不大,但 Block IIR 卫星的轨道误差波动较 Block IIA 卫星小,波动幅度更小些,稳定性更好,这可能得益于后期发射的 Block IIR 新型卫星自身性能的提高。

2.2 短期内广播星历轨道的精度统计分析

为进一步验证上述 GPS 广播星历轨道误差的量级及其变化规律,计算了 GPS 周为 1 451~1 452 连续两周所有卫星的广播星历轨道误差。限于篇幅,本文只给出了 PRN30 卫星(Block IIA)的广播星历轨道误差曲线(见图 2)。事实上,实验发现,所有卫星的广播星历轨道误差曲线

均与图 2 类似,其规律也与单天轨道误差基本类似,短期内没有发现明显的趋势项和周期项。

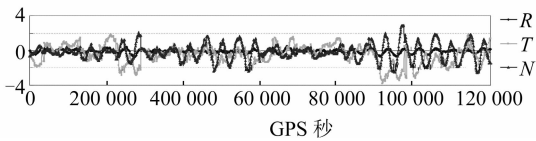


图 2 PRN30 卫星两周内广播星历轨道误差曲线  
Fig. 2 Broadcast Ephemeris Orbital Error of PRN30 Satellite with 2-Week Period

此外,统计了 31 颗卫星连续两周的广播星历轨道误差在径向、切向、法向上的均值与均方根误差(RMS),绘制了各个分量的均值和 RMS 直方图,横轴为卫星的 PRN 号,纵轴为均值或 RMS,单位为  $m$ (见图 3)。

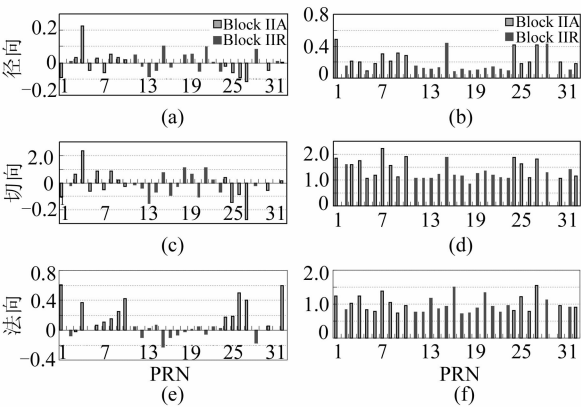


图 3 各卫星广播星历轨道误差的均值与均方根误差统计图  
Fig. 3 Statistics for All Satellites' Broadcast Orbit Error in RTN Directions

统计结果表明,所有 GPS 卫星的广播星历轨道误差均值及 RMS 值,在径向最小,其误差为

dm 甚至 cm 级,法向次之,切向最大。不同类型卫星的差异也主要体现其轨道偏差的稳定性方面,尤其在径向表现最为显著。由于 PRN15 卫星此前尚处于调试阶段,卫星工作状态尚不稳定导致其精度较差。此外,PRN7 卫星的稳定性也较差,这主要是由于其发射年代已久,卫星性能下降所致,事实也证明,在数据分析期间的一个月之后该卫星就因健康状况而停止工作。

### 3 GPS 广播星历的钟差精度分析

目前,GPS 卫星上搭载的原子钟有铯钟和铷钟两种。类似地,为使分析具有代表性,分别选取了一颗 Block IIA 铯钟卫星 (PRN1) 和一颗 Block IIR 铷钟卫星 (PRN2) 进行比较,图 4 是 GPS 卫星两种类型的钟的广播星历钟差误差曲线。

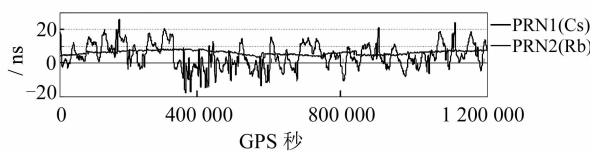


图 4 PRN1/PRN2 卫星的广播星历钟差误差曲线  
Fig. 4 Clock Bias of PRN1(Cesium)/PRN2(Rubidium) Satellite in 2-Week Period

由原子钟的普遍特性可知,铯钟具有良好的长期稳定性和准确度,铷钟短期稳定性和准确度较好,但长期稳定性不如铯钟。图 4 说明,铷钟卫星 PRN2 的钟差误差均分布在 10 ns 以内,并且变化非常平缓;铯钟卫星 PRN1 的钟误差的大小及波动弧度都明显大于铷钟卫星,这也恰好验证了铷钟的短期稳定性和准确度优于铯钟。同样,也可统计分析期间所有健康卫星的广播星历钟差误差的均值及 RMS 并绘制直方图(见图 5)。

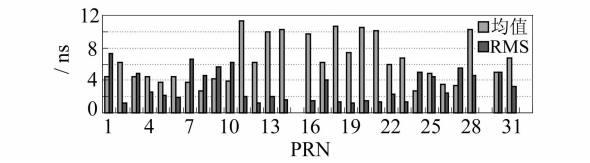


图 5 GPS 广播星历钟差误差统计图  
Fig. 5 Clock bias of All Satellites' Broadcast Ephemeris

图 5 中,除少数卫星的广播星历钟差误差超过 10 ns,其余大多数卫星的钟差误差都在 6 ns 以内。从均值考虑,铷钟卫星如 PRN11、13、14、16、18、20、21、28 整体上要稍大于铯钟卫星,这可

能是由于卫星钟随取样时间的变化会表现出不同的噪声类型而引起的系统性偏差<sup>[6]</sup>。从均方根考虑,铯钟卫星如 PRN1、3、8、9、24、27、30 的广播星历钟差误差的 RMS 值大致为 3~5 ns,而铷钟卫星的广播星历钟差误差 RMS 值相对较小,仅为 1~2 ns,其短期稳定性明显优于早期发射搭载铯钟的 Block IIA 卫星。

### 4 广播星历整体精度分析

为了综合分析卫星星历的轨道及其钟误差,可以采用空间信号测距误差 (signal-in-space range error, SISRE) 来衡量 GPS 广播星历的精度,其表达式为<sup>[8]</sup>:

$$\text{SISRE} = \sqrt{(R - C \cdot c)^2 + \frac{1}{49}(T^2 + N^2)}$$

式中, $R$ 、 $T$ 、 $N$  分别表示轨道径向、切向、法向误差; $C$  为光速; $c$  为卫星钟差。各误差项的权系数也反映了星历精度受其影响的敏感程度。在仅考虑卫星轨道误差影响的情况下,2006 年底广播星历的 SISRE 值已达到 0.4~0.5 m 左右,但是受卫星钟差的影响,其值要相对较大。图 6(a)绘制了 PRN5 卫星连续两周的 SISRE 曲线,图 6(b)统计了所有健康卫星的 SISRE 均值及 RMS。

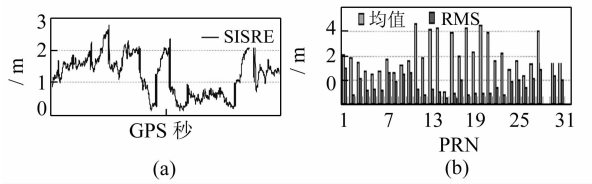


图 6 PRN5 卫星的 SISRE 曲线及所有卫星的 SISRE 统计图  
Fig. 6 SISRE of PRN5 Satellite and Means and RMS of SISRE for Whole Constellation

由上述统计分析可知,所有卫星的空间信号测距误差均在 3.5 m 以内,除少数几颗卫星的 SISRE 值超过 2 m,其余多数卫星的 SISRE 均值分布在 1~2 m,其 RMS 值也大多分布在 1 m 以内。如果按上式对所有的卫星的 SISRE 值进行加权统计的话,其均值为 1.97 m,RMS 值为 0.74 m。因此,从空间信号测距误差角度分析,当前 GPS 广播星历整体的精度已经达到 2 m 左右。

### 5 结 语

1) GPS 广播星历的精度差异与卫星轨道面

的分布没有太大关系,而主要取决于卫星自身的工作性能及其健康状况。广播星历轨道精度在径向最好,达到 dm 甚至 cm 级精度,法向次之,切向最差,但其均值及标准差基本在 2 m 以内 (PRN7 卫星的切向误差除外),且 Block IIR 卫星较 Block IIA 卫星的轨道偏差更稳定。广播星历的卫星钟差偏差大致在 10 ns 左右,其标准差均在 6 ns 以内 (PRN7 卫星除外)。采用不同类型卫星钟的广播星历的钟差精度状况亦有所差异,主要体现在卫星钟的稳定性方面,铷钟明显优于铯钟。

2) 从空间信号测距误差角度分析,当前 GPS 广播星历的精度已经达到 2 m 左右。GPS 广播星历的轨道和钟精度较之前已有明显提高,一方面是得益于 GPS 在提高广播星历精度方面所采取的一系列措施,比如 SA 政策的取消, L-AII (legacy accuracy improvement initiative) 计划;另一方面则是 GPS 现代化后旧卫星逐步被工作性能更优的新型卫星所取代。

参 考 文 献

[1] Warren D, Raquet J. Broadcast vs. Precise GPS Ephemerides: a Historical Perspective[J]. GPS Solutions, 2003(7):151-156

[2] 李征航,丁文武,李昭. GPS 广播星历轨道误差分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(1):50-54

[3] McCarthy D D, Petit G. IERS Conventions[R]. IERS Technical Note No. 32, IERS Conventions Centre, Gerard Petit, France, 2004

[4] Wormley Re S. Which Mass to Use with Newton's Third[EB/OL]. <http://sci.tech-archive.net/Archive/sci.physics/2007-07/msg00433.html>, 2007

[5] Zumberge J, Bertiger W. Ephemeris and Clock Navigation Message Accuracy[R]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, D C, 1996

[6] Warren D. Time and Frequency (The-Domain) Characterization, Estimation, and Prediction of Precision Clocks and Oscillators[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics, 1987, 34: 647-654

[7] Creel T, Dorsey A, Mendicki P, et al. Improved GPS: the Lagacy Accuracy Improvement Initiative [J]. GPS World, 2006(3):20-29

第一作者简介:郭斐,硕士生,研究方向为卫星导航定位技术及应用。  
E-mail:goalfield@sina.com

Precision Analysis on Orbit and Clock of GPS Satellites  
Broadcast Ephemeris

GUO Fei<sup>1</sup> ZHANG Xiaohong<sup>1</sup> LI Xingxing<sup>1</sup> HU Quan<sup>1</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** We pointd out several key issues, which should be well resolved before the precision analysis of GPS broadcast ephemeris. Statistical analysis of both the orbital and clock accuracy were presented with a test of a period of two weeks, mainly from the aspect of satellite itself. The orbital accuracy reached 2-3 m, and the clock precision reached about 10 nanoseconds. In addition, The precision varies from satellites to satellites. Satellites of Block IIR were superior to that of Block IIA, while rubidium clocks were better than cesium clocks, especially in the aspect of stability.

**Key words:** GPS broadcast ephemeris; precise ephemeris;orbit errors; clock bias

About the first author: GUO Fei, postgraduate, majors in technique and application of global navigation satellite system.  
E-mail: goalfield@sina.com