第21卷 第1期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.1
2001 年 1月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 2001

精密 GPS 卫星钟差的改正和应用*

季善标 朱文耀 熊永清
(中国科学院上海天文台 200030)

摘 要

分析了 GPS 卫星钟差的变化特性，探讨了利用 GPS 地面跟踪站的观测数据估算 GPS 卫星钟差的可行性. 建立了相应的算法和软件系统，并把由地面跟踪站的实测数据估算的卫星钟差用于星载 GPS 定轨计算，得到优于 1 m 的定轨精度.

关键词 GPS 卫星钟－星载 GPS 测轨

1 引 言

用于遥感、气象和海洋测高等应用的低轨道卫星 (卫星高度约 300—500 km), 由于大气阻力和太阳辐射压摄动的难以模制致使很难用动力法精密确定卫星轨道，对这些卫星用通常的地面跟踪技术 (如激光、雷达、多普勒等) 动力法定轨误差将随着卫星高度的降低而明显增大，其定轨误差可达几十米甚至超过百米，这样的定轨精度已不能满足许多高精度应用对卫星轨道的需要，某些飞行器径向的定轨精度需达到米级才能满足实际应用. 对这些低轨道卫星的精密定轨一个极有前景的方法是采用星载 GPS 技术，如国外的 TOPEX 卫星、地球观测系列卫星 EOS-A, EOS-B(地面高度为 705 km) 和一系列的航天飞机 (地面高度为 250—300 km) 上都装载 GPS 系统. 用星载 GPS 技术实现精密定轨的要求，几何法星载 GPS 定轨完全不受动力定轨中大气阻力和太阳辐射压不确定性的影响，与通常动力法定轨相比具有显著的优点.

几何法星载 GPS 定轨实际是一种 GPS 高速动态定位. 如不采用特殊措施，在 SA 影响下星载 GPS 定轨误差将超过 100 m; 另外，由于卫星相对于地面站以每秒数公里的速度高速运动，星载 GPS 观测数据很难与地面站组成完整的差分；再则，低轨卫星与地面跟踪站所处的环境大不一样，很难利用 DGPS 来消除 GPS 卫星钟的影响以提高星载 GPS 的定轨精度. 本文就是在这样的背景下提出如何利用地面站高精度的 GPS 观测资料来精密估计和改正 GPS 卫星钟抖动，并把结果用于几何法星载 GPS 定轨的方法，获得较为理想的 1 m 定轨精度，满足了各种应用对低轨测地卫星定轨精度的要求.

本文的研究全部基于实测数据， GPS 观测数据取自 IGS 跟踪站，星载 GPS 的观测数据取自 TOPEX 卫星上的 GPS 接收机的实测数据.

* 国家攀登项目 (970231003), 国家自然科学基金重点项目 (19622010 KJ951-01-304,19833030), 上海市科学技术发展基金项目 (JC14012) 资助
1999-06-17 收到原稿， 2000-11-15 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

2　利用地面 GPS 跟踪站估算 GPS 卫星钟差的可行性

影响星载 GPS 定轨精度的一个重要因素是 GPS 卫星钟差的精度. 虽然在 GPS 广播星历中给出了卫星钟差的预报值，但误差较大. GPS 广播星历钟差的误差可分为两部分，第一是钟差估算和钟差预报的误差，这部分误差受 GPS 主控站钟差估计精度和 GPS 卫星时间与频率标准的维持精度的影响；第二是钟差的描述误差，仅用某一时刻的 GPS 卫星钟偏和钟漂外推后续时间的 GPS 钟差会产生外推误差. 根据我们对 TOPEX 卫星的星载 GPS 观测资料的计算，如果对 GPS 卫星钟差不作修正，只用广播星历给出的卫星钟差，其定轨误差将超过百米.

为了消除或减小 GPS 卫星钟差的影响，我们先探讨利用 GPS 地面跟踪站的观测值估计 GPS 卫星钟差的可行性. GPS 地面跟踪站的接收机一般以 30 s 的采样间隔采集 GPS 卫星 L_1 、L_2 频率的伪距和载波相位，所有的 GPS 接收机都根据它们自身所实现的 GPS 时间在相同的 GPS 历元得到观测值. 如果 GPS 钟差变化频率非常高，例如在 ms 量级，那么利用 30 s 采样间隔的地面站观测资料精确求解卫星钟差将是困难的.

为了分析 GPS 卫星钟差高频抖动的频率，我们作了如下试验，对装置氢原子频标、点位已精确测定的地面 GPS 跟踪站，分别以 2 s 和 30 s 间隔采样获得两组相位观测数据，对这两组数据用初始历元的钟差进行钟差改正以及电离层对流层改正后计算了两组相位观测值的残差并绘制相应的残差图 (计算中 GPS 卫星星历用 IGS 星历)，残差图显示 GPS 卫星钟的高频抖动频率并不是太高，在 30 s 的时间间隔内 GPS 卫星钟的变化比较平缓，因此用通常的 GPS 地面跟踪站的观测数据，即 30 s 采样间隔的数据估算 GPS 钟差是可行的.

目前全球 GPS 服务网均配置了高精度的 GPS 接收机，许多跟踪站还与原子频标相连，有的甚至还与氢钟相连. 这些接收机采集 L_1 、L_2 频率的伪距和相位观测值，相位测量的观测噪声约为 1 mm，伪距测量噪声约为 10—50 cm，相位观测值所对应的钟差精度约为 3×10^{-3} ns，钟漂精度约为 10^{-4} ns/s，所以用相位观测值可估计 GPS 卫星钟的钟差，但它不能估计氢钟的钟差，因为氢钟的稳定度在 7×10^{-6} ns/s，它可作为 GPS 钟漂估计的时间参考框架.

正如文献 [2] 所分析的，钟差估计中的一个重要问题是 AS 引起的伪距偏差，从没有 AS 到有 AS，伪距残差发生跳变，这种跳变最大时可达 60 m. AS 偏差随时间的变化基本是一常量，在 GPS 卫星钟差估计前必须予以剔除.

要估计 AS 偏差，首先用双差伪距残差得到平均的双差伪距偏差，根据平均的双差伪距偏差，并且假定无 AS 作用的卫星 AS 偏差为零，便可得到每一接收机/卫星组的 AS 偏差；再检查每一台接收机的 AS 偏差是否和卫星相关，如果不相关，就可直接确定接收机的 AS 偏差；否则，不解算统一的 AS 偏差，而把该接收机对应于每颗卫星的 AS 偏差值独立地记录下来用于卫星钟差估计.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

3 利用 GPS 地面跟踪站的观测数据估计 GPS 卫星钟差的算法

估算 GPS 卫星钟差时，满足下列要求：

1) 能产生精确的 GPS 卫星和 GPS 接收机的钟差估计值.

2) 可以处理受 SA 和 AS 影响的 GPS 数据，最大程度地减少或消除它们的影响. 钟差可以单个历元地估计. 必须估计 AS 伪距偏差以便给予补偿，由于这些偏差取决于 GPS 接收机，对任何跟踪站都不能假定它们是固定的，所以必须在钟差估计前进行检测并予以剔除.

3) 提供用 GPS 时间作为时间参考系的钟差估计值. 由于在 SA 作用时，任何时候 GPS 接收机时间与 GPS 时间的同步只能确定在 10 ns 的水平，所以要求用氢钟作为时间参考框架.

4) 提供用于精密单点定位的钟差. 要求能够高密度估计钟差，例如每分钟一个钟差值，使能用于高精度单历元单点伪距定位.

GPS 卫星钟差的估计步骤为：

1) 从地面跟踪站得到 RINEX 格式的 GPS 观测数据，包括 RINEX 观测数据和卫星广播星历.

2) 数据预处理：

①形成相位双差，探测并改正周跳；

②由伪距观测值和广播星历中的卫星钟差值采用最小二乘法估计每个观测历元的接收机钟差，并由此得到每天的 GPS 卫星钟偏和钟漂平均值；

③为了解算 AS 偏差，组成伪距双差观测值.

3) 定轨计算. 采用双差相位观测值，解算参数包括 GPS 卫星轨道、地球自转参数、双差模糊度、对流层参数和站坐标等，得到伪距和相位双差观测值的残差. 一般地，在数据处理前如能获得精密 GPS 卫星轨道、地面跟踪站坐标和地球自转参数，可直接利用这些资料确定双差相位观测值模糊度、对流层改正参数，形成伪距和相位双差观测值的残差.

4) 估计 AS 偏差.

5) 精确估计钟差. 用定轨得到的参数、 AS 偏差、 GPS 广播星历、伪距和相位残差计算 GPS 卫星的钟差. 钟差估计包括：

①相位观测值对时间求导得到钟漂观测值，由于前后历元求差消除了模糊度，无需求解相位模糊度，在钟漂估计中把周跳当作粗差予以剔除；

②由伪距观测值采用最小二乘法估算初始历元卫星钟差，先前计算得到的接收机钟差用于约束初始历元卫星钟差的解算；

③由钟漂观测值通过卡尔曼滤波求解卫星钟漂，与氢钟相连的 GPS 接收机为钟漂估计提供了稳定的时间参照. 广播星历中卫星的钟漂值可以用来约束钟漂估计中的长期变化项；

④由伪距观测值、钟漂解算值和广播星历中的钟偏值采用卡尔曼滤波方法估计卫星钟偏，钟漂解算值用来约束卫星钟差估计的短周期项，广播星历中的钟偏约束钟漂估计的长周期项.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

对所有跟踪站和所有观测卫星按 1 分钟间隔估计卫星钟偏和钟漂，保存起来用于导航定位和时间传递等应用. 图 1 是 GPS 精密钟差的估计流程图.

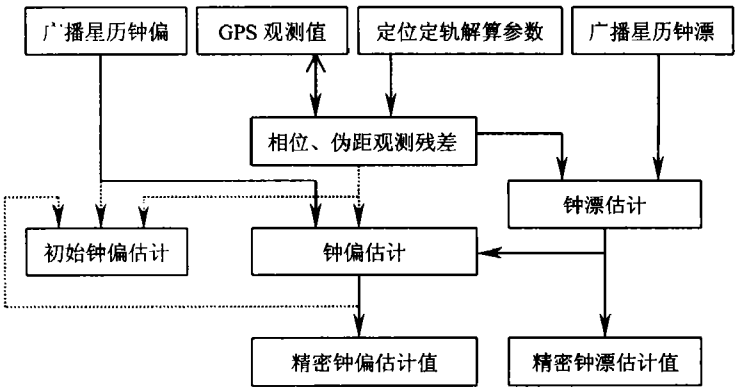

图 1　GPS 卫星精密钟差的估计流程图

Fig.1　Flow chart of estimation of accurate GPS satellite clock bias

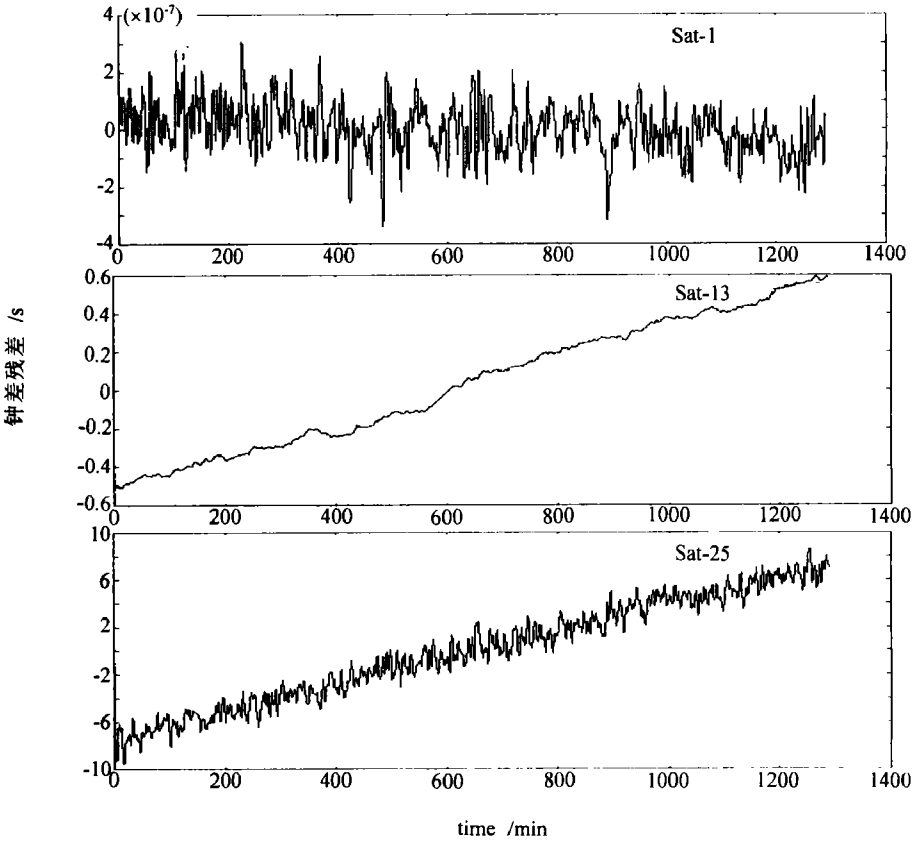

图 2　典型的 GPS 卫星钟的变化曲线

Fig.2　Typical GPS clock bias changing curve

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

根据以上算法，我们建立了相应的软件系统，利用 1993 年 2 月 8 日的全球 IGS 站的观测资料计算了各颗 GPS 卫星的钟差变化序列，每历元的钟差估算精度约为 1 ns.

在得到精密卫星钟差估值后，利用钟差估值重新计算伪距的残差，伪距残差一般在 0.5 m 的量级，已接近伪距的测量精度. 在估算中，如果通过精密钟差改正后某些跟踪站的残差异常，则需去掉这些站的观测数据后重新计算卫星钟差.

图 2 给出了 3 颗典型的 GPS 卫星的钟差在一天内的变化，它是由 1993 年 2 月 8 日的观测数据得到. 从图中曲线可看出： 1 号卫星卫星钟存在高频抖动，但钟漂较小； 25 号卫星卫星钟漂和钟的抖动均很大； 13 号卫星卫星钟既有较小的高频抖动又有一定的漂移. 把数小时的卫星钟差估计值取平均与广播星历的卫星钟差相比较，互差在 5 ns 的范围内. 把数小时的钟漂平均值与广播星历的钟漂值进行比较，在不加 SA 时，互差约为 10^{-4} ns/s; 而当 SA 作用时约为 5×10^{-3} ns/s.

4 精密卫星钟差估值应用于 TOPEX 卫星星载 GPS 几何法定轨计算

几何法星载 GPS 定轨数学模型 [3] 为

$$V_k = B\delta X_k - l, \tag{1}$$

式中 V 为改正数； $\delta X_k = (\delta \mathrm{d}t_k\ \delta X_k\ \delta Y_k\ \delta Z_k)$ 为 TOPEX 上 GPS 卫星接收机钟差和天线相位中心坐标的改正数； B 为误差方程系数：

$$B = \left(c\frac{X_k^0 - X_\mathrm{s}}{\rho^0}\ \frac{Y_k^0 - Y_\mathrm{s}}{\rho^0}\ \frac{Z_k^0 - Z_\mathrm{s}}{\rho^0}\right). \tag{2}$$

式中 c 为光速， $(X_k^0\ Y_k^0\ Z_k^0)$ 为 k 历元 TOPEX 上 GPS 接收机天线相位中心坐标近似值； $(X_\mathrm{s}\ Y_\mathrm{s}\ Z_\mathrm{s})$ 为卫星坐标，采用 GPS 卫星精密星历， L 为常数项：

$$l = \rho^{(0)} - \rho^{(\mathrm{c})} - c\mathrm{d}t_k^0 - c\mathrm{d}t_k^\mathrm{s}. \tag{3}$$

式 (3) 中的 $\rho^{(0)}$ 为经相位平滑和电离层改正的伪距观测值； $\rho^{(\mathrm{c})}$ 为由近似值算得的伪距； $\mathrm{d}t_k^0$ 为接收机钟差的近似值； $\mathrm{d}t_k^\mathrm{s}$ 为 GPS 卫星精密钟差值.

为了验证通过上述方法确定的 GPS 卫星钟差用于星载 GPS 定轨的效果，我们利用 1993 年 2 月 8 日 TOPEX 星载 GPS 采集的数据进行定轨试验，其定轨计算 R_RMS 值的变化见图 3, R_RMS 的平均值为 0.4 m. 伪距残差一般小于 1 m, 与 GPS 卫星钟差的估算精度相当.

低轨卫星应用最重要的是轨道的径向精度，把计算得到的轨道与 JPL 精密 TOPEX 轨道进行比较，其径向差值的变化见图 4, 两者差值平均为 0.9 m. 由此可见，采用本文的方法精确确定 GPS 卫星钟差，再把得到的 GPS 卫星钟差用于低轨卫星的定轨，可得到 1 m 左右的定轨精度. 几何法星载 GPS 定轨不受动力学模型的影响，受卫星轨道高度的影响很小，虽然在我们的试验中采用的数据来自位于 1 300 km 高度的 TOPEX 卫星，但这种方法也完全适用于比 TOPEX 卫星高度更低的低轨道卫星.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

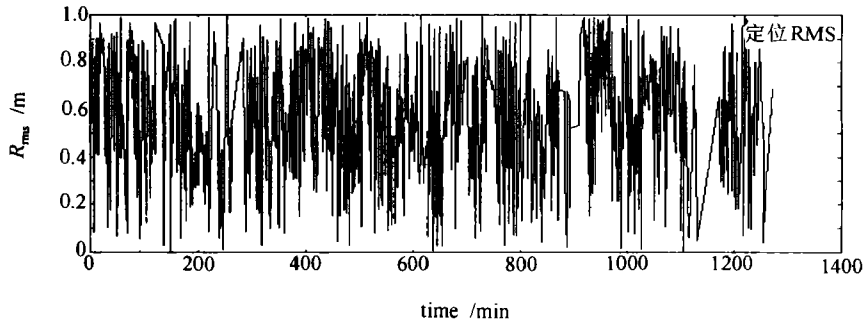

图 3　几何法星载 GPS 定轨 R_{RMS} 图

Fig.3　R_{RMS}: Geometrical method for orbit determination by satellite based GPS

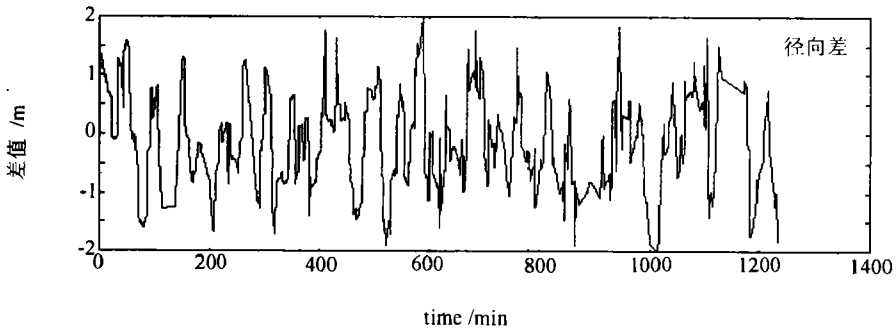

图 4　与 JPL 精密 TOPEX 轨道的径向差值比较

Fig.4　Orbit radial differences: Compare with Precision Topex orbit

6　结　　论

1) GPS 卫星钟差呈现高频率抖动，但在 GPS 接收机采样间隔内 (例如 30 s) 其变化是平稳的，这为利用一般 GPS 地面跟踪站的观测数据估算 GPS 卫星钟差提供了条件.

2) 采用合理的方法，利用 GPS 地面跟踪站的观测数据，可高精度、高密度地估算 GPS 卫星钟差的改正值，估算精度可达 1 ns，相当于伪距测量的精度.

3) 经地面跟踪站的观测数据估算的 GPS 卫星钟差，应用于低轨道卫星星载 GPS 的几何定轨，其定轨精度可达 1 m，基本满足低轨卫星的测地应用的需要.

4) 虽然本文用于分析的数据受 SA 的影响，但本文给出的数据处理方法和结论同样适用于 SA 作用强度较低或 SA 作用强度为零的情况.

参　考　文　献

[1] 朱文耀，黄珹. 我国低轨卫星定轨精度分析. 上海天文台年刊，1998: 58—67

[2] Martin Mur T J. Estimation of Precise GPS Clock Bias Values by the ESOC IGS Analysis Centere GeoForschungsZentrum Psatdam. Germany, 1995. 141—151

[3] 王解先等. GPS 动态伪距单点定位与 GDOP 的关系. 工程勘察，1998, 6:50—52

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

CALCULATE AND APPLICATION OF THE GPS SATELLITE CLOCK OFFSET

JI Shanbiao ZHU Wenyao XIONG Yongqing
(*Shanghai Observatory, The Chinese Academy of Sciences*, 200030)

Abstract

The characteristics of GPS satellite clock is analysed, and a method to calculate the satellite clock offset is given based on ground GPS station in this paper. With developed algorithm and software, one meter accuracy for low orbit satellite determination is achieved from data of ground tracking station.

Key words GPS satellite clock, Orbit determination for GPS based satellite

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com