

利用 SLR 和 GPS 双频相位平滑伪距资料测定导航卫星钟差

路晓峰¹ 贾小林² 杨志强¹

(1 长安大学地质工程与测绘工程学院,西安市南二环路中段,710054)
(2 西安测绘研究所,西安市雁塔路中段 1 号,710054)

摘 要:采用 2002 年 10 月的 SLR 和伪距实测数据计算 GPS 35 卫星的钟差,为了验证计算结果的精度,将本文计算的卫星钟差与 IGS 精密钟差进行了比较。结果表明,采用经过载波相位平滑伪距资料,可以明显提高综合利用 SLR 和伪距资料直接测定导航卫星的精度;综合利用 SLR 和 GPS 双频相位平滑伪距资料测定导航卫星钟差精度优于 0.3 ns(1 σ),测定的导航卫星钟差与实际钟差不存在系统差。
关键词:卫星激光测距;导航卫星;卫星钟差;相位平滑伪距
中图法分类号:P228.41

在卫星导航定位系统建设和系统运行维护中,时间同步是卫星导航定位系统的一个关键技术和一项基本性能,直接影响系统导航、定位和授时精度。GPS 为了提高系统时间同步精度,不仅要求各卫星钟采用高稳定性的原子钟,还要求卫星钟定期与地面系统标准时钟比对^[1],以便给出各卫星钟在比对时刻相对标准钟的钟差和钟速修正参数。在利用 GPS 地面跟踪站的微波测距资料估算 GPS 卫星钟差时^[2-4],由于测量机制的原因,很难将卫星钟差与测站钟差分离,确定卫星钟差成为一个技术难题。通常采用组差的方法获得卫星钟差,这会降低卫星钟差的确定精度,而且需要多个观测站的支持。季善标等利用全球 IGS 站的观测资料研究表明,利用 GPS 地面跟踪站的观测数据,可高精度地估算 GPS 卫星钟差的改正值,其估算精度可达 1 ns,相当于伪距测量的精度^[4]。秦显平等提出了综合利用卫星激光测距(SLR)和 GPS 伪距资料测定导航卫星钟差的方法,采用实测数据计算了 GPS 35 卫星钟差,并与 IGS 的精密钟差进行了比较,取得了较好的效果^[5],但由于伪距观测资料的精度有限,导致测定的卫星钟差精度不高。

为了提高利用 SLR 和 GPS 伪距资料评估广播星历预报钟差的精度,从数据资料的来源方面,

可以从 SLR 资料精度和 GPS 伪距资料精度两方面考虑。因为 SLR 资料本身具有很高的精度,而且主要由各激光观测站对激光数据预处理。这里仅从提高 GPS 伪距的精度出发,对伪距进行载波相位平滑。相位平滑伪距观测值的精度大约为 30~60 cm,并且低高度角的卫星观测残差变化抖动较大,精度也更低,而高度角较大的卫星观测值残差较小,变化也更为平缓^[6]。鉴于此,本文研究综合利用 SLR 和 GPS 双频相位平滑伪距资料来测定导航卫星的钟差。

1 改进型的基于 Hatch 滤波的伪距相位平滑

GPS 接收机所测得的测码伪距和载波相位伪距观测值可表示为:

$$P^j(t) = R^j(t) + I^j(t) + \epsilon_p(t) \tag{1}$$

$$\Phi^j(t) = \lambda\varphi^j(t) = R^j(t) - I^j(t) - \lambda N^j + \epsilon_p(t) \tag{2}$$

$$R^j(t) = \rho^j(t) + C[\delta T(t) - \delta t^j(t)] + \delta\phi_{\text{trop}}^j(t) \tag{3}$$

其中, $R^j(t)$ 代表历元 t 接收机至卫星 j 的几何距离加频率无关的偏差项; $I^j(t)$ 为测码伪距 $P^j(t)$ 的电离层延迟,而相位伪距 $\Phi^j(t)$ 的电离层延迟

为 $-I^j(t)$; N^j 为整周模糊度; $\delta T(t)$ 、 $\delta t^j(t)$ 分别为时刻 t 的接收机钟差和卫星 j 的钟差; ϵ 为测量噪声。

若在相邻两个历元 t_{k-1} 、 t_k 之间对 GPS 载波相位测量值求差,可消除对卫星 j 作载波相位测量的整周模糊度(前提是两个历元之间没有发生周跳),表示为:

$$\Delta\Phi_{t_k,t_{k-1}}^j = \Phi^j(t_k) - \Phi^j(t_{k-1}) = \Delta R_{t_k,t_{k-1}}^j - \Delta I_{t_k,t_{k-1}}^j + \Delta\epsilon_\Phi(t_{k-1},t_k) \quad (4)$$

在相邻两个历元 t_{k-1} 、 t_k 之间,对 GPS 测码伪距测量值求差,可得到:

$$\Delta P_{t_k,t_{k-1}}^j = P^j(t_k) - P^j(t_{k-1}) = \Delta R_{t_k,t_{k-1}}^j + \Delta I_{t_k,t_{k-1}}^j + \Delta\epsilon_P(t_{k-1},t_k) \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),则得相位平滑伪距的计算公式为:

$$\bar{P}^j(t_k) = P^j(t_{k-1}) + \Delta\Phi_{t_k,t_{k-1}}^j + 2\Delta I_{t_k,t_{k-1}}^j \quad (6)$$

由于双频消电离层组合观测量 P_{LC}^j 和 Φ_{LC}^j 消除了电离层延迟影响,所以其相位平滑伪距的计算公式可表示为:

$$\bar{P}_{LC}^j(t) = P_{LC}^j(t_{k-1}) + \Delta\Phi_{t_k,t_{k-1}}^j \quad (7)$$

处理多历元数据时,可采用非发散的 Hatch 滤波公式:

$$\bar{P}_{LC}^j(i) = \frac{1}{i}P_{LC}^j(i) + \frac{i-1}{i}[\bar{P}_{LC}^j(i-1) + \Delta\Phi_{t_i,t_{i-1}}^j]\bar{P}_{LC}^j(1) = P_{LC}^j(1) \quad (8)$$

式中, $P_{LC}^j(i)$ 为历元 i 的消电离层组合伪距观测量; $\bar{P}_{LC}^j(i-1)$ 为历元 $i-1$ 的平滑伪距值。

本文在式(8)的 Hatch 滤波公式基础上,对定权方法进一步改进。目前大多都是按照高度角进行加权,只是在加权的经验公式上略有不同。在实际解算中,根据卫星高度角 e_k 确定当前观测值的权 $p_k = \sin^2 e_k$,则平滑伪距的递推公式为:

$$\bar{P}_{LC}^j(i) = \frac{p_i}{\sum_1^i p_k}P_{LC}^j(i) + \left[1 - \frac{p_i}{\sum_1^i p_k}\right] \cdot (\bar{P}_{LC}^j(i-1) + \Delta\Phi_{t_i,t_{i-1}}^j)\bar{P}_{LC}^j(1) = P_{LC}^j(1) \quad (9)$$

2 综合利用 SLR 和 GPS 资料测定卫星钟差的原理和方法

SLR 的原理是通过精密测定激光脉冲从测站到装有激光反射器卫星的往返时间间隔 τ 而得到某一时刻测站到卫星的距离 $\rho^{[7]}$:

$$\rho = c\tau/2 \quad (10)$$

式中, c 为光速。

GPS 采用单程测量传播延迟的测距原理,所

以,要准确测定卫星至观测站的距离,就必须使卫星钟与用户接收机钟保持严格同步,这在实践中很难实现^[8,9]。由于卫星钟和接收机钟不同步,所以,GPS 得到的观测量是含有两个时钟钟差的伪距(观测量),它等于所测卫星到接收机的距离加两个钟差的修正^[8,9]。忽略延迟改正,有:

$$\rho' = \rho + c\Delta t_R - c\Delta t_S \quad (11)$$

式中, ρ' 为伪距观测量; ρ 为卫星到接收机的距离(不含有钟差的星地距); Δt_R 为接收机钟差; Δt_S 为卫星钟差。

SLR 可以直接测定卫星到观测站的距离,且不含钟差信息。如果卫星激光测距仪和 GPS 接收机采用相同的时钟,在同一位置同一时刻各自测得卫星到观测站的距离,则由式(11) 可得:

$$\Delta t_S = (\rho - \rho' + c\Delta t_R)/c \quad (12)$$

由式(12)可以看出,只要观测站同时具有 SLR 资料和伪距资料,并且知道测站钟差(如通过外接频标的方式得到),就可以直接获得卫星钟差。利用 SLR 和伪距资料确定导航卫星的卫星钟差时,必须对 SLR 和伪距资料进行处理,包括两种观测资料的记录时刻同步,两种观测资料的误差修正,以及 GPS 接收机与 SLR 测距仪的归心改正。

对 SLR 和伪距资料进行处理的过程在文献[5]中有详细说明。在观测资料的记录时刻同步中,卫星坐标可以采用广播星历或者精密星历计算,文献[5]采用卫星的广播星历计算卫星概略位置,本文由卫星的精密星历得到卫星的概略位置。

3 计算与分析

实验数据采用 2002 年 10 月 WTZR 和 GRAZ 观测站的观测数据。这是因为在 2002 年 10 月的观测中,所有 SLR 与 IGS 并址观测站(按照在 ITRF 2000 坐标系中两者的距离不超过 100 m 来确定),只有 WTZR、GRAZ 和 CODE 观测站同时具有 SLR 和 GPS 观测资料,但 CODE 的 SLR 标准点数据仅有 4 个,其中 SLR 观测数据是来自美国 NASA 的标准点数据,该数据是通过原始观测数据进行预处理生成的间隔为 5 min 的标准点。GPS 观测数据来自 IGS 数据中心,其数据时间间隔为 30 s。WTZR 和 GRAZ 两个测站在 ITRF 2000 中的坐标以及在 2002 年 10 月期间,两个观测站 GPS 35 卫星的 SLR 观测资料情况具体见文献[5]及表 1。

表 1 SLR 观测资料情况

Tab. 1 The Number and Observation Time of SLR Data

日期	观测站	SLR 观测起止时间	SLR 标准点数
10. 1	WTZR		0
(274)	GRAZ	17:22-17:51	7
10. 8	WTZR	15:29-15:57	6
(281)	GRAZ	17:37-17:47	3
10. 20	WTZR	15:43-16:13	7
(293)	GRAZ		0
10. 28	WTZR	14:53-15:45	12
(301)	GRAZ	15:03-15:57	12

实验计算时,首先采用式(12)得到每个 SLR 观测时刻的卫星钟差,然后将 IGS 提供的精密卫星钟差和测站钟差进行内插(同样采用拉格朗日内插公式),得到相应于 SLR 观测时刻的卫星钟差,最后将本文计算的卫星钟差与 IGS 提供的卫星钟差进行直接比较。表 2、表 3 分别给出了两者的比较结果。图 1、图 2 分别表示 GRAZ、WTZR 站平滑前后的效果图。采用 2 种比较方案:① 采用 SLR 和未经过平滑的伪距资料;② 采用 SLR 和经过载波相位平滑的伪距资料。

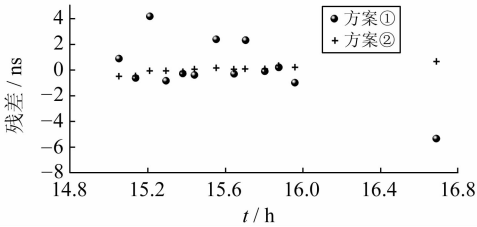


图 1 GRAZ 站的 GPS35 卫星钟差残差图
Fig. 1 Residual of GPS35 Satellite Clock Bias in GRAZ

1) 从表 2 可看出,利用 SLR 和未经过平滑的伪距资料,在所有的计算结果中,仅有 10 月 8 日 GRAZ 卫星钟差与 IGS 精密卫星钟差之差有较大的系统差,这可能是由于该站 SLR 观测资料稀少(仅有 3 个标准点)的缘故,其他计算结果没有明显的系统差。

2) 在所有的计算结果中,方案①的计算结果误差最大达到了 2. 157 ns,其他计算结果均接近 1. 5 ns。考虑到该结果不仅包含计算的卫星钟差误差,还有 IGS 卫星钟差误差,因此可以说伪距与卫星激光测距比对计算的卫星钟差精度可以达到 1. 5 ns(1σ)。

3) 比较表 2 和文献[5]的表 3,在所有的计算结果中,精度统计大致一致,但略有不同,这是由于两者计算卫星位置采用的星历不同,文献[5]采用广播星历计算卫星位置,本文采用的是精密星历。精度统计一致也说明,无论采用广播星历还

表 2 方案①比较结果

Tab. 2 Summary Statistics of Differences

Using Method ①					
日期		最大值/ns	最小值/ns	平均值/ns	中误差/ns
274	GRAZ	0. 768	-2. 493	-0. 676	1. 222
281	WTZR	2. 086	-4. 485	-0. 022	2. 120
	GRAZ	2. 379	0. 189	1. 456	1. 726
293	WTZR	1. 606	-2. 008	-0. 219	1. 104
	WTZR	2. 452	-0. 612	0. 238	0. 817
301	GRAZ	4. 193	-5. 338	0. 096	2. 157

表 3 方案②比较结果

Tab. 3 Summary Statistics of Differences

Using Method ②					
日期		最大值/ns	最小值/ns	平均值/ns	中误差/ns
274	GRAZ	0. 427	-0. 208	-0. 057	0. 214
	WTZR	0. 439	0. 077	0. 248	0. 273
281	GRAZ	0. 453	-0. 107	0. 099	0. 270
293	WTZR	0. 333	-0. 149	0. 086	0. 164
	WTZR	0. 310	0. 027	0. 191	0. 209
301	GRAZ	0. 680	-0. 494	0. 045	0. 301

图 1 表示 2002 年第 301 天 GRAZ 站平滑前后利用 SLR 和伪距计算的 GPS35 卫星钟差残差图;图 2 表示 2002 年第 301 天 WTZR 站平滑前后利用 SLR 和伪距计算的 GPS35 卫星钟差残差图。

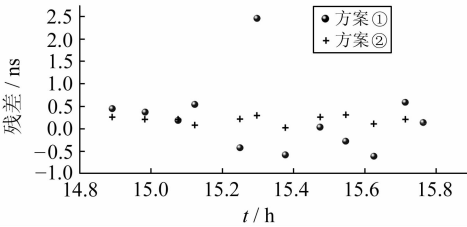


图 2 WTZR 站的 GPS35 卫星钟差残差图
Fig. 2 Residual of GPS35 Satellite Clock Bias in WTZR

是 IGS 精密星历,对于伪距与卫星激光测距比对计算的卫星钟差精度均不会引起太大变化。

4) 从表 3 可以看出,利用 SLR 和经过平滑的伪距资料,在所有的计算结果中,均没有明显的系统差,计算结果均接近于 0. 3 ns。考虑到该结果不仅包含计算的卫星钟差,而且还有 IGS 星地钟差误差,因此可以说,基于载波相位的平滑伪距与卫星激光测距比对计算的卫星钟差精度优于 0. 3 ns(1σ)。

5) 比较表 2 和表 3 可知,方案②明显优于方案①,这是因为对伪距观测量进行载波相位平滑消除了某些异常噪声,提高了伪距的精度。

6) 基于 GPS 载波相位的平滑伪距与卫星激光测距比对计算的卫星钟差精度可以达到 0. 3 ns(1σ),因此认为该方法计算的卫星钟差评定广播星历的预报钟差是可行的。

4 结 语

1) 利用 SLR 和伪距资料可以直接测定导航卫星钟差,其精度优于 $1.5\text{ ns}(1\sigma)$;测定的导航卫星钟差与实际的卫星钟差不存在系统差。

2) 利用 SLR 和伪距资料测定导航卫星钟差的过程中,采用载波相位平滑伪距可提高伪距的观测精度和卫星钟差的计算精度,因此,在卫星钟差的测定中应该对伪距观测量进行平滑处理。

3) 基于载波相位的平滑伪距与卫星激光测距比对计算的卫星钟差精度可以达到 $0.3\text{ ns}(1\sigma)$ 。相比直接使用 SLR 和未经平滑的伪距,有效提高了卫星钟差的计算精度,同样不存在系统差。

参 考 文 献

[1] 于国强. 导航与定位[M]. 北京:国防工业出版社, 2000

[2] James P C, Everentt R S, Frank M. Improvement of the NIMA Precise Orbit and Clock Estimates[R]. Nashville Tennessee: ION GPS, 1998

[3] Timon A S. Modeling and Validating Orbits and Clocks Using the Global Positioning System[D]. Berne: University of Berne, 1999

[4] 季善标, 朱文耀, 熊永清. 精密 GPS 卫星钟差的改正和应用[J]. 空间科学学报, 2001, 21(3): 42-48

[5] 秦显平, 杨元喜, 焦文海, 等. 利用 SLR 和伪距资料确定导航卫星钟差[J]. 测绘学报, 2004, 33(3): 205-209

[6] 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2002

[7] 沈镜祥, 施品浩, 刘基余, 等. 空间大地测量[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990

[8] 周忠谟, 易杰军, 周琪, 等. GPS 测量原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1992

[9] 许其凤. GPS 卫星导航与精密定位[M]. 北京: 解放军出版社, 2000

[10] 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京: 解放军出版社, 1995

[11] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型[M]. 北京: 测绘出版社, 1998

第一作者简介: 路晓峰, 硕士生, 研究方向为空间大地测量。
E-mail: lxf_9@sohu.com

Determination of Navigation Satellite Clock Bias Using SLR and GPS Dual Frequency Phase-Smoothed Pseudo-Range Data

LU Xiaofeng¹ JIA Xiaolin² YANG Zhiqiang¹

(1 Institute of Geoen지니어ing and Surveying, Chang'an University, South Erhuan Road, Xi'an 710054, China)
(2 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, 1 Middle Yanta Road, Xi'an 710054, China)

Abstract: The bias of GPS35 satellite clock is computed by using the data observed on October 2005. The results compared with the GPS 35 clock bias of IGS. By comparison and analysis, the following facts can be drawn: ① It improves the precision of pseudo-range using phase smoothing pseudo-range, and improves the precision of satellite clock bias when the clock bias is calculated by using SLR and smoothed pseudo-ranges data. ② The precision of navigation satellite clock bias is better than $0.3\text{ nanosecond}(1\sigma)$, when the bias is calculated by using SLR data and smoothed pseudo-ranges data. There is no systematic error between our results and IGS's clock bias.

Key words: satellite laser ranging (SLR); navigation satellite; satellite clock bias; carrier phase smoothed pseudo-range

About the first author: LU Xiaofeng, postgraduate, majors in space geodesy.
E-mail: lxf_9@sohu.com