一种同频点的卫星接收机时延确定方法

钦伟瑾[1,2],杨旭海[1,2]
(1.中国科学院国家授时中心,陕西西安 710600; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 本文提出了一种Galileo E5*x*硬件时延计算方法.当同频点的两颗卫星非常接近时,它们的电离层时延几乎相等.基于此原理,借助GPS和Galileo卫星端的绝对校准值,当角距为2°,5°,10°时,选择高度角为10°,20°,40°,60°的不同类型的Galileo卫星观测值进行试算,实现Galileo接收机E5*a*频点的校准.结果表明:校准值的结果和高度角成正相关,和Galileo卫星类型以及接收机类型无关;此外,在低纬度区域,当角距小于10°时,角距的变化对校准结果几乎没有影响.

关键词: Galileo;群时延;硬件时延;时间方差
基金项目: 中国科学院青年创新促进会项目(No.2019398);中国科学院西部青年学者项目(No.XAB2019A06)
中图分类号: P227;P228;TN959.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2023)02-0324-06
电子学报URL:http://www.ejournal.org.cn **DOI:**10.12263/DZXB.20210102

The Determination on Satellite Receiver Delay with the Same Frequency

QIN Wei-jin[1,2], YANG Xu-hai[1,2]
(1. *National Time Service Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710600, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: An approach for the calibration of Galileo signals is achieved in this paper. Because of the same frequency in GPS L1 and Galileo E1, when the observed GPS satellite and the Galileo satellite are very close, the ionospheric delay of GPS L1 is considered the same as that of Galileo. Based on the theory, by virtue of the known GPS L1 and Galileo E1 calibration value, when the he calibration value of Galileo E5x has been obtained. When the angular separation is 2°, 5° and 10°, the Galileo satellite of different type with the elevation of 10°,20°,40°,60°has been selected for the verification. The result shows, the calibration value is depended on the chosen elevation threshold, which is irrelative to the type of the Galileo satellite and the receiver type. In the low-latitude area, when the angular separation is less than 10°, the variation of angular separation has no influence with the calibration result.

Key words: Galileo; total group delay; hardware delay; time variance
Foundation Item(s): Youth Promotion Committee of the Chinese Academy of Sciences (No.2019398); "CAS Light of West China" Program of the Chinese Academy of Sciences (No.XAB2019A06)

1 引 言

从20世纪80年代起,全球卫星导航系统信号开始用于精密授时和时间传递[1].导航信号用于时间服务需要事先确定接收机内部所有信号的电子延迟,这个过程即为接收机校准[2].随着多卫星导航系统的逐渐成熟,以及国际计量局的需求,Galileo和BDS也有望纳入UTC(Coordinated Universal Time)计算[3].在新的卫星导航系统参与时间计算前,接收机电子信号时延的确定是首要工作.

接收机硬件时延的测定可分为绝对测定和相对测定[4~6].绝对测定是利用高精度的全球卫星导航系统信号模拟器在微波暗室下直接对接收机进行测量.目前,国际计量局已经对GPS接收机进行了该方面的工作.2017年起俄罗斯国家技术物理及无线电工程研究院对GLONASS接收机也进行了相应的工作.然而很多守时实验室中并没有这种复杂的设备,校准方案不宜推广.相对校准一般指将已校准硬件时延的接收机与未校准的接收机进行共址同钟观测,利用已校准接收机对未校准接收机进行相对校准测定.但已有的相对校准一般指同一个卫星导航系统信号之间的接收机相对测定.国内外学者用便携式GPS相对标定方法对多条时间传递链路进行校

收稿日期:2021-01-12;修回日期:2021-09-22;责任编辑:王天慧

准,明显降低了比对链路的不确定度;还有部分学者比较了接收机校准和链路校准的区别,设计了有针对性的校准方案. 国际权度局于2013年起开展了GPS PPP比对链路的校准活动,降低了链路的不确定度,提高了守时性能. 本文介绍了一种新的校准方法,该方法不需要参考到GPS链路,基于GPS L1和Galieo E1两个信号复用同一频率的特点,其他GNSS信号校准是考虑到GPS链路,在广播星历群时延已知的情况下,利用已经校准过的接收机端的GPS L1和L2的时延,对接收机Gallieo E5通道进行相对标定,并准确得到了接收机Gallieo E5通道时延. 不同观测条件以及不同观测时间段数据的计算结果证明,该方法准确、稳定,为伽利略接收机的校准提供了一种重要的方法.

2　Galileo接收机信号时延校准原理

如图1所示,GPS L1和Galileo E1两个频率都是1 575.42 MHz[8,9],尽管码调制的方式略有不同,仍然可以认为Galileo接收机E1的硬件延迟和GPS接收机L1的硬件延迟是一致的. 此外,天线射频滤波器的带宽远大于接收机射频滤波器带宽,因此GPS L1和Galileo E1接收机端时延相等的结论也同样适用于接收机天线.

当GPS和Galileo卫星角距很小的时候,利用电离层相等构成等式关系,在GPS P1和GPS P2接收机硬件延迟已知的基础上,代入卫星端的绝对校准值,得到Galileo E5x(a,b, AltBoc)的硬件延迟[10].

GPS广播星历播发的群时延(Total Group Delay, TGD)是绝对校准值. 获取绝对校准值的方式有两种:一是卫星发射前进行绝对校准;二是用绝对校准过的测站对卫星进行绝对校准. 需要指出的是,Galileo广播星历播发的群时延(Broadcast Group Delay,BGD)值不是绝对测量得到的,而是约束在零均值条件下的,需要通过码间偏差(Differential Code Biases,DCB)转换得到绝对值.

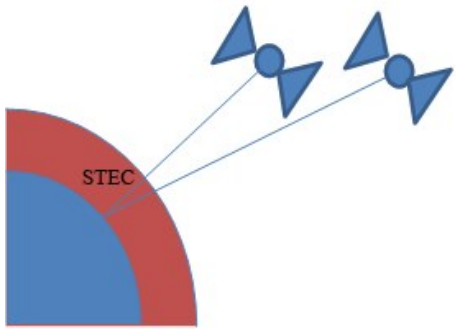

图1　电离层示意图

电离层折射引入电子信号延迟一阶项表示为[11]

$$I(f_i)=\frac{1}{c}\times 40.3\times\frac{\mathrm{STEC}}{f_i^2} \tag{1}$$

电离层时延单位为s. c是光速;f是信号频率;i,j表示不同的频点,STEC(Slant Total Electronic Content)是倾斜总电子含量.

$$I(f_j)=\frac{1}{c}\times 40.3\times\frac{\mathrm{STEC}}{f_j^2} \tag{2}$$

将式(1)代入式(2)得到

$$I(f_i)=\frac{I(f_j)f_j^2}{f_i^2} \tag{3}$$

星地伪距公式为[7]

$$\rho_i=r+t_r-t^s+I(f_i)+\mathrm{Tro}+\delta P_{i,\mathrm{rec}}+\delta P_{i,\mathrm{sat}}+\varepsilon_i \tag{4}$$

$$\rho_j=r+t_r-t^s+I(f_j)+\mathrm{Tro}+\delta P_{j,\mathrm{rec}}+\delta P_{j,\mathrm{sat}}+\varepsilon_j \tag{5}$$

其中,$I(f_i)$是频率i的电离层时延,$I(f_j)$是频率j的电离层时延;ρ_i是伪距观测值;r是星地距离;t_r是接收机钟差;t^s是卫星钟差;Tro是对流层时延;$\delta P_{i,\mathrm{rec}}$表示接收机端硬件延迟;$\delta P_{i,\mathrm{sat}}$表示卫星端硬件延迟;$\varepsilon_i$是随机噪声.

将式(3)代入式(4)和式(5)互差后的结果,可表示为

$$\begin{aligned}\rho_j-\rho_i&=I_j-I_i+(\delta P_{j,\mathrm{rec}}-\delta P_{i,\mathrm{rec}})+(\delta P_{j,\mathrm{sat}}-\delta P_{i,\mathrm{sat}})\\&=I(f_i)\frac{f_i^2-f_j^2}{f_j^2}+(\delta P_{j,\mathrm{rec}}-\delta P_{i,\mathrm{rec}})+(\delta P_{j,\mathrm{sat}}-\delta P_{i,\mathrm{sat}})\end{aligned} \tag{6}$$

即

$$I(f_i)=\frac{f_j^2}{f_i^2-f_j^2}\left[\frac{1}{c}(\rho_j-\rho_i)-(\delta P_{j,\mathrm{rec}}-\delta P_{i,\mathrm{rec}})-(\delta P_{j,\mathrm{sat}}-\delta P_{i,\mathrm{sat}})\right] \tag{7}$$

式(7)中,卫星端和接收机端差分硬件延迟也可称为码间偏差,是同一时刻不同频率的伪码观测量之间的时间偏差造成的,是和电离层总电子含量图同时确定的[8]. GPS接口文件中给出卫星端P1和P2两频点的差分硬件时延和群时延的函数关系,即相差一个和频率相关的系数,用户从广播星历中获取TGD参数. 可表示为

$$\mathrm{TGD}(i,j)=-\frac{f_j^2}{f_i^2-f_j^2}(\delta P_{i,\mathrm{sat}}-\delta P_{j,\mathrm{sat}}) \tag{8}$$

GPS L1, L2双频消电离层计算公式为

$$\begin{aligned}I(f_1,\mathrm{GPS})=\frac{f_2^2}{f_1^2-f_2^2}\Big[&\frac{1}{c}(\rho_2-\rho_1)\\&-(\delta P_{2,\mathrm{rec}}-\delta P_{1,\mathrm{rec}})-(\delta P_{2,\mathrm{sat}}-\delta P_{1,\mathrm{sat}})\Big]\end{aligned} \tag{9}$$

Galileo E1, Galileo E_{5x}双频消电离层计算式为

$$\begin{aligned}I(f_1,\mathrm{Galileo})=\frac{f_{5x}^2}{f_1^2-f_{5x}^2}\Big[&\frac{1}{c}(E_{5x}-E_1)-(\delta E_{5x,\mathrm{rec}}-\delta E_{1,\mathrm{rec}})\\&-(\delta E_{5x,\mathrm{sat}}-\delta E_{1,\mathrm{sat}})\Big]\end{aligned} \tag{10}$$

结合式(9),式(10)可以得到Galileo E_{5x}时延式为

$$\delta E_{5x,\mathrm{rec}}=\left[\frac{1}{\mathrm{c}}(E_{5x,\mathrm{rec}}-E_1)+\delta E_{1,\mathrm{rec}}\right]-\frac{f_1^2-f_{5x}^2}{f_{5x}^2}\cdot\frac{f_2^2}{f_1^2-f_2^2}\left[\frac{1}{\mathrm{c}}(P_2-P_1)-(\delta P_{2,\mathrm{rec}}-\delta P_{1,\mathrm{rec}})\right]+\frac{f_1^2-f_{5x}^2}{f_{5x}^2}(\mathrm{BGD}(E_1,E_{5x})-\mathrm{TGD}) \tag{11}$$

本文用到的在轨卫星E11，E12，E19的DCB值是由欧空局提供的，BGD和DCB转换公式如下：

$$\mathrm{BGD}(E_1,E_{5a})=(\mathrm{DCB}_{\mathrm{initial},\ E_1-E_{5a}}-1.57)\times(-1.26) \tag{12}$$

由式(8)、式(11)和式(12)计算得到Galileo E5a时延值.

3 校准方案

数据来自于德国物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt，PTB)时间频率组的GTR51接收机. 接收机目前提供GPS，GLONASS，Galileo三系统数据. 为了验证方法的稳定性和可靠性，本文选取了2014年7月和2016年7月共两个月的数据. PTB所在的城市布伦瑞克经度为52度，纬度为11度，属于低纬度区域.

测试方案需要确定两个参数. 一是GPS卫星和Galileo卫星的角距. 角距太小，GPS和Galileo只有很少的观测值能够使用，角距太大，对于GPS和Galileo来说信号传播路径不够准确，影响校准结果的稳定性. 本文设为2°，5°和10°. 二是卫星高度角的选择. 本文设为10°，20°，40°，60°. 在数据采集期间，测试条件均为正常，没有受到明显的电磁风暴影响. E20卫星测试期间存在异常，只有E11，E12和E19参与计算. PTB的GTR51接收机只提供E5a的观测值，在此只能计算E5a信号时延.

4 结果分析

图2~图5给出的是2016年7月每天所有历元校准值的平均值的结果图. 可以看到，在相同角距的情况下，随着高度角的增加，由3颗卫星得到的E5a时延的离散程度越来越小，E19相比E11和E12结果更为发散.

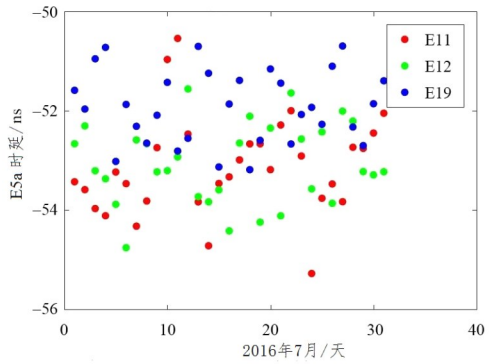

图2 高度角为10°时Galileo时延结果

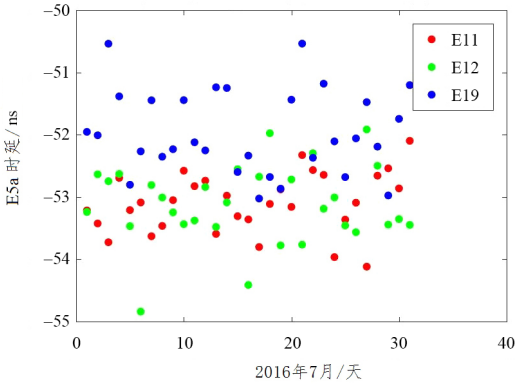

图3 高度角为20°时Galileo时延结果

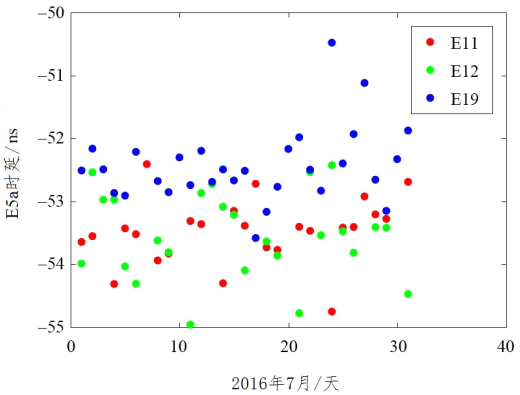

图4 高度角为40°时Galileo时延结果

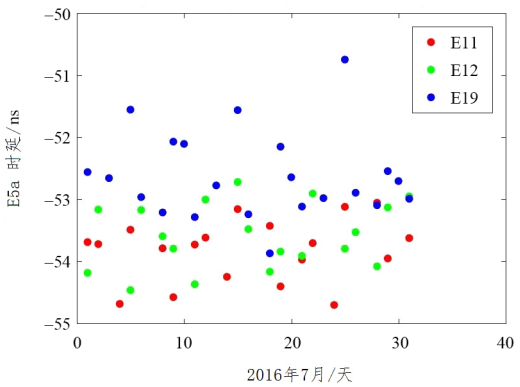

图5 高度角为60°时Galileo时延结果

为了验证本算法的稳定性，特选取了2016年5月8日(年积日129)发生电磁风暴期间和不受电磁风暴干扰期间(年积日128和130)共计3天的结果加以比较. 图6中，红色表示E11，绿色表示E12，蓝色表示E19.

由图6可以看出，所有结果没有异常，该算法表现

出极好的普适性.

为了进一步说明问题,表1和表2详细列出了不同年份、不同角距和不同卫星计算得到的E5a校准值的标准差.

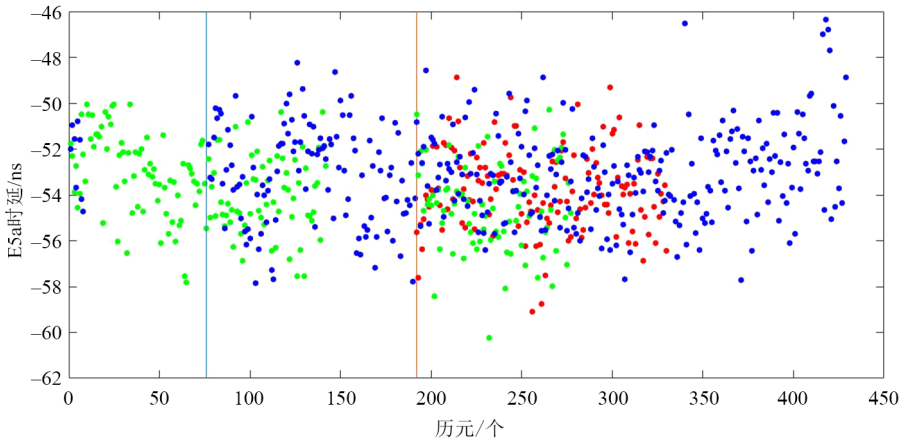

图6　电磁风暴与非电磁风暴期间校准结果

表1　角距2°时不同高度角获得的校准值的标准差　　单位:ns

高度角	高度角(2014年)				高度角(2016年)			
	10°	20°	40°	60°	10°	20°	40°	60°
E11	6.6	4.5	2.5	1.9	6.6	4.5	2.5	1.9
E12	5.2	4.4	2.6	1.9	5.2	4.4	2.6	1.9
E19	5.6	4.8	2.5	2.1	5.6	4.8	2.5	2.1

表2　角距5°时不同高度角获得的校准值的标准差　　单位:ns

高度角	高度角(2014年)				高度角(2016年)			
	10°	20°	40°	60°	10°	20°	40°	60°
E11	7.3	4.8	2.4	1.8	6.8	4.6	2.5	1.8
E12	7.6	4.9	2.3	1.9	5.9	4.6	2.6	1.8
E19	7.5	4.9	2.4	1.8	5.6	4.4	2.5	2.1

表3　角距10°时不同高度角获得的校准值的标准差　　单位:ns

高度角	高度角(2014年)				高度角(2016年)			
	10°	20°	40°	60°	10°	20°	40°	60°
E11	7.5	5.3	2.5	1.8	6.6	4.5	2.5	1.9
E12	7.6	5.5	2.4	1.8	5.2	4.4	2.6	1.9
E19	7.8	5.4	2.6	1.8	5.6	4.8	2.5	2.1

当角距为2°时,如表1所示,不同年份的校准值完全一样. 当角距为5°时,如表2所示,同一高度角最大偏差为25%. 当角距为10°时,如表3所示,同一高度角最大偏差为28%. 由表1~表3可知,无论2014年还是2016年,校准值的标准差都是随着卫星高度角的增加而减小,和卫星类型无关,三颗卫星获得结果的标准差一致. 两颗卫星非常接近,对流层等传播路径上的误差几乎可以完全抵消,只剩下接收机端的误差. 多路径误差是接收机端重要的误差源之一,与星地距离、卫星信号的传播方向等有关[13]. 一般情况下,多路径效应的大小和高度角密切相关. 高度角越大,受干扰越小,多路径效应越小,校准结果的稳定性也就越好. 本文后续研究均以60°高度角进行计算.

由图7可以看出,样本数量随着角距的增加而增加. 角距范围设定大,匹配上的卫星观测值多,计算得到的样本数量也多. 随之而来的问题在于随着角距的增加,两颗卫星受到的电离层时延发生变化,影响校准结果的准确性. 角距范围设定小,可用卫星的观测值过少. 基于此考虑,本文后续研究角距设定为5°.

表4是高度角为60°、角距为5°的校准值的时间方差[14]. 当采样时间为1天时,校准值的最大偏差为3.51%,当采样时间为2天时,校准值的最大偏差为10.53%. 随着时间长度的增加,校准值的时间序列很稳定,能够用于时间服务.

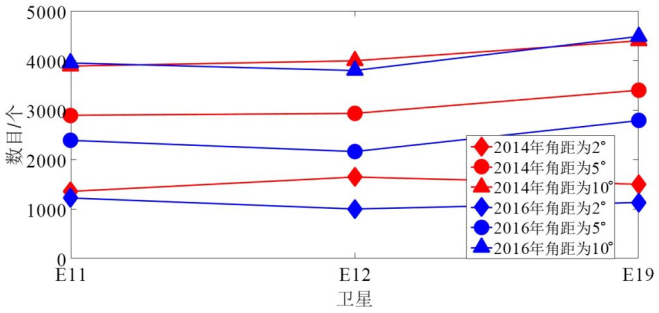

图7 不同情况下样本数量统计

表4 Galileo卫星时间方差一览表

Averaging time		E11(E-10)	E12(E-10)	E19(E-10)
2014年	86 400	5.42	5.91	1.30
	172 800	3.23	4.65	4.71
	345 600	2.60	2.07	
2016年	86 400	5.61	5.95	1.31
	172 800	3.51%	0.68%	0.77%
		3.57	4.87	4.75
		10.53%	4.73%	0.85%
	345 600	2.65	2.17	

图8的柱状图描述的是高度角为60°的情况下计算得到的所有校准值的平均值. 3颗卫星在不同角距不同时段计算得到的校准值差异很小. 3颗卫星的校准值约为53 ns,除此以外,不同角距的校准结果表现出了很好的一致性. 2014年7月计算结果的峰峰值为0.72 ns, 0.86 ns, 1.09 ns, 2016年7月计算结果的峰峰值为0.86 ns, 1.03 ns和1.25 ns. 可以看到,校准结果和测试卫星类型无关. 最终Galileo E5*a*时延值的确定是对高度角为60°时所有角距为2°的校准值取平均.

考虑到本方法的普适性,利用同样来自PTB守时实验室的SEPTENTORI接收机进行试算.

表5中给出了两台接收机校准值的rms,量级相当,不同卫星峰峰值的差异在1 ns以内,最大偏差为31%,足以说明该方法适用于不同类型接收机.

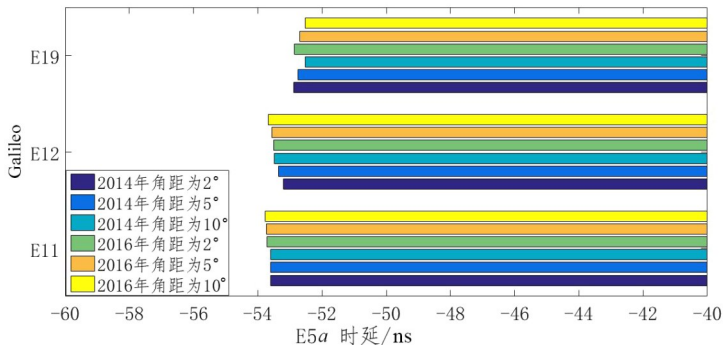

图8 不同情况下校准值统计

表5 在高度角为60°时不同角距获得的校准值的 单位:ns

角距(°)	角距(SEPTENTORI)			角距(GTR51)		
	2°	5°	10°	2°	5°	10°
E11	2.48	2.60	2.73	2.48	2.64	1.88
E12	2.64	2.01	1.88	2.60	2.01	1.81
E19	1.88	1.81	1.72	2.73	1.88	1.72

4 结论

本文在GPS两个频点时延值已知的基础上,基于电离层相等的特性,利用GPS广播星历播发的群时延和欧空局提供的码间偏差确定Galileo E5*x*(a, b, Alt-Boc)硬件时延. 结果表明:校准值的结果和所选卫星类型无关;校准值的标准差随着高度角的增加而变小;在低纬度区域,测试的Galileo卫星在不同角距(小于10°)时的校准结果表现出很好的一致性. 校准结果还与测试时间和接收机类型无关.

基于全球卫星导航系统兼容互操作的趋势,未来北斗B1和GPS L1共频点,该方法同样可以推广到北斗接收机相对校准.

参考文献

[1] ALLAN D W, THOMAS C. Technical directives for standardization of GPS time receiver software: To be implemented for improving the accuracy of GPS common-view time transfer[J]. Metrologia, 1994, 31(1): 69-79.

[2] 李孝辉, 刘阳, 张慧君, 等. 基于UTC(NTSC)的GPS定时接收机时延测量[J]. 时间频率学报, 2009, 32(1): 18-21.
LI X H, LIU Y, ZHANG H J, et al. Measurement of time delay of GPS timing receiver of UTC(NTSC) [J]. Journal of Time and Frequency, 2009, 32(1): 18-21. (in Chinese)

[3] GUANG W, DONG S W, WU W J, et al. Progress of BeiDou time transfer at NTSC[J]. Metrologia, 2018, 55(2): 175-187.

[4] CIBIEL G, PROIA A, YAIGRE L, et al. Absolute calibration of geodetic receivers for time transfer: Electrical delay measurement, uncertainties and sensitivities[C]//The 22nd European Frequency and Time Forum. Toulouse: IEEE, 2008:1904-1911.

[5] PETIT G, JIANG Z, UHRICH P. Differential calibration of Ashtech Z12-T receivers for accurate time comparisons [C]//The 14th European Frequency and Time Forum. Torino: IEEE, 1999: 941-949.

[6] 朱峰, 李孝辉, 张慧君. 基于钟驾驭模式的定时接收机绝对校准[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 1946-1954.
ZHU F, LI X H, ZHANG H J. Absolute calibration of timing receiver based on clock-steering model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9): 1946-1954. (in Chinese)

[7] FELDMANN. Advances in GPS Based Time and Frequency Comparison for Metrological Use[D]. Hannover: Leibniz University, 2011.

[8] JIANG Z, CZUBLA A, NAWROCKI J, et al. Comparing a GPS time link calibration with an optical fiber self-calibration with 200ps accuracy[J]. Metrologia, 2015, 52(2): 384-391.

[9] DEFRAIGNE P, AERTS W, HARMEGNIES A, et al. Advances in multi-GNSS time transfer[C]// The 27th European Frequency and Time Forum. Brague: IEEE, 2013: 508-512.

[10] GPS space segment Navstar. Global Positioning Systems Directorate systems engineering&integration interface specification IS-GPS-800D [R/OL]. (2013-09-24) [2021-01-12]. http://everyspec.com/MISC/IS-GPS-800D_53533.

[11] Navstar Galileo space segment. European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document [R/OL]. (2010-09-01) [2021-01-12]. https://op. europa. eu/en/publication-detail/-/publication/671e6b55-a32e-49fb-980b-78a2791cabcf/language-en.

[12] DEFRAIGNE P, AERTS W. Calibration of galileo signals for time metrology[J]. UFFC, 2014, 61(12): 1967-1974.

[13] PARKINSON B W, SPILKER J. Global Positioning System: Theory and Application[M]. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996: 100-103.

[14] 李征航, 黄劲松. GPS测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006: 116-118.

[15] 宋小勇, 杨志强, 焦文海,等. GPS接收机码间偏差DCB的确定[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(1): 127-131.
SONG X Y, YANG Z Q, JIAO W H, et al. The design of a robust stabilizing controllers for uncertain systems[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(1): 127-131. (in Chinese)

[16] 郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2006.

作者简介

钦伟瑾　女,1983年生,河南南阳人. 理学博士,副研究员,硕士研究生导师,德国物理研究院时间频率部国家公派访问学者. 国际天文学会会员和中国天文学会会员. 近年来多次主持国家自然基金项目、技术基础科研项目以及中科院人才项目等. 主要从事GNSS时间传递与精密授时工作.

E-mail: qwj@ntsc.ac.cn

杨旭海　男,1972年生,陕西渭南人. 理学博士,研究员,博士研究生导师,中国科学院国家授时中心高精度时间传递与精密测定轨研究室主任. 近年来主持多项国家科研项目,包括国家高技术研究发展计划项目(863项目)、国家自然科学基金项目等. 主要从事高精度时间传递与精密测定轨工作. 中国电子学会会员编号: E190019703M.