

随机模型在GPS卫星钟差估计中的应用

李浩军, 叶珍

(同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 卫星钟差是影响定位精度的重要误差源之一。针对不同接收机评估其伪距观测精度, 选择相应的相位观测方差, 构建合理的随机模型。采用56个IGS(International GNSS Service)跟踪站观测数据解算卫星钟差, 并进行定位验证。结果表明: 基于该方法的钟差估计结果与传统的钟差估计方法的结果在定位精度上改进约为5%。使用IGS卫星钟差, 将该随机模型用于定位解算, 10个测站中, 7个测站收敛时间与定位精度有明显改进, 收敛时间相较于传统定权方式的解算结果改进最高可达78%、定位精度改进最高可达86.55%。

关键词: 卫星钟差; 精密单点定位(PPP); 随机模型

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

Application of Stochastic Model in GPS Satellite Clock Estimation

LI Haojun, YE Zhen

(College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Satellite clock affects the positioning accuracy the most. Based on a study of the pseudorange observation accuracy of different receivers and corresponding phase variance, a reasonable stochastic model was established. The GPS data from 56 IGS stations were connected to estimate the satellite clock and to analyze the positioning performance. The estimation results of the satellite clock based on this method prove to the positioning accuracy improve about 5% in comparison with the traditional clock estimation method. The stochastic model was employed to the positioning solution using the IGS satellite clock. Within 10 stations, the convergence time and positioning accuracy of 7 stations improved significantly. Compared with the traditional fixed weight method, the convergence time improves about 78% the most, and the positioning accuracy

improves about 86.55% the most.

Key words: satellite clock; precise point positioning (PPP); stochastic model

卫星钟差是影响定位精度的一个重要因素, 也是一个主要的误差来源, 其精度及卫星钟的稳定性直接影响到定位解算的最终结果。为满足精密单点定位(PPP)^[1]用户的需求, 国际GNSS服务组织^[2]已将精密卫星钟差估计与服务纳入基本程序。通过采集全球跟踪站的GNSS观测数据, 使用无电离层相位(L₁/L₂)与伪距(P₁/P₂)组合估计卫星钟差^[3-7]。最初, IGS(International GNSS Service)提供的最终精密卫星钟差产品具有大约15d的延迟。考虑到相位模糊度对钟差估计效率的影响, 相关研究提出了用于实时应用的估计方法^[3-4, 6-8]。即使用伪距观测值估计参考历元的卫星钟差, 以及基于历元间差分算法与相位观测值计算时变卫星钟差改正。从那时起, IGS实时服务(RTS)采用基于NTRIP(Networked Transport of RTCM Services via Internet Protocol)协议的Internet方式向全球播发高精度卫星轨道和钟差产品, 作为国际海运事业无线电技术委员会(RTCM)状态空间表示(SSR)改正流发布。此项服务通过与加拿大自然资源部(NRCAN)、德国联邦制图与大地测量学局(BKG)、欧洲航天飞行中心(ESOC)的合作以及全球160个站点运营商、多个数据中心与10个分析中心提供的支持得以实现。以及基于三频观测结果的分析, 相关研究发现不同频率上无电离层组合估计得到的卫星钟差之间存在频间钟差偏差^[9-11], 这对三频卫星钟差估计的发展起到了重要作用^[12-13]。其中, 对单、双和三频用户的卫星钟差服务是基于L₁/L₂、P₁/P₂

收稿日期: 2020-03-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41974025, 41674029); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

第一作者: 李浩军(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为精密单点定位、GNSS系统偏差等。

E-mail: lhjch@tongji.edu.cn

通信作者: 叶珍(1995—), 女, 硕士生, 主要研究方向为卫星钟差估计。E-mail: isyezhen@163.com



论文
拓展
介绍

以及不同观测值之间的偏差计算得到的IGS钟差产品。

在GNSS数据处理中,合理的随机模型对获得最优解是十分重要的^[14-16]。通常由与高度角相关的函数以及观测值的标准偏差建立,其中标准偏差表示观测值估计方差的平方根。在卫星钟差估计中,一般采用伪距与相位观测值以及相应的随机模型。相关研究表明由于伪距与相位观测的精度差异,应对其设置不同的权重^[17]。而在数据处理中,通常采用伪距与相位观测权重比1:10 000^[6,9]。显然,对所有观测站都使用相同的标准偏差忽略了不同GNSS接收机的精度差异。而随着GNSS卫星和接收机技术的发展,接收机的性能及观测精度得到了改善。因此,本文讨论了卫星钟差的估计,并提出构建合理随机模型的方法。处理了2017年第300 d的56个

IGS跟踪站数据,对卫星钟差估计结果进行分析。

1 数学模型

卫星钟差估计中,一般采用无电离层伪距(P_1/P_2)与相位(L_1/L_2)观测模型。其中,卫星端的偏差被卫星钟差吸收,接收机端的偏差被接收机钟差吸收。而伪距和相位观测值中的偏差对估计钟差的影响取决于相位和伪距观测值的权重。因此,本文讨论了卫星钟差的估计方法,并提出了卫星钟差估计中随机模型的构建方法。

1.1 卫星钟差估计

卫星钟差估计通常采用 L_1/L_2 、 P_1/P_2 观测值,方程分别写为

$$D_{IF}(L_1, L_2) = \rho + \delta^r - \delta^s + \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_1 \lambda_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} N_2 \lambda_1 \right) - \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} E_{FCB1}^r - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} E_{FCB2}^r \right) + \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} E_{FCB1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} E_{FCB2}^s \right) - T^{r,s} + \varepsilon_{1,2} + \quad (1)$$

$$D_{IF}(P_1, P_2) = \rho + \delta^r - \delta^s - \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} b_1^r - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} b_2^r \right) + \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} b_1^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} b_2^s \right) - T^{r,s} + \omega_{1,2}$$

式中: D_{IF} 为观测值差值; ρ 为卫星与接收机之间的几何距离; T 为对流层延迟; $f_i(i=1,2)$ 分别为 L_1 、 L_2 的载波频率; $E_{FCB}^s(i=1,2)$ 为 L_1 、 L_2 观测值的卫星端相位小数周偏差,包括常数部分与时变部分; $E_{FCB}^r(i=1,2)$ 为接收机端相位小数周偏差; δ^r 、 δ^s 为接收机钟差与卫星钟差; $b_i^s(i=1,2)$ 为 P_1 、 P_2 观测值的卫星端

硬件延迟,包括常数部分与时变部分; $b_i^r(i=1,2)$ 为 P_1 、 P_2 观测值的接收机端硬件延迟; $\varepsilon_{1,2}$ 、 $\omega_{1,2}$ 分别为相位和伪距的测量噪声。

参数估计时,与卫星相关的偏差被卫星钟差吸收。估计的卫星钟差写为

$$\bar{\delta}^s = \delta^s + \left(P_p \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} E_{FCB1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} E_{FCB2}^s \right) + P_c \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} b_1^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} b_2^s \right) \right) / (P_p + P_c) \quad (2)$$

式中: P_p 、 P_c 分别为卫星钟差估计中相位与伪距观测值的权重。式(2)表明伪距与相位观测值中的偏差对卫星钟差估计的影响取决于伪距、相位观测值的权重。在数据处理中,高度角定权公式写为

$$\omega(\theta_k) = \begin{cases} 1/\sigma^2 & 30^\circ \leq \theta_k \leq 90^\circ \\ 2\sin(\theta_k)/\sigma^2 & 7^\circ \leq \theta_k < 30^\circ \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ 为卫星高度角; σ 为相位与伪距观测值的标准偏差。

由于相位观测值的权重远大于伪距观测值,因此,伪距与相位观测值的标准偏差比通常使用1:0.01,并且估计后的卫星钟差几乎包含了所有FCB。显然,以上定权方式没有考虑到不同GNSS接收机的精度差异,并且不利于改进卫星钟差的估计结果。本文对卫星钟差的估计策略如表1所示。

表1 GPS卫星钟差估计策略

Tab.1 Strategy of the GPS satellite clock estimation

钟差估计	参数	处理策略
观测量	采样间隔	30s
	截止角	7°
	平差	最小二乘滤波
	观测值加权	根据1.2所提方法
误差改正	相位缠绕	改正
	DCB(P1~C1)改正	CODE产品
	潮汐改正	固体潮、海洋潮汐
	相位中心变化	IGS 08模型
参数估计	相对论改正	改正
	测站坐标	固定为IGS SINEX 结果
	卫星轨道	固定为IGS事后精密轨道
	对流层	Saastamoinen模型+估计
	卫星钟差	估计+白噪声
	接收机钟差	估计+白噪声
	模糊度	浮点解

PPP是基于双频观测值以及卫星钟差和轨道产品而实现的。同时,对地球自转、潮汐改正、相对论效应、相位中心变化(PCV)和差分码偏差(DCB)进行了改正。估计的参数是接收机坐标、接收机钟差、对流层延迟和相位模糊度。在PPP处理中,使用最小二乘滤波估计及相应的随机模型。

1.2 随机模型

文献[17]表明在GNSS数据处理中,合理的随机模型对获得最优解是十分重要的,通常基于无电离层伪距、相位组合建立。在本文所提出的随机模型构建方法中,无电离层组合相位和伪距差值的标准偏差写为

$$\sigma_{\text{dif}} = \sqrt{\sigma_{\text{ip}}^2 + \sigma_{\text{ic}}^2} \quad (4)$$

式中: σ_{ip}^2 、 σ_{ic}^2 分别为无电离层组合相位和伪距观测值的方差。

无电离层组合相位与伪距观测值的残差值可写为

$$\Delta_k = ((IF(L_1, L_2) - IF(P_1, P_2))_k - (\sum_{k=1}^m \omega_k ((IF(L_1, L_2) - IF(P_1, P_2))_k) / \sum_{k=1}^m \omega_k) \quad (5)$$

其中, ω_k 为相位和伪距差值的权重,由式(3)计算可得。

以及无电离层组合相位和伪距观测值的残差RMS值与平均值可由以下公式计算得

$$\sigma_{\text{dif}} = \sqrt{(\sum_{k=1}^m \Delta_k^2) / m} \quad (6)$$

$$\sigma_r = \sum_{i=1}^n (\sigma_{\text{dif}})_i / n \quad (7)$$

通过计算不同接收机LC-PC序列的RMS值,对所有卫星RMS取平均值后可用于评估不同接收机的伪距观测精度。并且选定相应的相位观测方差,构建合理的随机模型,对GPS卫星钟差进行估计与分析。

2 数据处理

选用2017年第300 d的56个IGS跟踪站数据,采用无电离层延迟伪距、相位联合解算,并且对伪距、相位观测分别采用不同的权,进行GPS卫星钟差估计与分析。测站分布图如图1所示。

2.1 卫星钟差估计结果

根据卫星钟差估计原理与数据处理策略以及随机模型构建方法,在数据处理中,伪距、相位观测分别采用不同的权,解算得到2017年第300 d的卫星

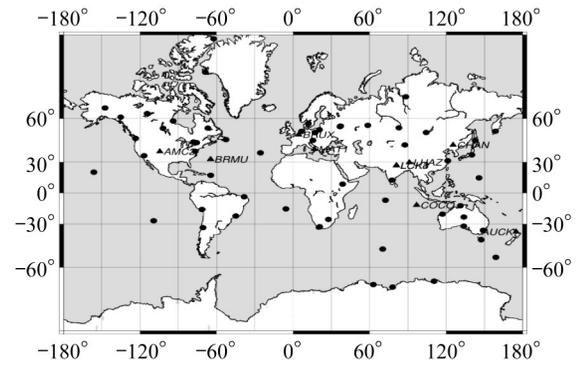


图1 56个IGS跟踪站(圆圈)与10个用户站(三角)分布图
Fig.1 Distribution of the 56 IGS stations (circle) and 10 user stations (triangle)

钟差结果,并分别将其结果与IGS最终精密卫星钟差作二次差(以G01为基准星,观测时段内G04、G31不可见),统计二次差时间序列的标准偏差值 D 。

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (8)$$

式中: X_i 为第 i 个历元两套卫星钟差之差; \bar{X} 为其平均值; N 为历元数。

其中,伪距、相位观测的权采用3种不同组合:

- (1) 采用传统定权方式,伪距、相位观测值方差比为1:0.01,记为1[#];
- (2) 评估不同接收机的伪距观测精度得到不同测站的伪距方差,相位方差设为0.01,记为2[#];
- (3) 评估不同接收机的伪距观测精度得到不同测站的伪距方差,相位方差设为0.001,记为3[#]。三种卫星钟差估计结果如图2所示。

统计结果表明,2[#]卫星钟差估计结果的STD值较大,1[#]与3[#]相差不明显,并且都小于0.02m。由此可以得知在卫星钟差估计中,合适的伪距和相位权,对钟差估计结果是十分重要的。并且伪距和相位权的比值同样影响解算结果,适宜的比值能减弱伪距观测噪声对解算参数的影响。

2.2 精密单点定位验证

为了分析本文卫星钟差解算结果的精度及其定位性能,对使用不同处理策略得到的卫星钟差估计结果进行静态PPP解算,以下为AMC2测站2017年第300 d分别使用1[#]、2[#]、3[#]处理策略得到的卫星钟差估计结果进行的静态PPP解算结果,如图3所示。

由图3较难发现使用不同策略解算的卫星钟差进行定位验证的差异,故以每2h为单位时长,统计AMC2测站一天内的定位精度。基于卫星钟差解算的结果,分别统计1[#]、3[#]的定位精度,如表2所示(N 、

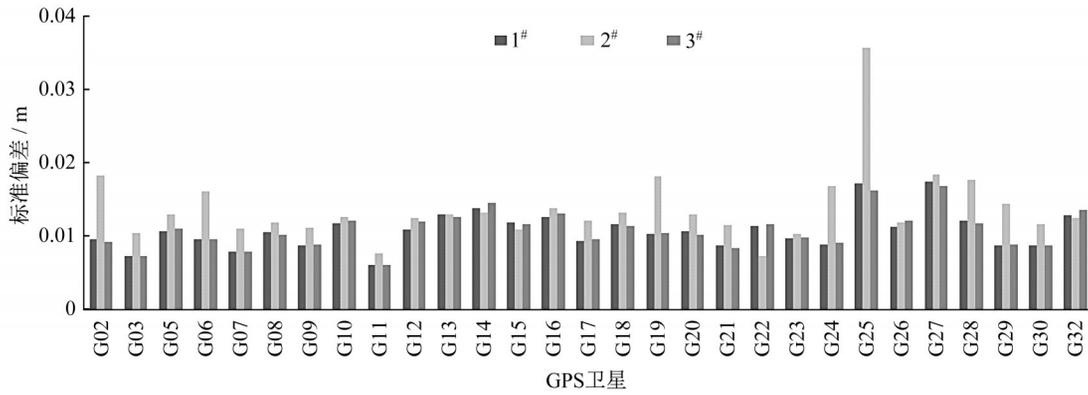


图2 卫星钟差估计结果

Fig.2 STD of the GPS satellite clock

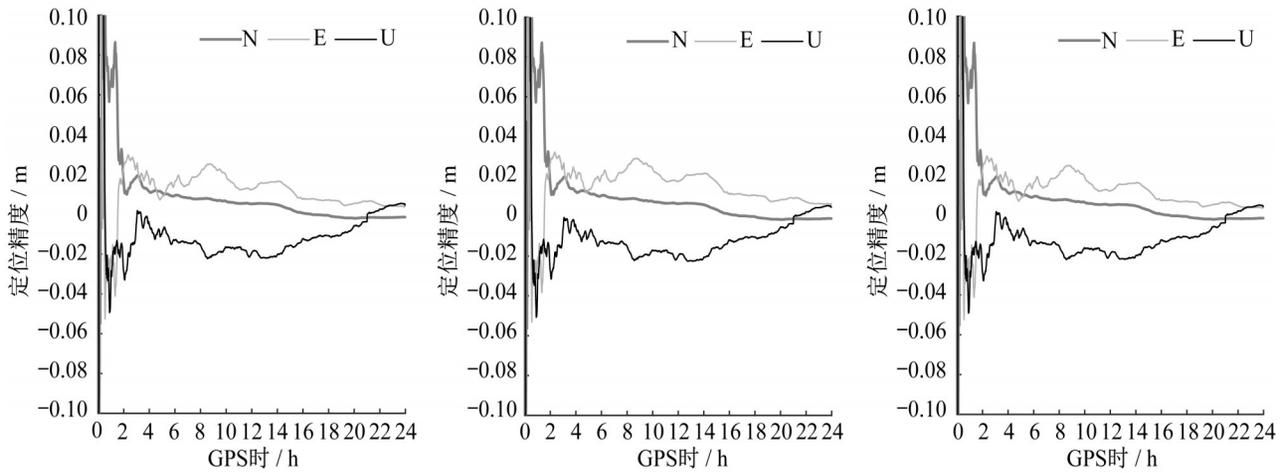


图3 AMC2测站使用不同钟差产品的静态PPP结果

Fig.3 Static PPP results using different clock products for AMC2 station

E、U分别代表北、东、高方向,URE为三维方向)。定位精度改进可达到5%左右。可以发现3#相较于1#,定位精度有略微的改进,最终

表2 AMC2测站使用不同卫星钟差产品的静态PPP结果

Tab.2 Static PPP results using different clock products for AMC2 station

时间/h	1#				3#				URE改进/% (3#相较于1#)
	N	E	U	URE	N	E	U	URE	
2	0.0159	0.0235	-0.0291	0.0406	0.0159	0.0234	-0.0290	0.0405	0.19
4	0.0115	0.0164	-0.0050	0.0207	0.0114	0.0163	-0.0051	0.0206	0.42
6	0.0094	0.0164	-0.0131	0.0230	0.0094	0.0163	-0.0132	0.0230	0.16
8	0.0078	0.0209	-0.0156	0.0272	0.0077	0.0207	-0.0155	0.0270	0.66
10	0.0065	0.0193	-0.0164	0.0261	0.0065	0.0191	-0.0164	0.0260	0.67
12	0.0052	0.0124	-0.0194	0.0236	0.0052	0.0123	-0.0194	0.0235	0.30
14	0.0048	0.0164	-0.0203	0.0265	0.0047	0.0162	-0.0203	0.0264	0.58
16	0.0006	0.0077	-0.0123	0.0146	0.0006	0.0075	-0.0124	0.0145	0.57
18	-0.0006	0.0072	-0.0108	0.0130	-0.0007	0.0070	-0.0108	0.0129	0.63
20	-0.0021	0.0055	-0.0057	0.0082	-0.0020	0.0054	-0.0058	0.0081	0.64
22	-0.0016	0.0049	0.0025	0.0057	-0.0017	0.0047	0.0021	0.0054	5.07
24	-0.0014	0.0041	0.0048	0.0065	-0.0014	0.0040	0.0044	0.0061	4.83

为了验证本文提出的随机模型构建方法,将以上定权策略用于静态PPP解算中。使用IGS卫星钟差产品,对测站LCK4进行静态PPP解算。在静态PPP数据处理中,伪距、相位观测的权采用三种不同组合:①采用传统定权方式,伪距、相位观测值方差比为1:0.01,记为 $a^\#$;②评估不同接收机的伪距观测精度得到不同测站的伪距方差,相位方差设为0.01,

记为 $b^\#$;③评估不同接收机的伪距观测精度得到不同测站的伪距方差,相位方差设为0.001,记为 $c^\#$ 。解算结果如图4所示,并以每2h为单位时长,统计一天内的定位精度。由解算结果发现 $a^\#$ 、 $c^\#$ 的定位精度优于 $b^\#$,故给出 $a^\#$ 、 $c^\#$ 的统计结果,以及相较于 $a^\#$ 、 $c^\#$ 的精度改进百分比,如表3所示。

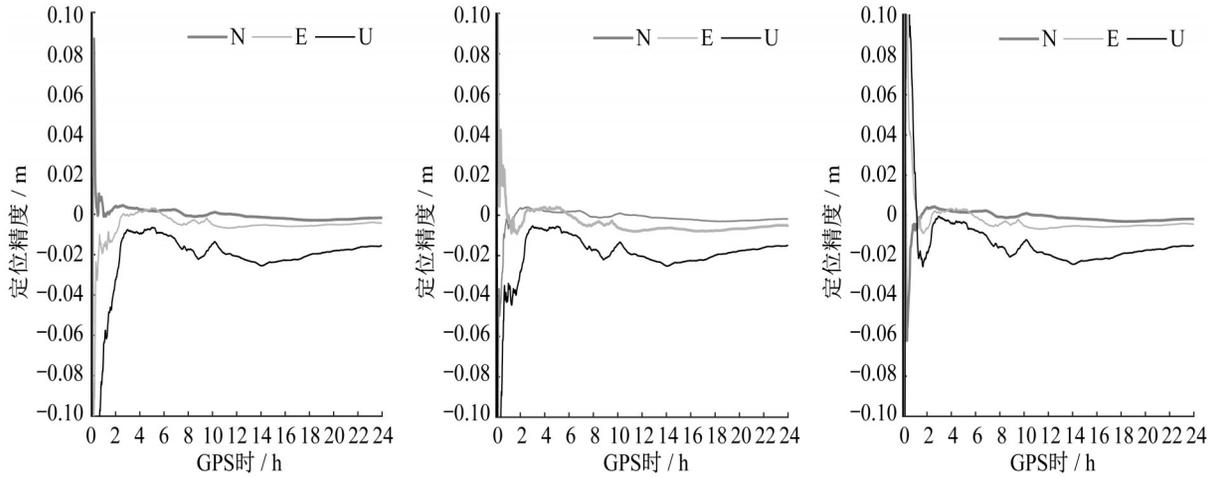


图4 LCK4测站使用IGS卫星钟差的静态PPP结果

Fig.4 Static PPP results using IGS satellite clock for LCK4 Station

表3 LCK4测站使用IGS卫星钟差的静态PPP定位结果

Tab.3 Static PPP results using IGS satellite clock for LCK4 Station

时间/h	$a^\#$				$c^\#$				URE改进/% ($c^\#$ 相较于 $a^\#$)
	N	E	U	URE	N	E	U	URE	
2	0.004 0	-0.009 5	-0.032 2	0.033 9	0.003 9	-0.006 7	-0.018 3	0.019 9	41.34
4	0.002 5	0.001 5	-0.009 7	0.010 1	0.002 2	0.003 2	-0.004 0	0.005 6	44.73
6	0.002 1	-0.000 6	-0.009 8	0.010 1	0.002 1	-0.000 9	-0.007 6	0.008 0	20.97
8	-0.000 7	-0.004 1	-0.017 3	0.017 8	-0.000 8	-0.004 3	-0.015 7	0.016 2	8.95
10	0.000 7	-0.005 1	-0.014 7	0.015 6	0.000 6	-0.005 2	-0.013 2	0.014 2	9.16
12	-0.000 2	-0.006 4	-0.020 8	0.021 7	-0.000 3	-0.006 4	-0.019 5	0.020 5	5.73
14	-0.001 4	-0.005 3	-0.025 4	0.026 0	-0.001 4	-0.005 3	-0.024 3	0.024 9	4.25
16	-0.002 0	-0.005 9	-0.022 7	0.023 5	-0.002 1	-0.005 8	-0.021 7	0.022 6	4.12
18	-0.002 9	-0.005 7	-0.020 1	0.021 1	-0.003 0	-0.005 5	-0.019 3	0.020 3	3.96
20	-0.002 7	-0.005 1	-0.018 2	0.019 1	-0.002 7	-0.005 0	-0.017 4	0.018 3	3.88
22	-0.002 2	-0.004 6	-0.016 6	0.017 4	-0.002 2	-0.004 6	-0.016 0	0.016 8	3.70
24	-0.001 8	-0.004 4	-0.015 5	0.016 3	-0.001 9	-0.004 4	-0.014 9	0.015 7	3.64

由以上统计结果可发现: $c^\#$ 相较于 $a^\#$,随着定位的收敛,三个方向的定位精度改进逐渐趋于稳定。其中,对U方向的改进较N、E方向更为明显。同时,在图4中也可发现,U方向的改进在0-6h内较为明显,在表3中前6h的统计结果也可验证这一点。基于测站LCK4的统计结果,使用IGS卫星钟差产品及相同的数据处理策略进行静态PPP解算,10个测站的静态PPP定位收敛时间如表4所示,定位精度如表5所示。统计结果表明,修改后的伪距方差与相位方

差为0.001的组合($c^\#$)相较于传统的定权方式($a^\#$),静态PPP收敛时间与定位精度都有明显的改进,收敛时间改进最高的测站(BRUX)可达78%,定位精度改进最高的测站(CHAN)可达86.55%。

对10个测站的接收机、天线以及通过本文所提出接收机伪距观测精度评估方法计算得到的均方根值(RMS)进行统计,如表6所示。结合以上精密单点定位验证结果对比分析发现:对于定位收敛时间相较于传统定权方式有较大提升的BRUX、CHAN、

表4 10个测站静态PPP收敛时间

Tab.4 Static PPP convergence time for 10 stations

测站	收敛时间			收敛时间改进/% (c [#] 相较于a [#])
	a [#]	b [#]	c [#]	
AMC2	25	25	25	0
AUCK	104	102	66	37
BRMU	63	46	69	-10
BRUX	18	23	4	78
CHAN	120	118	55	54
COCO	26	25	20	23
LCK3	60	55	22	63
LCK4	56	38	20	64
LHAZ	35	35	32	9
MAT1	67	67	69	-3

COCO、LCK3及LCK4测站,有4个测站RMS值较小,其接收机类型为LEICA GRX1200+GNSS、SEPT POLARX4TR;对于定位精度相较于传统定权方式有较大改进的AMC2、AUCK、BRMU、BRUX、CHAN测站,有3个测站RMS值较大,其接收机类型为ASHTECH Z-XII3T、TRIMBLE NETR9、ASHTECH UZ-12。通过以上结果可以推测出:通过本文所提出的随机模型进行精密单点定位,接收机的类型以及不同接收机的伪距观测精度对定位的收敛时间以及定位精度具有较为明显的影响。

表5 10个测站静态PPP定位结果

Tab5 Static PPP results for 10 stations

测站	a [#]				b [#]				c [#]				URE改进/% (c [#] a [#])
	N	E	U	URE	N	E	U	URE	N	E	U	URE	
AMC2	0.001 1	-0.001 4	0.023 1	0.023 1	0.001 0	-0.001 4	0.023 4	0.023 5	0.000 5	-0.000 7	0.008 1	0.008 2	64.77
AUCK	-0.009 1	0.031 8	0.025 7	0.041 9	-0.009 1	0.031 9	0.026 1	0.042 2	-0.008 2	0.023 7	0.001 7	0.025 1	40.00
BRMU	0.000 6	-0.009 7	-0.008 7	0.013 0	0.001 8	-0.042 1	-0.012 6	0.044 0	0.000 5	-0.004 0	-0.008 2	0.009 2	29.46
BRUX	0.002 1	-0.003 1	0.004 4	0.005 7	0.002 3	-0.001 6	0.003 3	0.004 3	0.002 3	-0.002 4	0.003 0	0.004 5	21.65
CHAN	-0.000 8	0.023 7	-0.102 6	0.105 3	-0.000 6	0.023 8	-0.101 7	0.104 5	-0.002 3	0.011 9	-0.007 3	0.014 2	86.55
COCO	-0.004 7	-0.001 1	-0.004 3	0.006 4	-0.004 9	-0.002 1	-0.004 3	0.006 9	-0.004 9	-0.002 6	-0.004 3	0.007 0	-9.06
LCK3	-0.000 1	-0.004 4	-0.017 9	0.018 4	-0.000 1	-0.004 6	-0.016 8	0.017 4	-0.000 1	-0.004 3	-0.016 9	0.017 4	5.50
LCK4	-0.001 8	-0.004 4	-0.015 5	0.016 3	-0.001 9	-0.005 1	-0.014 9	0.015 9	-0.001 9	-0.004 4	-0.014 9	0.015 7	3.64
LHAZ	-0.001 5	0.003 0	-0.009 2	0.009 8	-0.001 5	0.002 9	-0.009 3	0.009 9	-0.001 5	0.003 2	-0.009 4	0.010 1	-3.36
MAT1	-0.002 0	0.000 7	-0.046 3	0.046 4	-0.002 3	0.009 1	-0.046 5	0.047 4	-0.001 9	-0.003 7	-0.046 2	0.046 4	0.04

表6 10个测站相关信息

Tab.6 Related information for 10 stations

测站	接收机	天线	RMS
AMC2	ASHTECH Z-XII3T	AOAD/M_T NONE	1.137
AUCK	TRIMBLE NETR9	TRM57971.00 NONE	0.978
BRMU	LEICA GRX1200GGPRO	JAVRINGANT_DM NONE	0.348
BRUX	SEPT POLARX4TR	JAVRINGANT_DM NONE	0.514
CHAN	ASHTECH UZ-12	ASH701945E_M NONE	1.133
COCO	SEPT POLARXS	AOAD/M_T NONE	0.364
LCK3	LEICA GRX1200+GNSS	LEIAR25. R3 LEIT	0.412
LCK4	LEICA GRX1200+GNSS	LEIAR25. R3 LEIT	0.407
LHAZ	LEICA GR25	LEIAR25. R4 LEIT	0.802
MAT1	LEICA GR30	LEIAR20 NONE	0.577

3 结语

在卫星钟差估计与随机模型构建原理的基础上,针对不同接收机评估其伪距观测精度,选择相应的相位方差,构建合理的随机模型,解算GPS卫星钟差以及进行定位验证。由实验结果可得到相位的

方差为0.001时,卫星钟差与PPP解算结果较优。选用2017年第300 d的56个IGS跟踪站观测数据对原有随机模型与本文提出的随机模型进行对比分析。结果表明:基于本文提出的随机模型估计的卫星钟差进行的定位精度改进约为5%左右;将该定权方法用于静态PPP解算中,采用IGS卫星钟差,解

算的10个测站中,7个测站收敛时间与定位精度改进较为明显,收敛时间改进最高可达78%,定位精度改进最高可达86.55%。

针对不同接收机伪距观测精度差异计算GPS卫星相位与伪距观测值的平均残差RMS值,以得到不同接收机的伪距观测值标准偏差,以及选定相应的相位方差,构建合理的随机模型。对GPS卫星钟差进行解算与结果分析,并且在定位解算中验证了该随机模型的改进效果,对卫星钟差估计与定位解算都具有一定的参考意义。

作者贡献说明:

李浩军:确定总体框架,指导实验全过程,指导论文写作。

叶珍:完成实验,处理实验数据,撰写论文。

参考文献:

- [1] BOCK H, DACH R, JÄGGI A, *et al.* High-rate GPS clock corrections from CODE: support of 1 Hz applications [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(11):1083.
- [2] DOW J, NEILAN R, RIZOS C. The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3/4):191.
- [3] GE M, CHEN J, DOUSA J, *et al.* A computationally efficient approach for estimating high-rate satellite clock corrections in realtime[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(1):9.
- [4] HAN S, KWON J, JEKELI C. Accurate absolute GPS positioning through satellite clock error estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 2001, 75(1): 33.
- [5] HAUSCHILD A, MONTENBRUCK O. Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real-time positioning [J]. *GPS Solutions*, 2009,13(3):173.
- [6] LI H, CHEN J, WANG J, *et al.* Network based real-time precise point positioning [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(9):1218.
- [7] LI H, LI B, XIAO G, *et al.* Improved method for estimating the inter-frequency satellite clock bias of triple-frequency GPS [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(4):751.
- [8] LI H, LI B, LOU L, *et al.* Impact of GPS differential code bias in dual- and triple-frequency positioning and satellite clock estimation[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3):897.
- [9] LI H, ZHU W, ZHAO R, *et al.* Service and evaluation of the GPS triple-frequency satellite clock offset [J]. *The Journal of Navigation*, 2018, 71(5): 1263.
- [10] LI H, XIAO J, LI B. Evaluation and application of the GPS code observable in precise point positioning [J]. *The Journal of Navigation*, 2019, doi:10.1017/S0373463319000274.
- [11] LI B, SHEN Y, XU P. Assessment of stochastic models for GPS measurements with different types of receivers [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(20):3219.
- [12] LI B, ZHANG L, VERHAGEN S. Impacts of Beidou Stochastic Model on reliability: overall test, w-test and minimal detectable bias [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3): 1095.
- [13] MONTENBRUCK O, HUGENTOBLE U, DACH R, *et al.* Apparent clock variations of the Block IIF-1 (SVN62) GPS satellite[J]. *GPS Solutions*, 2012 16(3):303.
- [14] PAN L, ZHANG X, LI X, *et al.* Characteristics of inter-frequency clock bias for Block IIF satellites and its effect on triple-frequency GPS precise point positioning [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2):811.
- [15] WANG J, STEWART M, TSAKIRI M. Stochastic modeling for static GPS baseline data processing [J], *Journal of Surveying Engineering*, 1998, 124(4):171.
- [16] ZHANG X, LI X, GUO F. Satellite clock estimation at 1 Hz for realtime kinematic PPP applications [J]. *GPS Solutions*, 2010, 15(4):315.
- [17] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, *et al.* Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997,102:5005.