

顾及电离层改正精度信息的高精度单频单点定位方法研究

施 闯^{1,2} 辜声峰¹ 耿长江^{1,3} 宋伟伟^{1,3}

(1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(3 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:提出了将电离层改正量作为虚拟观测值,参数估计随机模型顾及电离层改正量先验信息的高精度单频单点定位新方法,并推导出该方法的数学模型。实测数据解算定位结果表明,新方法能够实现中国高、中、低纬区域的无初始化高精度单频单点定位,其平面精度为 0.1~0.2 m,高程精度为 0.3~0.5 m。
关键词:电离层改正量;随机模型;单频精密单点定位
中图法分类号:P228.41

在 SA 政策取消后,电离层延迟成为影响单频单点定位的关键因素,国内外相关学者进行了大量的尝试,其中使用 KLOBUCHAR 模型是普遍采用的一种方法,然而,它只能改正 50% 左右^[1-2]。通过全球电离层格网图 GIM 内插也可以获得电离层延迟值,Beran 等的研究表明,当使用高质量的观察数据时,平面定位精度能达到 2 dm(1 倍中误差)^[3-5]。伪距和相位的无电离层组合 GRAPHIC(group and phase ionosphere calibration)也可以应用于单频精密单点定位^[6-7]。Muellerschoen 等比较了 GRAPHIC 与实时区域电离层格网模型的单频定位精度,其结果显示实时单频定位都能够达到 dm 级的定位精度,而 GRAPHIC 的精度略高^[8]。

基于全球电离层格网模型或区域模型电离层格网的定位精度虽然不如 GRAPHIC,但其优点是不需要初始化就可以实现亚 m 级的单频单点定位。为了综合两者的优点,实现无初始化的高精度单频单点定位,本文提出了一种顾及电离层改正精度信息的单频精密单点定位方法。

1 单频单点定位数据处理模型

设历元 k 时刻 L_1 载波上的伪距和相位(以距

离为单位)观测值分别为 P_k 、 Φ_k ,将 GRAPHIC 组合简记为 $G_k=(P_k+\Phi_k)/2$ 。令 $D(P_k)=\sigma_0^2/P_p$, $D(\Phi_k)=\sigma_0^2/P_\phi$, $D(\Delta\text{Ion}_k)=\sigma_0^2/P_{\text{Ion}}$, $D(P_k, \Phi_k)=0$, $D(P_k, \Delta\text{Ion}_k)=0$, $D(\Phi_k, \Delta\text{Ion}_k)=0$,则线性化后的数学模型为:

$$\begin{bmatrix} P_k - \Delta\text{Ion}_k \\ \Phi_k + \Delta\text{Ion}_k \\ G_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_k \\ \Phi_k \\ \Delta\text{Ion}_k \end{bmatrix} = A_k \delta X_k + p_{k,0}^0 + e_k; e_k \sim N_k(0, D_k) \quad (1)$$
$$D_k = \frac{\sigma_0^2}{4} \begin{bmatrix} \frac{4}{P_p} + \frac{4}{P_{\text{Ion}}} & -\frac{4}{P_{\text{Ion}}} & \frac{2}{P_p} \\ -\frac{4}{P_{\text{Ion}}} & \frac{4}{P_\phi} + \frac{4}{P_{\text{Ion}}} & \frac{2}{P_\phi} \\ \frac{2}{P_p} & \frac{2}{P_\phi} & \frac{1}{P_p} + \frac{1}{P_\phi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, A_k 为系数矩阵;参数矩阵 δX_k 包含接收机位置、接收机钟差、载波相位模糊度等; $p_{k,0}$ 为代入接收机初始坐标,并顾及各项模型改正后的卫地距; e_k 为多路径误差及观测噪声。

由于 $\text{rank}(D_k)=2$,观测方程(1)秩亏,理论上方程(1)的估计结果与从中任选两个观测值的估计结果等价,笔者选择 $\begin{bmatrix} P+\Delta\text{Ion} \\ \Phi-\Delta\text{Ion} \end{bmatrix}$ 作为观测方

程。在参数估计初始阶段,伪距起到更大的作用,由于引入了电离层改正量,相对于 GRAPHIC 模型能更快地实现初始化。随着观测数据的增多,载波的作用逐渐增加,当电离层改正量精度不高时,载波与伪距观测方程中的受到电离层改正量之间的约束关系(在考虑 f 平方项下,伪距与载波电离层改正大小相等,符号相反)影响逐渐增强。因此,精度比仅采用电离层改正,不顾及其精度信息要提高,在收敛的情况下与 GRAPHIC 收敛情况下等价;当电离层改正量精度很高时,相位观测值权重加强,模型受伪距精度的影响减弱,此时的定位结果应优于 GRAPHIC 的定位结果。因此,顾及电离层改正精度信息的单频单点定位方法综合了区域电离层模型改正方法和 GRAPHIC 组合的优点,既能快速收敛,又能在收敛后确保高精度。

载波、伪距、电离层改正量之间的相对权比是此方法的关键。测量型接收机载波、伪距的精度分别为 0.003 m 和 0.3 m。电离层改正量的精度可根据全球电离层格网文件内插获得,但由于电离层变化并不均匀,完全按照协方差传播定律内插电离层改正量的精度偏高,笔者通过实验,建议按照下式确定电离层改正量精度:

$$\text{rms(ipp)}=\max\{\text{rms}(1),\text{rms}(2),$$
$$\text{rms}(3),\text{rms}(4)\}$$

(3)

$$\text{var(ipp)}=\text{rms(ipp)}\cdot\text{rms(ipp)}\cdot$$
$$\exp(\text{rms(ipp)}\cdot0.12)$$

(4)

式中, var(ipp) 即为求得的穿刺点处垂直电离层延迟改正量的方差; $\text{rms}(i)$ ($i=1,2,3,4$) 是内插点周围 4 个格网点电离层延迟量的均方根。

2 算例分析

2.1 实验数据说明

实验数据选择了中国境内纬度分布比较有代表性的 CHUN、ZHNZ 以及 QION 3 个跟踪站 2009-01-01~01-07 一周的 30 s 采样数据。3 个站的分布如图 1 所示,虽然这 3 个跟踪站都是静态双频观测数据,但在实验中仅使用了 L_1 频段上的观测值,并且按照事后仿实时动态处理模式解算。从 IGS 网站下载相应时段的全球电离层格网图、精密星历以及 DCB 文件等。

2.2 数据处理策略

为验证本文单频单点定位方法的效果,笔者设计了以下几组实验进行比较。

1) 仅使用观测值 G_k 进行单频单点定位,其

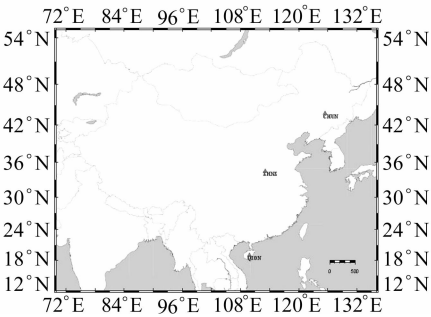


图 1 基准站分布图
Fig. 1 Layout of Reference Stations

随机模型为 $D=\frac{\sigma_0^2}{4}(\frac{1}{P_p}+\frac{1}{P_\phi})$;

2) 使用 $\begin{bmatrix} P+\Delta\text{Ion} \\ \Phi-\Delta\text{Ion} \end{bmatrix}$ 为观测值,不顾及电离层改正量的随机性,其随机模型可以表示为:

$$D=\sigma_0^2\begin{bmatrix}\frac{1}{P_p}&0\\0&\frac{1}{P_\phi}\end{bmatrix}$$

3) 使用 $\begin{bmatrix} P+\Delta\text{Ion} \\ \Phi-\Delta\text{Ion} \end{bmatrix}$ 为观测值,同时顾及电离层改正量的随机性,此时其对应的随机模型为:

$$D=\sigma_0^2\begin{bmatrix}\frac{1}{P_p}+\frac{1}{P_{\text{lon}}}&-\frac{1}{P_{\text{lon}}}\\-\frac{1}{P_{\text{lon}}}&\frac{1}{P_\phi}+\frac{1}{P_{\text{lon}}}\end{bmatrix}$$

使用武汉大学精密定位定轨数据处理软件 PANDA 计算得到 CHUN、ZHNZ 以及 QION 的参考坐标,并将结果投影至 N 、 E 、 U 分量,分别比较坐标值偏差,内符合精度与外符合精度等指标。

2.3 GRAPHIC 定位结果分析

将收敛 0 min 后历元(即全部历元)、收敛 90 min 后历元的一周的统计结果列于表 1。限于篇幅,图 2 仅给出了 01-03 三个测站的坐标差值。

表 1 的统计结果表明,GRAPHIC 的定位结果没有明显的系统差,即使在低纬度地区,也能够达到平面精度优于 3 dm,高程方向优于 5 dm。收敛后平面精度能够提高 30%,而高程方向精度提高并不明显,仅为 5%。图 2 显示 3 个观测站 3 个方向上都有明显的收敛过程,收敛后 3 个站的平面误差都能够维持在 ± 1 m 之内。

2.4 不顾及电离层改正量随机性定位结果分析

当不顾及电离层改正量随机性时,定位精度迅速降低,特别是在 N 方向以及低纬度地区的高程方向,完全无法满足亚 m 级的定位需求。值得注意的是,如果仅使用伪距单历元解算,其结果优

表 1 GRAPHIC 定位精度

Tab. 1 Position Precision Using GRAPHIC Solution

收敛时间	指标	CHUN			ZHNZ			QION		
		N	E	U	N	E	U	N	E	U
0 min	bias	0.021	0.011	0.031	-0.079	0.004	0.177	0.087	-0.083	-0.081
	std.	0.185	0.224	0.321	0.143	0.141	0.316	0.114	0.225	0.445
	rms.	0.189	0.228	0.324	0.165	0.142	0.363	0.145	0.243	0.457
90 min	bias	0.031	-0.006	0.021	-0.080	0.001	0.194	0.091	-0.086	-0.076
	std.	0.127	0.124	0.299	0.118	0.102	0.309	0.098	0.133	0.445
	rms.	0.129	0.122	0.291	0.139	0.099	0.354	0.130	0.157	0.440

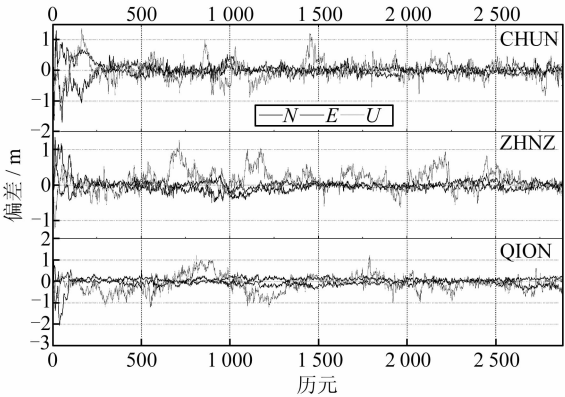


图 2 01-03 GRAPHIC 定位误差时序图

Fig. 2 Time Series of Bias on January 3 Using GRAPHIC Solution

于 $\begin{bmatrix} P+\Delta\text{Ion} \\ \Phi-\Delta\text{Ion} \end{bmatrix}$ 的滤波结果,这说明当不顾及电离层改正精度时,很容易造成滤波发散,如图 3 所示。

2.5 顾及电离层改正量随机性定位结果分析

表 3 是顾及电离层改正量随机性后的定位结果。与 GRAPHIC 对应,图 4 是 CHUN、ZHNZ、QION 3 个站 01-03 全部历元的误差时序图。

从表 3 可以看出,本策略的实验结果与 GRAPHIC 收敛后的精度相当,中、高纬地区平面精度接近 0.1 m,高程精度为 0.3 m,低纬地区平面精度在 0.2 m 之内,高程精度在 0.5 m 之内。另外,从图4可以看出,除少数历元外,平面误差

表 2 不顾及电离层改正量随机性定位精度

Tab. 2 Position PrecisionUsing Solution without Randomness of Ionosphere Delay Correction in Consideration

指标	CHUN			ZHNZ			QION		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U
bias	0.135	-0.289	0.345	0.067	-0.299	0.219	0.132	0.247	0.700
std.	1.380	0.390	0.495	1.257	0.251	0.384	1.518	0.681	4.712
rms.	1.387	0.493	0.618	1.263	0.392	0.460	1.527	0.739	4.788

表 3 顾及电离层改正量随机性定位精度统计

Tab. 3 Position Precision Using Solution with Randomness of Ionosphere Delay Correction in Consideration

指标	CHUN			ZHNZ			QION		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U
bias	0.021	-0.025	0.036	-0.028	-0.004	0.003	0.092	-0.085	-0.095
std.	0.115	0.092	0.295	0.100	0.091	0.263	0.110	0.161	0.426
rms.	0.118	0.097	0.302	0.105	0.092	0.266	0.144	0.184	0.438

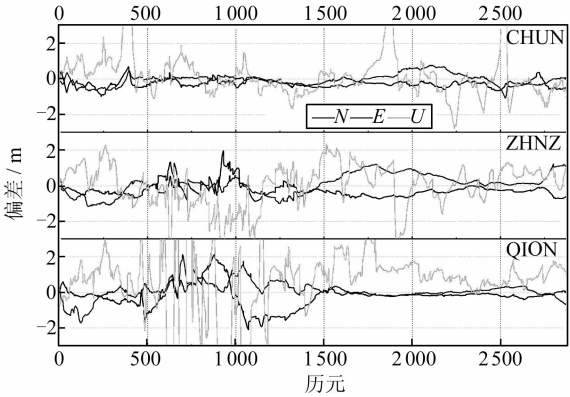


图 3 01-03 不顾及电离层改正量随机性定位误差时序图

Fig. 3 Time Series of Bias on January 3 Using Solution Without Randomness of Ionosphere Delay Correction in Consideration

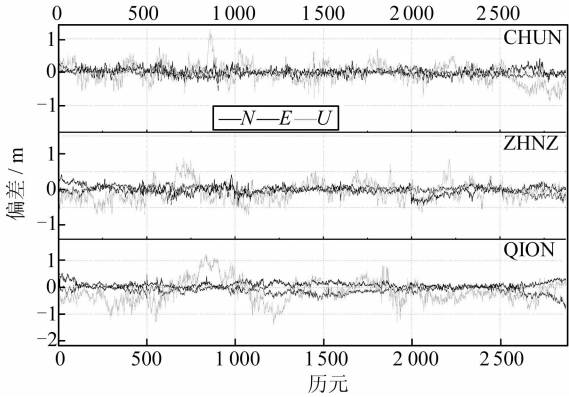


图 4 01-03 顾及电离层改正量随机性定位误差时序图

Fig. 4 Time Series of Bias on January 3 Using Solution with Randomness of Ionosphere Delay Correction in Consideration

维持在±0.5 m 之内,因此,该方法对于亚 m 级定位无需收敛过程,比较 GRAPHIC 方法具有优势。

实际上,在电离层改正量方差无穷大,即 $D(\Delta\text{Ion}_k)\gg D(P_k)\gg D(\Phi_k)$ 时,观测值 $P+\Delta\text{Ion}-\rho^0$ 与 $\Phi-\Delta\text{Ion}-\rho^0$ 在参数估计中的权比近似等于1:1,即 GRAPHIC 组合中伪距与相位观测值的权比,此时,顾及电离层改正量随机性的单频单点定位与 GRAPHIC 组合等价;当不顾及电离层改正量随机性时,等价于将电离层改正量视为真值的情况。

参 考 文 献

[1] Klobuchar J A. Ionospheric Time Delay Algorithm for Single Frequency GPS Users[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, AES-23(3):325-331

[2] Olafsvstedal. Absolute Positioning with Single Frequency GPS Receivers[J]. GPS Solut ,2002, 5(4): 33-44

[3] Beran T, Kim D, Langley R B. High-Precision Single-Frequency GPS Point Positioning[C]. The 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, Oregon, USA, 2003

[4] Beran T, Bisnath S B, Langley R B. Evaluation of High-Precision Single-Frequency GPS Point Positioning Models[C]. 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Long Beach, California, U S A, 2004

[5] Beran T, Langley R B, Bisnath S B, et al. High-Accuracy Point Positioning with Low-Cost GPS: How Good Can It Get[C]. 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Long Beach, California, 2005

[6] 张小红,李星星,郭斐,等. GPS 单频精密单点定位软件实现与精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2008,33(8):783-787

[7] 宋伟伟,施闯,姚宜斌,等. 单频精密单点定位电离层改正方法和定位精度研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2009,34(7):778-781

[8] Muellerschoen R, Iijima B, Meyer R, et al. Real-Time Point-Positioning Performance Evaluation of Single-Frequency Receivers Using NASA's Global Differential GPS System[C]. The ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach, CA,2005

第一作者简介:施闯,教授,博士,博士生导师,主要从事空间大地测量与地球动力学研究。
E-mail:shi@whu.edu.cn

High-Precision Single-Frequency Point Positioning with Randomness of Ionosphere Delay Correction in Consideration

SHI Chuang^{1, 2} GU Shengfeng¹ GENG Changjiang^{1, 3} SONG Weiwei^{1, 3}

(1 Research Center of GNSS,Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Promote a new single-frequency point positioning method with the ionosphere delay correction as a virtual observation and taking the statistic information of the ionosphere delay correction into consideration in the parameter estimation stochastic model, and build the mathematic model of this method. Analyze the differences and similarities between this solution and two other solutions depending on ionosphere grid model and GRAPHIC combination respectively. The experiment result shows that position accuracy of 0.1~0.2 m for the horizontal and 0.3~0.5 m for the vertical can be realized without converge of the whole China.

Key words: ionosphere delay correction; stochastic model; single-frequency precise point positioning