

GPS 单频精密单点定位软件实现与精度分析

张小红¹ 李星星¹ 郭 斐¹ 张 明¹

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要:建立了半和改正单频精密单点定位的数学模型,利用单频载波相位与 C/A 码伪距观测值,综合考虑各种误差改正模型,开发了单频精密单点定位解算模块 TriP-SF,利用不同运动状态的实测数据进行了静态、静态模拟动态、车载动态及机载动态定位试验。试算结果表明,单天静态平面与高程定位精度均达到 cm 级,略低于当前双频精密单点定位的精度;动态定位平面位置精度为 0.2~0.3 m,高程方向为 0.5 m,能够满足 dm 级的定位要求。另外,动态定位精度与载体机动性的强弱有一定的相关性。
关键词:GPS;单频精密单点定位;半和改正;精度
中图法分类号:P228.41

精密单点定位技术(precise point positioning, PPP)是当今国际上卫星精密定轨与定位的一个研究热点,并已在 GIPSY 软件中实现^[1]。国内外众多学者对 PPP 技术展开了研究,并取得了丰富的研究成果^[2-7]。目前,关于 PPP 的研究主要是基于双频观测值,并已经实现了静态 mm-cm、动态 cm-dm 级的定位精度。但由于单频接收机成本低,在当前卫星导航与定位领域仍拥有大量的用户,因此,使用廉价的单频接收机来实现高精度单机定位是许多导航定位用户所追求的。现已有不少学者开展了 GPS 单频 PPP 的研究工作^[8,9]。笔者在已有的双频精密单点定位软件平台 TriP 的基础上,研制开发了单频精密单点定位处理模块 TriP-SF,实现了单频精密单点定位的算法和软件。

1 单频精密单点定位数学模型

1.1 单频精密单点定位观测方程

GPS 载波相位观测方程与伪距观测方程可写为^[10]:

$$\varphi = \rho + c(dt - dT) + V_{ion} + M \circ zpd + amb + \xi_{\varphi}$$
$$\rho = \rho + c(dt - dT) - V_{ion} + M \circ zpd + \xi_{\rho}$$

式中, φ 为载波相位观测值; λ 为载波波长; ρ 为伪距观测值; ρ 为卫星与接收机之间的几何距离; c

为光速; dt 为接收机钟差; dT 为卫星钟差; V_{ion} 为电离层延迟; zpd 为天顶对流层延迟改正; M 为投影函数; amb 为载波相位模糊度; ξ_{φ} 、 ξ_{ρ} 分别表示载波相位和伪距的观测噪声。

鉴于测距码伪距观测值和载波相位观测值受到的电离层延迟误差的大小相等、符号相反,采用相位/伪距半和法,联立单频伪距观测方程得:

$$\frac{\varphi^i + \varphi^j \lambda}{2} = \rho^i + c(dt - dT) + M \circ zpd^i + \frac{amb^i}{2} + \frac{\xi_{\rho} + \xi_{\varphi}}{2}$$
$$\rho = \rho + c(dt - dT) - V_{ion} + M \circ zpd + \xi_{CA}$$

式中, ξ_{CA} 为 C/A 码噪声。上述半和组合“观测值”不仅消除了电离层的低阶项,而且也将伪距观测值的噪声降至原始伪距观测噪声的一半。

1.2 数据预处理

目前,比较有效的周跳探测方法大都是基于双频观测值的,如 M-W 组合探测法、电离层残差法等。而单频接收机通常只能接收伪距观测值、单频载波相位及多普勒观测值,因此无法组成 M-W 组合等。目前适用于单频相位观测值周跳的探测与修复方法主要有高次差法、多项式拟合法、多普勒法、小波变换法和卡尔曼滤波法等。本文综合使用多普勒法与多项式拟合法进行周跳探

测。由于非差相位数据中周跳的修复比探测更为困难,即使对于双频观测值,也很难准确地修复,因此,在 TriP-SF 的预处理模块中,只探测周跳,不进行修复。如果探测出周跳,则在相应的历元新增一个模糊度参数。

1.3 误差改正

1.3.1 电离层时延改正

由于单频 PPP 无法通过双频组合观测值消除电离层延迟误差的影响,因此,电离层延迟误差是单频 PPP 最主要的误差源之一。目前,单频电离层改正模型主要有 Klobuchar 模型、格网模型、球谐模型及 IRI 模型等。本文综合使用相位/伪距半和改正模型与格网改正模型来削弱电离层延迟误差的影响。对于相位观测方程,由于格网模型本身的精度有限,无法满足高精度定位的要求,因此使用半和改正法进行改正。对于伪距观测方程,由于伪距的噪声比较大,在单频 PPP 的数据处理中,单纯的伪距观测值对定位结果的贡献不大,使用格网模型进行改正即可满足精度要求。

1.3.2 硬件延迟偏差改正(DCBs)

不同类型的测距码以及不同频率的载波所引起的硬件延迟不同,设 C_1 、 P_1 、 P_2 对应的硬件延迟分别为 B_{C_1} 、 B_{P_1} 、 B_{P_2} ,硬件延迟偏差 $B_{P_1-P_2}$ 、 $B_{P_1-C_1}$ 最大可达十几个 ns^[11],相当于几 m,这对于单频 PPP 精度的影响是不可忽视的。由于 IGS 发布的精密钟差产品是利用无电离层组合观测值得到的,因此对于单频用户而言,为正确使用 IGS 精密钟差产品,必须在卫星钟差上加上一个改正数:

$$\Delta t = m \cdot B_{P_1-P_2} + n \cdot B_{P_1-C_1}$$

IGS 以一个月为周期发布 GPS 卫星的改正基数 $B_{P_1-P_2}$ 、 $B_{P_1-C_1}$,用户通过上式即可计算出不同观测值或组合观测值的 DCBs。

1.3.3 其他误差改正

卫星轨道误差及钟误差由于采用了 IGS 的精密星历和精密钟差,其影响可以忽略;对流层时延改正采用参数估计 ZPD 的方法,经 Niell 投影函数改正到信号传播路径方向上。此外,还必须考虑如地球自转、相对论效应、卫星天线相位中心偏差、引力延迟、固体潮、海洋潮、天线相位缠绕等一系列误差的影响,这些误差的改正模型与双频 PPP 的误差模型一致。

2 解算策略及软件实现

2.1 待估参数

单频 PPP 中,所有待估参数主要包括 4 个测

站参数(其中 3 个位置参数、1 个钟差参数)、模糊度参数 N_{amb} 个($N_{amb} \geq 4$)、对流层延迟参数 N_{zpd} 。总待估参数个数 S 可用下式表示:

$$S = 4 \times k + N_{amb} + N_{zpd}$$

对于静态定位, $k = 1$; 对于动态定位,由于接收机天线位置及钟差在每个历元都在变化,因此 k 为有效历元数。

2.2 参数估计

目前,对于后处理的 PPP 参数估计,主要有卡尔曼滤波法和最小二乘法。如果所给先验信息不合适,卡尔曼滤波往往容易造成发散,定位结果会严重偏离真值。TriP-SF 软件采用了改进的最小二乘算法(递归最小二乘法)估计,其核心思想是对上述不同参数分类递归处理,避免了巨大的法方程组成及求解,极大地提高了计算机的运行效率^[6]。

2.3 解算流程

单频精密单点定位解算包括数据预处理模块、误差改正模块以及参数估计模块。具体的解算流程如图 1 所示。

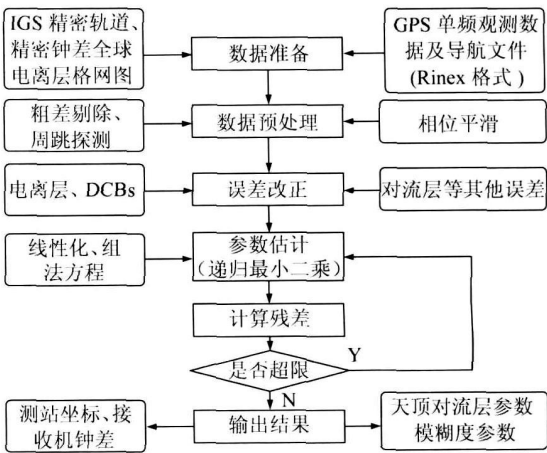


图 1 单频精密单点定位软件 TriP-SF 解算流程图

Fig. 1 Flow Chart of TriP-SF

3 定位结果与精度分析

3.1 数据准备

为了比较和分析单频 PPP 在不同运动状态及机动性条件下的精度情况,本文分别进行了静态、静态模拟动态、车载动态、机载动态试验。静态与静态模拟动态的数据随机选取了 IGS 的两个地面跟踪站——北京房山站(BJFS)和加拿大阿尔昆琴站(ALGO)、采样间隔为 30 s 的 4 组单天观测数据。考虑到数据的易获取性,仅从原始

双频观测文件中提取单频观测值使用; 动态数据分别为车载动态和机载动态观测数据, 考虑到与差分解的比较, 故使用双频观测文件中的单频数据。从 IGS 的分析中心下载了对应时段的事后精密星历文件 (SP3 格式)、30 s 采样间隔的卫星钟差文件、全球格网电离层图。

3.2 分析方案

对于静态与静态模拟动态试验, 由于 BJFS 与 ALGO 站的真实坐标已知, 通过比较由 TriP-SF 软件解算得到的结果和真实坐标之间的差异, 并将其转换至 N 、 E 、 U 三个方向来评价单频 PPP 在各个方向的外符合精度。对于车载动态以及机载动态试验, 由于无法准确获知载体在其运行轨迹上各历元的真实位置, 为了验证单频 PPP 的动态精度, 同时采用 GrafNav 软件对车载与机载的双频观测值进行差分解算, 得到运动载体在各历元的高精度事后双差动态解 (cm 级), 并视作参考真值。将 TriP-SF 计算的结果与双频差分解相比较, 其互差即可认为是单频精密单点定位的误差, 并从外符合 RMS 与标准差两方面来评价和分析当前单频动态 PPP 所能达到的精度水平。

3.3 静态试验

采用 TriP-SF 分别计算了 BJFS、ALGO 两站 2008 年 1 月 15 日、18 日、21 日及 3 月 9 日的单频静态定位结果, 并与这两个跟踪站的真实坐标相比较, 得到在 N 、 E 、 U 三个方向上的偏差如表 1 所示。

表 1 BJFS/ALGO 站静态解算 N 、 E 、 U 方向的偏差/m
Tab. 1 N , E , U Bias of Stations BJFS/ALGO in Static Mode

日期	BJFS			ALGO		
	dN	dE	dU	dN	dE	dU
08-01-15	-0.028	-0.001	-0.018	-0.032	-0.008	-0.040
08-01-18	-0.020	0.014	-0.001	-0.007	0.017	-0.032
08-01-21	-0.020	0.065	-0.003	-0.015	0.014	-0.024
08-03-09	-0.043	-0.015	-0.026	-0.043	-0.008	-0.010

从表 1 可以看出, 单频 PPP 的单天静态解在 N 、 E 、 U 三个方向的精度均在 cm 级, 除 BJFS 站在 1 月 21 日东方向的偏差达到 6 cm 左右, 其他时段所有方向的误差均优于 5 cm。在一定程度上, 使用单频接收机也能够达到与双频精密单点定位相当的精度。从测站方面考虑, 两个跟踪站均处于中低纬度地区 ($39^{\circ} \sim 46^{\circ}$), 纬度差异不大, 采用电离层格网模型改正的效率比较接近, BJFS 与 ALGO 之间的定位精度不存在明显的差异。不过, 测站的纬度及接收机类型的不同都有可能

3.4 静态模拟动态试验

由于基准站的坐标精确已知, 因此用静态数

据模拟动态解算可以作为检验动态单频 PPP 的精度。为此, 采用 BJFS 站 2008 年 1 月 21 日与 ALGO 站 2008 年 1 月 15 日的 30 s 采样间隔的单天静态观测数据模拟动态数据进行单频 PPP 试验。将定位结果与已知的真实坐标进行比较, 得到测站各历元的定位误差在 N 、 E 、 U 三个方向的差值 dN 、 dE 、 dU , 并绘制误差时序图, 如图 2 所示。

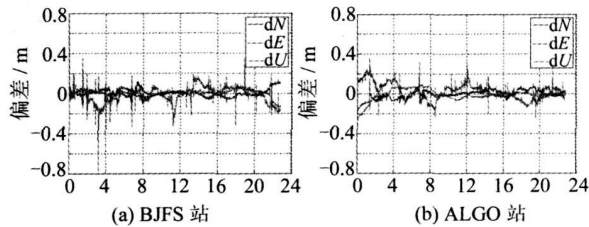


图 2 BJFS 与 ALGO 站静态模拟动态 TriP-SF 解算结果与已知坐标在 N 、 E 、 U 分量的差值

Fig. 2 Dynamic Solution Bias of Stations BJFS/ALGO Using TriP-SF in Static Case

图 2 显示, 采用静态模拟动态解算, BJFS 与 ALGO 两站的单频精密单点定位误差在 N 、 E 方向为 0.1~0.2 m 左右 (95%); U 方向的偏差稍大, 但基本上也能保证在 0.2~0.4 m 以内, 且绝大多数历元优于 0.2 m。静态模拟动态可看作是一种特殊的匀速状态模拟 (速度和加速度为零), 近似等效于低动态条件, 此时可以认为其单频精密单点定位的平面精度能达到 0.1~0.2 m, 高程方向达到 0.2~0.4 m。但实际采集的动态数据往往不如静态条件下采集的数据质量好, 它受周跳及多路径误差的影响可能更为严重。因此, 上述精度应该是在比较理想的条件下获得的, 实际的动态定位精度可能要稍低于这个精度指标。

3.5 车载动态试验

车载动态试验数据从当地时间的 15:55 至 16:13, 历时 18 min, 数据采样间隔为 1 s, 汽车行驶轨迹如图 3(a) 所示, TriP-SF 的单频定位的结果同 GrafNav 软件的双差解在 N 、 E 、 U 方向的互差如图 3(b) 所示。

车载动态试验结果表明, N 、 E 方向的偏差仅为 0.1 m 左右, 且在 16:00 以后, 误差曲线非常平滑; U 方向的偏差相对较大, 在观测时段前 3~5 min, 最大偏差可达 0.6 m 左右, 并且波动也较为剧烈, 5 min 之后, N 方向的误差逐渐减小, 并趋于平稳, 大致为 0.2~0.3 m。其原因主要在于: ① 从图 3(a) 可以看出, 前一段时间, 汽车处于盘绕状态, 频繁的制动与启动 (载体的机动性较强)

导致其定位误差偏大;而后一段时间,汽车的行驶路线近似为直线,汽车的机动性不如之前强,定位结果相对好些。②随着观测时间的延长,模糊度逐渐收敛。此外,在解算过程中,还发现观测数据的周跳较少,这样也使得解算结果特别是后一段时间相对较光滑。

另外,此次车载试验的数据来源于极地(北极),高纬度地区的卫星覆盖能力比较有限,因此,对于覆盖条件良好的中低纬地区而言,卫星的空间几何图形强度更好,单频 PPP 的精度可能会相对更高。因此,对于中等机动性的载体而言,单频 PPP 的平面精度达到 0.1~0.2 m,垂直方向优于 0.5 m。

3.6 机载动态试验

机载试验数据从当地时间的 6:40 至 7:35,历时 55 min,数据采样间隔为 1 s,飞机飞行轨迹如图 4(a) 所示, TriP-SF 的动态定位的结果与双频差分解的互差如图 4(b) 所示。

飞行轨迹显示,整个飞行过程基本上处于两

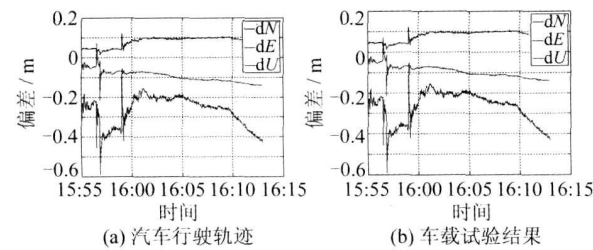


图 3 车载动态试验 TriP-SF 解算结果与双差解的坐标在 N、E、U 方向的差值

Fig.3 Evaluation Bias of Carborne Test Between TriP-SF and GrafNav in Kinematic Mode

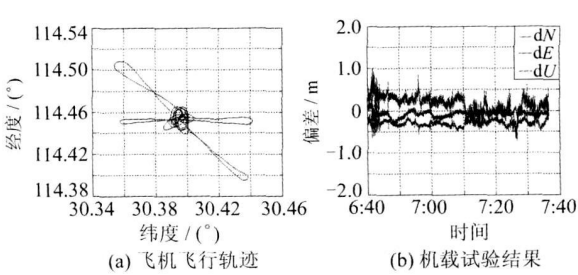


图 4 机载动态试验路线及结果比对

Fig.4 Evaluation Bias of Airborne Test Between TriP-SF and GrafNav in Kinematic Mode

种不同的状态,即盘旋与折返。图 4(b) 中,高程方向 U 的偏差有两次较大的跳跃,一次是在 7:10 左右,另一次是在 7:25 左右,这恰好与飞机的机动性变化相吻合,飞机在上空盘旋(强机动性)了将近 30 min 左右(6:40 至 7:10),开始直线飞行(机动性较弱),15 min 后(7:25),又换了另一条直飞路线,其对应的精度变化再次反映了载体机动性的强弱对定位结果的影响,尤其是高程方向受载体机动性的影响最为显著。总体来说,机载动态定位平面方向的精度大致为 0.2~0.3 m,高程方向为 0.5 m 左右。

3.7 外符合精度统计与分析

对于上述 4 种不同的状态,分别对其进行平均偏差与 RMS 统计,从外符合精度角度来表征单频精密单点定位的精度。计算各种状态对应不同方向上互差的均值、2 倍 RMS(95%置信区间)及去平均偏差后 2 倍标准差(2RMS*,95%置信区间),统计结果如表 2 所示。

表 2 不同状态 N、E、U 三个方向的外符合精度/m
Tab.2 External Fitting Precision of 4 Tests in NEU Directions/m

	N			E			U		
	偏差均值	2RMS	2RMS *	偏差均值	2RMS	2RMS *	偏差均值	2RMS	2RMS *
静态	-0.025	—	—	0.010	—	—	0.019	—	—
静态模拟动态	-0.009	0.084	0.082	-0.010	0.116	0.116	0.029	0.174	0.164
车载动态	0.080	0.167	0.047	-0.094	0.197	0.059	-0.269	0.550	0.150
机载动态	-0.077	0.216	0.150	-0.300	0.618	0.142	0.157	0.530	0.428

从表中不难发现,对于静态单频 PPP 而言,平面与高程方向的精度均为几 cm,并且水平与垂直方向的差异不大。采用静态模拟动态定位误差的均值同静态相似,仅为 1~2 cm,2RMS 值在 0.1 m 左右,高程方向较水平方向大 1 倍左右。车载与机载试验表明,中速行驶的车载与高速飞行的机载定位误差在统计上有一定的差异,但并不特别显著,其平面方向的精度均为 0.2~0.3 m,高程方向优于 0.5 m。

理论上,在相同的采样率下,机动性越强,观测数据更易受到周跳及多路径误差的影响,导致其观测数据质量不高,定位结果相对较差。事实也证明,机动性更强的车载与机载的定位精度明显次于机动性相对较弱的静态与静态模拟动态的定位精度。此外,采样率的大小对定位精度,尤其是高机动性载体的单频精密单点定位精度也会有较大的影响,在此不予探讨。

4 结 语

由于本文的试验部分所涉及到的单频数据是从双频接收机中提取的单频观测值,双频接收机和单频接收机在性能方面存在较大的差异,使用双频接收机所获取的数据质量通常要优于单频接收机,因此,在实际应用中,使用由单频接收机所获取的单频数据进行单频精密单点定位时,其精度水平应略低于上述精度指标。尽管如此,单频精密单点定位仍有许多值得改进与提高的地方,如多普勒法探测周跳对采样率有较为苛刻的要求,当采样率较低时,利用多普勒观测值计算的相位变化可能无法反映历元之间相位观测值的实际变化情况,造成较大的探测粗差,这就需要寻求更为有效的周跳探测方法。此外,基于单频观测值的电离层改正模型仍需进一步优化,提高其改正效果。

参 考 文 献

[1] Zumbege J F. Automated GPS Data Analysis Service[J]. GPS Solutions, 1999, 2(3): 76

[2] Kouba J, Heroux P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products[J]. GPS Solutions, 2001, 5(2): 12-28

[3] Gao Y, Shen X. Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-based Precise Point Positioning [C]. ION GPS 2001, Salt Lake City, USA, 2001

[4] 刘经南, 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位技术探讨[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 3(27): 234-239

[5] 韩保明, 欧吉坤. 基于 GPS 非差观测值进行精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 4(28): 409-412

[6] 张小红, 刘经南, Forsberg R. 基于精密单点定位技术的航空测量应用实践[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 1(31): 19-22

[7] Hu Congwei, Chen Wu, Gao Shan, et al. Data Processing for GPS Precise Point Positioning [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 22(2): 43-50

[8] 邵贺. 单频 GPS 精密单点定位方法与实践[D]. 武汉: 武汉大学, 2007

[9] Le A Q, Tiberius C. Single-Frequency Precise Point Positioning with Optimal Filtering[J]. GPS Solutions, 2007, 11(11): 61-69

[10] Zhang Xiaohong, Andersen O B. Surface Ice Flow Velocity and Tide Retrieval of the Amery Ice Shelf Using Precise Point Positioning [J]. Journal of Geodesy, 2006(80): 171-176

[11] Hugentobler U, Dach R, Fridez P. Document of Bernese of Software Version 5.0 [R]. University of Bern, 2005

第一作者简介: 张小红, 教授, 博士, 博士生导师。现主要从事 GNSS 精密定位和机载 Lidar 方面的科研和教学工作。
E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn

Realization and Precision Analysis of Single-Frequency
Precise Point Positioning Software

ZHANG Xiaohong¹ LI Xingxing¹ GUO Fei¹ ZHANG Ming¹
(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: An optimal mathematic model of single-frequency precise point positioning is built by using GPS carrier phase measurements and pseudoranges. Comprehensive error correction models are taken into consideration and a calculating module named TriP-SF is developed. An extensive validation of the accuracy in both static and kinematic modes are carried out, including simulation of dynamic trial using static data, carborne dynamic trial and airborne dynamic tests. The results demonstrate the accuracy about 0.2-0.3 m for the horizontal position components and 0.5 m for the vertical in the carborne and airborne experiment. In addition, locating precision varies from maneuverability.

Key words: GPS; single-frequency precise point positioning; half sum of phase and pseudorange; precision

About the first author: ZHANG Xiaohong, professor, Ph. D, Ph. D supervisor. He is concentrated on the research and education in GNSS precise point positioning and airborne laser scanning technology.
E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn