



精密单点定位 (PPP) 原理及其在 境外工程项目中的应用

唐有国, 麦若绵, 贾登科

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州510230)

摘要: GPS精密单点定位 (PPP) 方法采用单台双频GPS接收机进行观测并解算获得毫米级高精度的基于ITRF框架的测站坐标, 因其数据采集及数据处理方便、简单且费用低, 极具实用性。简述PPP的基本原理及其精度分析, 并结合近几年在境外的工程案例, 探讨该技术在类似项目中应用的可行性。

关键词: GPS; 精密单点定位 (PPP); 精密星历; 在线PPP; ITRF国际地球参考框架

中图分类号: TU 195

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)07-0127-04

Principle of precise point positioning(PPP) and its applicayion in overseas projects

TANG You-guo, MAI Ruo-mian, JIA Deng-ke

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: GPS precise point positioning is a positioning method which using a single double frequency receiver to observe and calculate very precise positions up to several millimeter level based on the international terrestrial frame (ITRF). It is very useful due to its easy fieldwork and simple data processing. The paper introduces the principle of this method and its high precision. Combining with some projects finished by our company in recent years, this paper discusses the application to similar projects.

Key words: GPS; precise point positioning(PPP); precise ephemeris; online PPP; ITRF(international terrestrial reference frame)

GPS定位若按参考点的位置不同来分, 可分为绝对定位和相对定位, 绝对定位又称单点定位, 是采用单台GPS接收机进行观测获得WGS84坐标系中的坐标, 传统的单点定位一般利用测码伪距观测值及广播星历提供的卫星轨道参数及卫星钟差改正数进行解算测点坐标, 由于广播星历的精度比较低, 同时单点定位也无法削弱大气层延迟等误差, 故此传统的单点定位精度较低, 无法满足高精度用户的要求。相对定位采用2台以上的接收机同步观测^[1], 由于卫星星历及大气层延迟的相关性, 所以能有效消除或削弱这些误差, 使得定位精度大大提高, 目前相对定位是高精度定

位中的主要方法。

但单点定位的数据采集和数据处理较为方便、自由、简单, 而且费用较低, 所以单点定位具有很大的诱惑力, 一直以来, 国内外众多的学者都在精心研究提高单点定位精度的方法。国际GPS服务组织 (IGS) 的成立及运行为高精度单点定位提供了条件。

美国推进喷气实验室 (JPL) 的Zumbeger等人于1997年研究出一种精密单点定位的方法, 其静态内符合精度在水平方向达到毫米级, 高程方向达厘米级 (单天解), 在全球范围内动态定位的内符合精度水平方向为8 cm, 高程方向为20 cm。

收稿日期: 2013-05-02

作者简介: 唐有国 (1970—), 男, 高级工程师, 主要从事港口测量及技术管理工作。

Hatch等人还发展出一款在水平方向精度达10 cm的全球实时精密定位系统 (Global RTK)，国内的专业人员也做了大量类似的研究，其结果与国外的研究相当。

1 精密单点定位的原理

1.1 GPS定位的观测方程

载波相位测量的观测方程

$$\varphi(t_r) = |\rho|/\lambda - f\delta t_s + f\delta t_r + \delta\varphi_{trop} + \delta\varphi_{ion} + \delta\varphi_{mul} + \delta\varphi_{rel} - N + \varepsilon_p \quad (1)$$

测码伪距观测方程

$$P(t_r) = |\rho| - c\delta t_s + c\delta t_r + \delta P_{trop} + \delta P_{ion} + \delta P_{mul} + \delta P_{rel} + \varepsilon_p \quad (2)$$

式中： $\varphi(t_r)$ 为接收机在 t_r 时刻的载波相位观测值； ρ 为卫星至接收机的距离； λ 为载波的波长； f 为载波的频率； δt_s 为 t_s 时刻的卫星钟的钟差； δt_r 为 t_r 时刻的接收机钟的钟差； $\delta\varphi_{trop}$ 为对流层引起的相位延迟； $\delta\varphi_{ion}$ 为电离层引起的相位延迟； $\delta\varphi_{mul}$ 是多路径效应引起的相位误差； $\delta\varphi_{rel}$ 是相对论效应引起的相位误差； N 为整周模糊度； ε_p 为载波相位测量的噪声； $P(t_r)$ 为接收机在 t_r 时刻的测距码观测值； δP_{trop} 为对流层引起的距离延迟， $\delta P_{trop} = \lambda\delta\varphi_{trop}$ ， δP_{ion} 为电离层引起的距离延迟， $\delta P_{ion} = -\lambda\delta\varphi_{ion}$ ； δP_{mul} 是多路径效应引起的距离误差； δP_{rel} 是相对论效应引起的距离误差， $\delta P_{rel} = -\lambda\delta\varphi_{rel}$ ； ε_p 为伪距测量的测量噪声。

上两式中的 ρ 可由下式计算：

$$\rho = X_s(t_s) - X_r(t_r) \quad (3)$$

式中： $X_s(t_s)$ 为 t_s 时刻卫星的位置矢量； $X_r(t_r)$ 为 t_r 时刻接收机的位置矢量。

由式(1)~(3)解算接收机的位置时，在相对定位及传统的单点定位中，卫星位置(轨道参数)及卫星钟差可以用从星历文件提取的数据进行必要的处理而求得，接收机钟差、电离层延迟及对流层延迟、多路径效应、相对论效应等等用其它方法处理，可见星历的精度对定位精度有着重大影响，用广播星历求得的卫星位置精度只有数米至数十米，卫星钟差改正数的误差为±20 ns左右，因为是相对定位，可以采用站间、星间求差的办法消除卫星轨道误差及卫星钟差对测站定位精度的影响^[1]，且能大大削弱电离层及对流层延

迟，所以相对定位能获得很高的定位精度，但对于单点定位而言，因为只有单台接收机观测，故无法采用求差的方法，必须另辟蹊径。

1.2 提高单点定位精度所采用的措施

1) 采用IGS提供的精密星历。

目前IGS发布的星历产品如表1所示。

表1 IGS发布的星历产品

星历类型	卫星位置/ cm	钟差精度/ ns	延迟 时间	更新率	采样 间隔 /min
广播星历	约200	约7	实时		
预报星历(P)	约10	约5	实时	4次/d	15
预报星历(O)	5	约0.2	3 h	4次/d	15
快速星历	5	0.1	17 h	1次/d	15/5
事后星历	约5	0.1	约13 d	1次/周	15/5

这些星历数据可以从IGS的网站下载，目前免费提供。

从表1可知，事后星历及快速星历的采样率最快，只有5 min，但一般的接收机采样率多为15 s或30 s，甚至有些接收机采样率高达5 s，所以星历的采样率不能满足要求。对于轨道(即卫星坐标)参数，可以用拉格朗日多项式进行内插^[2]，而由于卫星钟稳定度不够，直接内插的数值达不到所需精度，故还要作更进一步的处理，有一种方法是利用内插的轨道参数，并结合若干个IGS跟踪站的数据进行估算求得^[3]。另外IGS的分析中心JPL目前也提供30 s时间间隔的钟差改正数，可直接采用。

2) 采用双频双码接收机。

根据不同频率的载波受到电离层影响不同的原理，采用双频观测值可以有效消除电离层延迟，获得组合的观测值方程。

3) 采用更加精确的数学模型对其他误差进行改正。

经过以上处理之后，就能建立精密单点定位的误差方程：

$$v_{\rho(i)}^j = \rho_{(i)}^j + c\delta t_r(i) + \delta\rho_{trop}^j(i) - P^j(i) + \varepsilon_p \quad (4)$$

$$v_{\varphi(i)}^j = \rho_{(i)}^j + c\delta t_r(i) + \delta\rho_{trop}^j(i) + \lambda N^j(i) - \lambda\varphi^j(i) + \varepsilon_\varphi \quad (5)$$

式中： j 为卫星号； i 为历元号； $\delta t_r(i)$ 为历元 i 时的接收机钟差； $\delta\rho_{trop}^j(i)$ 为对流层延迟影响； ε_p 、 ε_φ 为多路径、观测噪声等未模型化的误差影响； $P^j(i)$ 、 $\varphi^j(i)$ 为

消除了电离层影响的组合观测值; $v_{\rho(i)}^j, v_{\varphi(i)}^j$ 为观测误差; λ, c 为载波波长和光速; $\rho^j(i)$ 为信号发射时刻卫星位置到信号接收时刻接收机位置的距离; $N^j(i)$ 为消除电离层影响后组合观测值的整周模糊度。

把 (4) 和 (5) 式线性化, 得到:

$$V(i) = A \times X(i) + L(i) \quad (6)$$

$$X(i) = [x, y, z, \delta t, \delta \rho_{trop}, N^j]^T \quad (7)$$

式中: A 为设计矩阵; $L(i)$ 为相应的观测值减去忽略理论计算值得到的常数项; $X(i)$ 为待求参数, x, y, z 为接收机的位置 (空间直角坐标)。

解算出式 (6) 和 (7) 后, 就可以得到相当精确的测站坐标。

值得一提的是, 由于 IGS 提供的精密星历中轨道参数是基于 ITRF 参考系的, 所以计算得到的测站坐标也是在 ITRF 参考系的坐标, 它与 WGS84 坐标系有所区别, 但事实上坐标值相差不是很大。WGS84 自建立以来, 经过了数次精化, 最近的一次精化是 2001 年^[4], 它与 ITRF2000 一样都是采用 2001 历元, 其它的椭球参数也非常接近, 所以目前的 WGS84 与 ITRF2000 差异很小, 在工程测量领域几乎可以认为是一致的。另外 ITRF 框架也是不

断变化的, IGS 每隔一段时间就会修改框架的历元, 目前最新采用的 ITRF2008, 各个不同的 ITRF 之间有严密的转换关系, 它们之间的坐标差值基本在 10 cm 之内。

2 精密单点定位在境外工程项目中的应用

2.1 实践数据统计

随着我国的对外投资越来越多, 在境外的工程项目也不断增加, 在一些基础测绘较为落后的发展中国家, 常常遇到获取起算控制点困难的问题, 对项目的进度带来不利。

鉴于此种现状, 建议采用精密单点定位方法予以解决, 如前所述, 目前静态单点定位的精度在水平方向已经达到毫米级, 具体的说, 经过一段足够长的连续观测, 其精度可以到达 1 cm, 这完全能满足工程测量的需要。

根据笔者对大量实践数据的统计, 3 h 以上的静态观测, 测站的坐标值趋于稳定, 但观测 6 h 以上的结果更为可靠, 采用少于 3 h 的观测数据处理得到的坐标成果有部分点精度尚可, 但另一部分点的精度却比较差, 统计数据见表 2。

表 2 PPP 精度统计

点名	所属地区	所属框架	观测次数	观测时间分布	观测时长/ min	X最大 互差/m	Y最大 互差/m	高程(大地 高)最大互 差/m	平面点 位中误 差/m	观测条件
N6		ITRF2005	4	2010-03	45 ~ 225	0.021	0.074	0.075	0.027	好
N6		ITRF2008	7	2011-05/2011-08	60 ~ 145	0.069	0.171	0.125	0.060	好
N8	广州 (22°40'N, 113°40'E)	ITRF2005	3	2008-11/2010-03/2010-08	约60	0.015	0.006	0.024	0.011	好
N8		ITRF2008	6	2011-05/2011-08	60 ~ 145	0.076	0.160	0.149	0.057	好
N48		ITRF2005	2	2008-11/2010-03	45 ~ 225	0.020	0.261	0.015	0.131	受过过往车辆影响
N48		ITRF2008	4	2011-05/2011-08	60 ~ 145	0.154	0.190	0.389	0.094	受过过往车辆影响
和安卫生院		ITRF2005	4	2010-04	60 ~ 205	0.014	0.073		0.028	好
三河村委会	湛江 (20°30'N, 110°20'E)	ITRF2005	2	2010-04	190 ~ 225	0.008	0.014		0.008	附近有无线发射站
X2		ITRF2005	3	2010-04	约80	0.066	0.344		0.129	附近有风力发电
X4		ITRF2005	4	2010-04	60 ~ 145	0.062	0.082		0.041	附近有风力发电
X5		ITRF2005	3	2010-04	205 ~ 215	0.007	0.018		0.008	好
D22	吉布提 (1°33'N, 42°30'E)	ITRF2008	4	2013-02/2013-03/2013-04	360	0.016	0.022		0.010	
H01	斯里兰卡	ITRF2005	4	2008-05	60 ~ 190	0.020	0.047		0.020	约1/4天空视野有障碍物
H01	Hambantota	ITRF2008	2	2012-08	约90	0.031	0.000		0.016	约1/4天空视野有障碍物
H07	(6°08'N, 81°05'E)	ITRF2005	4	2008-05	50 ~ 70	0.013	0.200		0.074	附近有一片水域
H07		ITRF2008	5	2012-08/2012-10	65 ~ 100	0.021	0.136		0.044	附近有一片水域

表2中D22的PPP解算结果与业主提供的已知坐标相比,较差小于10 cm,这还包含了由于协议框架不同及已知数据自身的精度所造成的差异,可见PPP的结果是可以接受的。至于其余各点,由于没有已知数据作为比较,所以不能确定其与真值的具体差异,但可以通过比较各次的测量结果来判断其稳定性,从而推测其精度。

总之,通过这些实践数据可以证明,采用PPP方法解决缺乏起算资料的工程项目的平面控制起算点的问题是可行的。

2.2 采用PPP方法进行平面控制的步骤

1) 布设控制网,按相对定位方式进行静态观测,其中一个控制点观测较长的时间,建议超过6 h,最好观测2次以上。

2) 采用PPP方法对长时间观测的那个点进行坐标解算。

可以采用软件自行解算,目前国内外有很多软件可以解算,如美国喷气推进实验室(JPL)的GIPSY,德国地学研究中心(GFZ)的EPOS,武汉大学的PANDA、TRIP等等。自行解算前,需从IGS相关网站下载精密星历。

另外,还可以把观测数据转换成RINEX格式之后,上传到在线GPS解算网站进行解算,目前国外有很多这样的网站提供免费GPS数据解算服务,如加拿大CSRS-PPP、GAPS,美国的APPS等,上传数据的时间应在观测之后6 h,因为精密星历是事后星历,需要一段时间后才能获得。上传数据之后,大多数网站会在很短的时间内返回解算结果,例如CSRS-PPP只需几分钟便可完成。

3) 进行坐标转换。

4) 获得该点坐标结果后,如果需要很精确的WGS84坐标,就要进行坐标转换,把观测时IGS所采用参考框架(目前是ITRF2008,以后会定期更新)坐标转换为ITRF2000的坐标,对测绘领域而言,其坐标值接近于WGS84坐标。

5) 对全网进行解算。以该点为起算点,采用相对定位方法对全网进行解算,就可以得到网内相对精度很高(取决于观测精度)平面控制点,该控制网的绝对精度很大程度上取决于采用PPP进行解算

的那个点的精度。

2.3 采用PPP的方法获取平面控制网的起算点的注意事项

1) 尽量选择靠近全网中心的的控制点。

2) 控制点的选点应满足一般GPS控制网的要求。

3) 采用双频接收机。在PPP解算的时候,需要利用两种频率的观测值来消除电离层延迟。

4) 该点的观测时间一定要足够长,建议6 h以上。从式(1)和(2)可知,GPS测量的观测方程中有一项多路径效应的影响,该影响具有周期性,周期一般为数分钟至数十分钟,进行长时间观测可大大削弱这项误差^[2]。

另外,长时间的观测可以获得更多的观测量,理论上观测值越多,测量精度就越高。

5) 观测两次以上,这样既可提高精度,也可判断其可靠性。若条件许可,两次观测时间间隔尽量长一些,比如超过一个月。在各次的解算结果较差不大的情况下,取平均值作为最终结果。需要注意的是,用于取平均值的各次坐标应该是基于同一个ITRF框架下的。

3 结论

在观测条件理想的情况下,采用双频接收机观测足够长的时间,采用PPP方式进行解算,其坐标成果已经能获得很高的精度。采用该方法测定控制起算点的精度能满足大多工程项目的要求。在无法从其它渠道获得控制起算点的境外项目中,采用该方法是可行的。

参考文献:

- [1] 王昆杰,王跃虎,李征航. 卫星大地测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 1990.
- [2] 李征航,吴秀娟. 全球定位系统GPS技术的最新进展第四讲精密单点定位[J]. 测绘信息与工程, 2002(5): 34-37.
- [3] 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): 234-239.
- [4] 陈俊勇. 世界大地坐标系1984的最新精化[J]. 测绘通报, 2003(2): 1-3.

(本文编辑 武亚庆)