

流动站与参考站不同采样率 GPS 数据处理新方法

肖国锐¹ 隋立芬¹ 宋 倩² 段 宇¹

(1 信息工程大学地理空间信息学院,郑州市陇海中路 66 号,450052)

(2 信息工程大学导航与空天目标工程学院,郑州市科学大道 62 号,450051)

摘 要:针对动态 GPS 相对定位时流动站与参考站采用不同采样率的情况,提出了在全部同步历元先行平差的基础上,将流动站上每两个最近同步历元之间的非同步数据作为一个数据段单独处理,以相邻历元相位差分作为观测量,整体平差段内所有非同步历元流动站坐标的分段平差方法。该方法顾及了历元间差分定位所带来的相关性,有效地改善了历元间差分定位误差累积效应。算例表明,新方法更为严密可靠,并提高了流动站定位精度。

关键词:GPS 动态差分定位;不同采样率;同步观测;历元间相位差分;平差

中图分类号:P228.41

在 GPS 定位中,采用相位观测值且模糊度正确固定后,基线估值的中误差一般在 cm 甚至 mm 级^[1-2]。动态 GPS 双差相对定位模式需要参考站与流动站有同步的观测数据,必须在流动站和参考站并置高采样率的接收机同步观测^[3]。我国国家连续运行参考站(CORS)系统^[4]及地壳运动观测网络(CMONOC)^[5]系统中静态观测站的坐标精度很高,又有连续观测数据,实用中,若将它们作为动态测量中的已知参考站,便可省略布设参考站的成本。但 CORS 系统的采样率往往低于所需要的采样率,有的历元没有同步观测数据(简称非同步历元),无法按一般的动态双差定位模型解算出流动站全部历元的坐标。

对不同采样率的平差,一般都采用两步平差策略:第一步,将同步历元的观测数据按动态双差平差模型进行平差,求得同步历元的坐标;第二步,再单独处理流动站上非同步历元的平差问题。针对第二步处理,文献[6]提出了用流动点历元间差分数据作为观测量,以相近历元与基准点存在同步观测数据的流动点作为已知点,内插流动点坐标的算法,解决了个别历元基准点观测数据缺失的问题。文献[7]采用历元间的相位差分计算流动站的高精度“伪距”,同步历元之间逐历元差分解算,较好地解决了流动站实时导航的问题。

但此方法随着时间的增加,系统误差积累,将会严重影响流动站非同步历元的定位精度。

针对这两点问题,本文提出了一种新的分段平差方法。新方法顾及了历元间差分定位所带来的相关性,改善了历元间差分定位误差累积效应,提高了流动站非同步历元的定位精度,并用实测数据验证了该方法的正确性及可行性。

1 算法原理与数学模型

1.1 算法原理

算法原理类似于水准测量中在两个已知点之间布设一条附合水准路线的平差原理。如图 1 所示,历元 A 和历元 B 是运动载体沿运行轨迹的两个最近同步历元,同步历元流动站和参考站有同步观测值,利用双差相对定位^[8-9]解算其坐标,其定位精度较高,在非同步历元坐标平差解算时将其作为真值。

设在流动站上从历元 A 到历元 B 共有 n 历元,每历元分别接收到 k 颗卫星的载波相位观测值 $\phi_i^j (j=1,2,\dots,k; i=1,\dots,n)$,将相邻的相位差分 $(\phi_{i-1}^j - \phi_i^j)$ 作为观测量,总共有 $(n-1) \times k$ 个差分观测值,每个观测方程中包含相邻两历元的坐标。将 A、B 作为已知点,非同步历元的坐标作

收稿日期:2013-06-18。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41274016,41174006,40974010)。

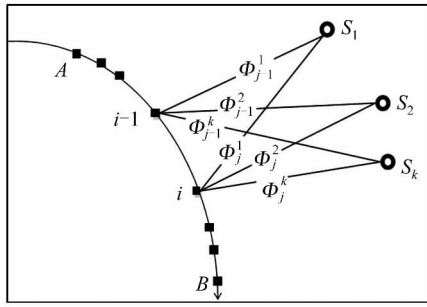


图 1 算法原理

Fig. 1 Principle of New Method

为未知数,历元相位差分作为观测值,顾及观测值的相关性,分段平差,就可一并解算 A、B 间全部非同步历元流动站的坐标。

1.2 分段平差法误差方程

设第 i 历元流动站坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 坐标改正数为 $(\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i)$, 则 GPS 非差相位观测值 φ_i^j 的误差方程为^[9-11]:

$$\begin{aligned} v_i^j = & l_i^j \delta x_i + m_i^j \delta y_i + n_i^j \delta z_i + \\ & c(dt_i - dt_i^j) + d_{\text{trop}} - d_{\text{ion}} + d_{\text{tide}} + \\ & d_{\text{mul}} + d_{\text{rel}} + \lambda N^j + \rho_i^j - \lambda \varphi_i^j \end{aligned} \quad (1)$$

式中,上标“ j ”表示卫星编号;下标“ i ”表示流动站历元编号; N^j 为整周模糊度; φ_i^j 为载波相位观测值; ρ_i^j 是由流动站的坐标近似值和卫星的坐标计算的站星距离; dt_i 和 dt_i^j 分别为接收机和卫星的钟差; d_{ion} 、 d_{trop} 、 d_{tide} 、 d_{mul} 和 d_{rel} 分别是由电离层、对流层、潮汐、多路径及相对论效应引起的误差; l_i^j 、 m_i^j 和 n_i^j 是测站至卫星的方向余弦。

分段平差法对式(1)中各种误差处理如下:卫星钟差的改正可以根据精密钟差文件内插求定,然后加上相对论效应改正;在利用精密星历求解卫星坐标时,可加上地球自转改正;多路径效应引起的误差较小,在此忽略不计。当流动站接收机的采样率不低于 1 Hz,且载体运动速度有限时,对于变化缓慢、空间相关性较强的电离层、对流层,相邻历元间差分可以大大削弱其影响。模糊度参数在相位观测值不发生周跳的情况下是不变的,通过前后历元观测值差分将其消除。

第 i 历元和第 $(i+1)$ 历元的同一颗星的相位观测值进行差分,顾及上述分析的各种误差处理可得历元间相位差分观测值的误差方程为:

$$\begin{aligned} v_{i,i+1}^j = & -l_{i+1}^j \delta x_i - m_{i+1}^j \delta y_i - n_{i+1}^j \delta z_i + c(dt_{i+1} - dt_i) + \\ & l_{i+1}^j \delta x_{i+1} + m_{i+1}^j \delta y_{i+1} + n_{i+1}^j \delta z_{i+1} - \\ & c(dt_{i+1}^j - dt_i^j) + \rho_{i+1}^j - \rho_i^j - (\lambda \varphi_{i+1}^j - \lambda \varphi_i^j) \end{aligned} \quad (2)$$

令

$$\Delta t_{i,i+1} = dt_{i+1} - dt_i \quad (3)$$

$$L_{i,i+1} = \rho_{i+1}^j - \rho_i^j + \lambda(\varphi_i^j - \varphi_{i+1}^j) - c(dt_{i+1}^j - dt_i^j) \quad (4)$$

可得:

$$\begin{aligned} v_{i,i+1}^j = & -l_{i+1}^j \delta x_i - m_{i+1}^j \delta y_i - n_{i+1}^j \delta z_i + l_{i+1}^j \delta x_{i+1} + m_{i+1}^j \delta y_{i+1} + \\ & n_{i+1}^j \delta z_{i+1} + c\Delta t_{i,i+1} + L_{i,i+1}, i = 2, 3, \dots, n-2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $(\varphi_i^j - \varphi_{i+1}^j)$ 为历元间相位差分观测值; ρ_{i+1}^j 和 ρ_i^j 用流动站的近似坐标和卫星坐标计算,为减少迭代次数,可用伪距计算流动站近似坐标; dt_i^j 和 dt_{i+1}^j 用 IGS 提供的精密钟差数据内插,故 $L_{i,i+1}$ 是方程的常数项。为减少待估参数,不直接求解各历元接收机钟差,改求式中 $\Delta t_{i,i+1}$,故此误差方程中有 7 个未知参数。

分段平差法以相邻同步历元分割的非同步历元数据段为一个整体,其中第一个历元和最后一个历元为同步历元,以各相邻历元相位差分为观测值,按照式(5)逐历元列误差方程,可列出 $(n-1) \times k$ 个误差方程。第一个误差方程与最后一个误差方程较为特殊,因为整体数据段中第一个和最后一个历元的坐标和卫星的坐标已知,故其坐标改正数为零。在第 i 和第 $i+1$ 个误差方程中共同存在未知参数 $(\delta x_{i+1}, \delta y_{i+1}, \delta z_{i+1})$,故误差方程组中共存在 $(4n-7)$ 个未知参数。当 $k \geq 4$ 时, $k(n-1) \geq 4(n-1)-3$,故此误差方程组可求解。

1.3 观测值协方差矩阵

设流动站第 i 历元和第 $(i+1)$ 历元观测到相同的 k 颗卫星,原始观测测量矢量为 $L_i = (L_i^1 \dots L_i^k)$,则历元间差分为:

$$SD_{i,i+1} = (L_{i,i+1}^1 \dots L_{i,i+1}^k)^T \quad (6)$$

上式可由线性变换表示为:

$$SD_{i,i+1} = C \cdot L_{i,i+1} \quad (7)$$

其中 $C = (-E_{i+1}, E_{i+1})$, E_{i+1} 表示为 k 维的单位矩阵。可得分段平差法误差方程为:

$$ASD = (SD_{1,2} \dots SD_{n-1,n})^T = DL \quad (8)$$

式中,

$$D = \begin{bmatrix} E_1 & E_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -E_2 & E_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -E_{i-2} & E_{i-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -E_{i-1} & E_{i-1} \end{bmatrix}$$

则分段平差法的协方差矩阵为:

$$\text{cov}(ASD) = D \cdot \text{cov}(L) \cdot D^T \quad (9)$$

2 机载实验数据分析

算例数据取自 2007-02-14 我国某地航空重

力测量机载双频 GPS 接收机的实测数据,基准站设在机场停机坪附近,采样间隔为 1 s,历元总数 38 971。飞机静止状态下加速起飞然后平稳飞行一段时间后再飞回出发地,飞机距基准站最远航点为 307.625 km,飞行航迹如图 2 所示。

为验证本算法的正确性与可行性,选择流动站和基准站在每个历元均有观测值的数据,用商业软件 Grafnav7.0 按双差模式求得每点的坐标作为真值,然后重新提取参考站的观测数据,采样间隔分别为 15 s、30 s、60 s,流动站仍然采用采样间隔为 1 s 的原始数据。算例采用以下两种方案。

方案一 用文献[7]的算法计算流动站非同

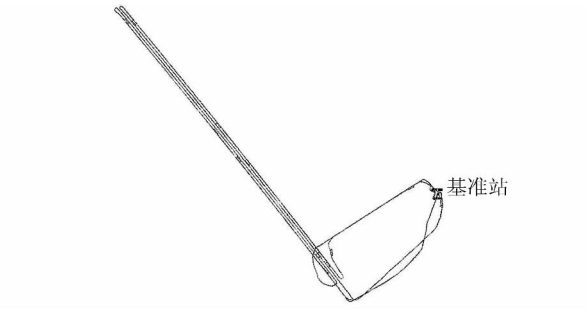
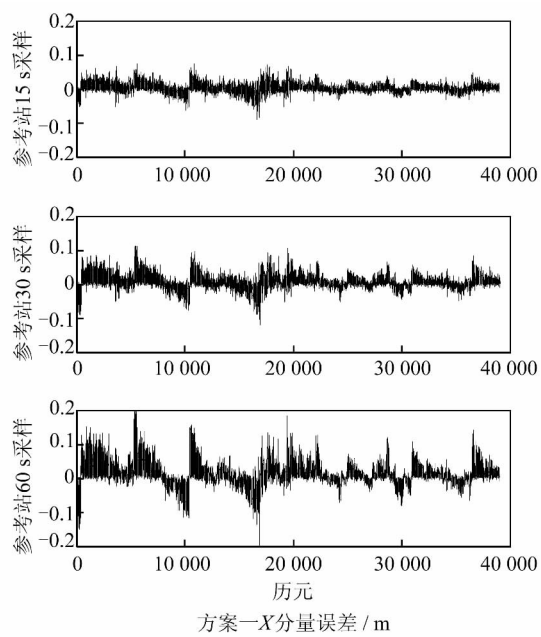


图 2 飞机飞行航迹图
Fig. 2 Route of Airplane

步历元坐标;
方案二 用分段平差法计算流动站非同步历元坐标。

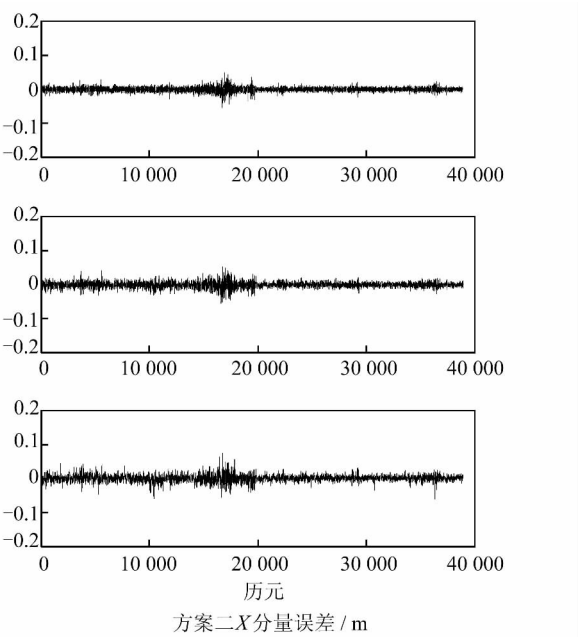


图 3 方案一和二对应于参考站采用间隔为 15 s、30 s、60 s 的数据处理结果
Fig. 3 Schemes 1 and 2 are Corresponding to the Sampling Interval 15 s,30 s,60 s of Reference Receiver

图 3 表示的是两种方案 X 分量的误差特性。由图 3 可以看出,本文分段平差法较好地改善了实时解算法产生的误差积累效应,提高了定位精度。文献[7]的方法从一个同步历元开始,逐历元差分求解非同步历元的坐标。虽然前后历元差分能够削弱对流层、电离层等误差产生的影响,但并不能完全消除,残留的误差在下一非同步历元差分时会积累,尤其当长时间无同步观测、载体运动状态变化快时累积误差影响更为严重。而分段平差法,利用每一段非同步历元首尾同步历元高精度的双差解,分段平差求解非同步历元坐标,能进一步削弱前后历元差分残留的误差,得到高精度的定位结果。两种方法在 16 000~18 000 历元处定位精度都比较差,这主要是因为飞机飞回机场

重新出发,经历了停止到再起飞的阶段,数据观测质量较差,但这种情况下仍然看出分段平差法能得到更高精度的定位结果。其他两分量特性与之类似,统计结果见表 2。

为进一步比较飞机各种运动状态下两种方案的精度,选择全部航线和其中较为典型的一段飞机从静止到平稳飞行的数据作统计分析。

表 1 飞机运行状态的各个阶段及对应历元

Tab. 1 Stages of Airplane Flight and Corresponding Epochs	
运动状态	历元
静止(a)	3 001~4 001
加速起飞(b)	4 001~7 505
平稳飞行(c)	7 505~9 000
全部航线(d)	1~38 971

表 2 流动站各运动阶段 RMS 统计表/m
Tab. 2 Statistics of RMS According to the Rover Movement Stages(m)

	参考站 采样间隔	a		b		c		d	
		方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二
X 分量	15 s	0.014 9	0.005 5	0.030 2	0.009 3	0.012 1	0.005 6	0.013 0	0.005 3
	30 s	0.023 4	0.009 4	0.053 5	0.013 9	0.018 8	0.008 2	0.021 7	0.007 3
	60 s	0.035 3	0.011 5	0.100 1	0.017 8	0.028 1	0.009 1	0.038 4	0.009 2
Y 分量	15 s	0.019 3	0.007 6	0.034 0	0.013 1	0.018 3	0.011 0	0.017 2	0.007 0
	30 s	0.024 4	0.012 6	0.055 3	0.019 6	0.027 1	0.013 5	0.028 3	0.010 0
	60 s	0.031 1	0.015 6	0.095 4	0.026 1	0.036 8	0.015 9	0.048 9	0.013 2
Z 分量	15 s	0.035 4	0.012 5	0.047 5	0.013 6	0.011 0	0.005 5	0.019 1	0.007 2
	30 s	0.045 9	0.024 1	0.077 8	0.024 5	0.017 0	0.007 1	0.031 7	0.010 5
	60 s	0.054 8	0.029 3	0.133 2	0.032 6	0.024 8	0.008 5	0.055 5	0.013 9

由表 1 及表 2 可以看出,本文方法在流动站各种运动状态下都能得到更高的精度,尤其当采样间隔较大时,精度提高更为明显。但使用相同算法,飞机静止时定位精度最高,平稳飞行时次之,加速起飞最差。可见,流动站非同步观测数据的定位精度与载体的运动状态等因素有密切联系。

图 4 是由上节推导的协方差矩阵计算的流动站前 60 个历元的 PDOP 值。可以看出,参考站取 15 s、30 s、60 s 采样间隔所得到的数据段都表现出中间位置精度较差、越靠近两端同步历元精度越高的现象,主要是因为数据段首尾有高精度的同步历元解算值,对误差累积有抑制作用;参考站取 15 s 采样间隔时 PDOP 值最小,参考站取 60 s 采样间隔时 PDOP 值最大,这说明参考站采样间隔越大,误差累积越大,流动站非同步历元的定位精度越低。笔者做过流动站采样率 120 s 的实验,两种方法都不能满足 cm 级定位要求,实际应用中应根据精度要求、成本预算选择合适的采样率。

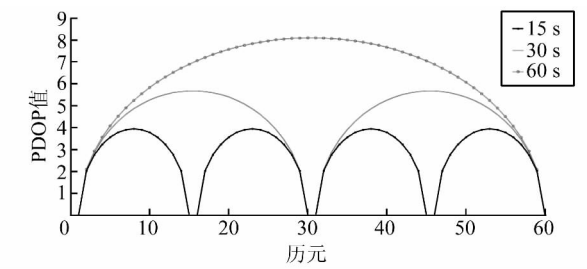


图 4 非同步历元流动站的 PDOP 值
Fig. 4 PDOP of Nonsynchronous Epochs

3 结 语

本文针对参考站与流动站采用不同采样率 GPS 数据的情况,提出一种事后处理的分段平差方法。结果表明,新方法更为严密,能得到更高的定位精度。在实际应用中,可根据载体运动状态、精度要求、成本预算等因素选择合适的参考站与流动站采样率,使用本文算法处理数据,从而达到

节省资源、降低生产成本的目的。

参 考 文 献

[1] 王广运. 载波相位差分 GPS 定位技术[J]. 测绘工程,1999,8(1):12-17

[2] Teunissen P J G. A Canonical Theory for Short GPS Baselines Part I: the Baseline Precision[J]. Journal of Geodesy,1997,71(6):320-336

[3] Hwang C W, Hsiao Y S, Shih H C, et al. Geodetic and Geophysical Results from a Taiwan Airborne Gravity Survey: Data Reduction and Accuracy Assessment[J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth,2007,112:B04407

[4] 陈俊勇,张鹏,武军郢,等. 关于在中国构建全球导航卫星国家级连续运行站系统的思考[J]. 测绘学报,2007,36(4):366-369

[5] 甘卫军,张锐,张勇,等. 中国地壳运动观测网络的建设及应用[J]. 国际地震动态,2007,7:43-52

[6] 宋力杰,柴洪洲,刘先冬,等. 基准点无同步观测数据时流动点位置内插方法[J]. 测绘科学技术学报,2010,27(5):316-318

[7] 王海涛,欧吉坤,袁运斌,等. 流动站与参考站不同采样率 GPS 数据的处理策略[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2010,35(2):164-167

[8] 邱蕾,花向红,蔡华,等. GPS 短基线整周模糊度的直接解法[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2009,34(1):97-99

[9] 魏子卿,葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型[M]. 北京:测绘出版社,1998

[10] Xu Guochang. GPS Theory, Algorithms and Applications[M]. Berlin:Springer-Verlag,2007:39-40

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

第一作者简介:肖国锐,硕士生,主要从事 GNSS 数据处理理论与方法研究。

E-mail:xgr@whu.edu.cn (下转第 1224 页)

- [6] 孙红星. 差分 GPS/INS 组合定位定姿及其在 MMS 中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2004
- [7] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相位定位的数学模型[M]. 北京: 测绘出版社, 1998
- [8] 王泽民, 邱蕾, 孙伟 等. GPS 现代化后 L_2 载波的定位精度研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(8): 779-782
- [9] Herring T A, King R W, McClusky S C. GAMIT Reference Manual Release 10. 4 [EB/OL]. http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/GAMIT_Ref.pdf.
- 第一作者简介: 郭际明, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高精度 GNSS 定位技术及应用领域的教学与科研工作。
E-mail: jmguo@sgg.whu.edu.cn

Extended DUFCOM of Ambiguity Resolution for Single Epoch GPS Positioning Solution Analysis

GUO Jiming^{1, 2} ZHOU Mingduan^{1, 2} HUANG Changjun¹ WU Mengqi

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

(2 Key Laboratory of Precise Engineering & Industry Surveying, NASMG, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: The ambiguity resolution theory of GPS L_1 phase observation using single epoch data based on DUFCOM was analyzed, the extended DUFCOM was developed. A new single epoch ambiguity fixing method was proposed for GPS L_2 , L_n and L_w . The property of the extended method was given, furthermore, and the efficiency of ambiguity resolution and the accuracy of positioning solution for the above four phase observations were compared in theory and result.

Key words: GPS integer ambiguity; phase observations; DUFCOM; single epoch positioning

About the first author: GUO Jiming, Ph.D., professor, Ph.D supervisor, majors in the education and research on application of high-precision GNSS positioning technology.

E-mail: jmguo@sgg.whu.edu.cn

(上接第 1215 页)

A New Method for Processing the Rover and the Reference Stations GPS Data with Different Sampling Rates

XIAO Guorui¹ SUI Lifan¹ SONG Qian² DUAN Yu¹

(1 Institute of Geospatial and Information, Information Engineering University, 66 Middle Longhai Road, Zhengzhou 450052, China)

(2 College of Navigation and Aerospace Engineering, Information Engineering University, 62 Kexue Road, Zhengzhou 450051, China)

Abstract: In order to process the rover and the reference stations GPS data with different sampling rates, a new method is introduced. Firstly, all the epochs of rover that have synchronous observations with reference station are adjusted together and treated as known points. Secondly, we treat the observations of rover between two adjacent known points as a whole, use differential data between epochs of roving stations as observations, and adjust all the coordinates of roving stations in the whole together. The new method takes the correlation between epochs into consideration and reduces the error accumulation of difference between epochs. An experiment was carried out. The result shows that new method is more rigorous and can improve the rover positioning precision.

Key words: kinematic GPS differential positioning; different sampling rate; synchronous observation; difference between epochs; adjustment

About the first author: XIAO Guorui, postgraduate, majors in GNSS data processing.

E-mail: xgr@whu.edu.cn