

海道测量定位中对流层延迟差分估计技术研究

李凯锋¹ 欧阳永忠^{1,2} 陆秀平¹ 吴太旗¹

(1 天津海洋测绘研究所,天津市友谊路 40 号,300061)

(2 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:为削弱海上对流层延迟对高精度海道测量的影响,提出了一种基于差分改正思想的对流层延迟估计方法。首先,以 Saastamoinen 模型作为先验值,采用精密单点定位技术估算对流层改正量。将天顶延迟的残余误差作为待定参数,用 Kalman 滤波估计对流层的残余量;然后,分别估计基准站和移动站的对流层延迟,作为差分计算的初值代入差分解算模型中,从而求得海上移动站的精确位置。实测数据表明,相对于常规动态解,基于对流层差分改正的定位技术改善了移动站的定位精度,其中,垂直方向的精度提高了 17.6%。

关键词:海道测量;精密单点定位;对流层延迟;参数估计

中图分类号:P229.3; P228.42

在海道测量中,利用 GPS 定位的动态测量数据后处理(post processing kinematic, PPK)和精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术可有效确定大地高。海上测量实践表明,PPP 定位对收敛时间要求较高(至少 20 min 以上),较长的收敛时间很难满足动态测量的要求。另外,受海上风浪等影响,GPS 信号容易失锁。而 PPK 方式则对初始化时间要求较低,基准站与移动站距离 40 km 时,约几分钟初始化便可获得固定解。但沿岸 PPK 差分作业时,基准站与移动站所在地的气象条件存在较大差异,而且变化幅度较大,直接影响了常规差分解算时对流层改正量的估算精度,从而影响大地高的测量精度。为削弱对流层延迟的影响,陈招华等分析了区域对流层延迟水平变化对 GPS 测量精度的影响^[1];叶世榕等采用 PPP 方法对对流层延迟精度进行了估计分析^[2];戴吾蛟等利用香港连续运行参考站(continuously operating reference stations, CORS)的数据对香港地区的对流层延迟进行了建模研究,发现高差引起的对流层延迟残余量是精密动态测量的一个主要误差源^[3-4]。

相比于上述以静态定位为对象的研究,目前

对动态定位中的对流层延迟改正研究较少。基于上述考虑,本文根据差分改正的思想,采用 PPP 估算对流层改正量,把经典的 Saastamoinen 模型估值作为先验值,将天顶延迟的残余量作为待定参数,用 Kalman 滤波估计对流层的残余量;然后,分别估计基准站和移动站的对流层延迟,作为差分计算初值代入到常规差分解算模型中,进而分析高差对大地高精度的影响。

1 对流层误差改正模型对比分析

对流层大气折射可用折射指数和高度角有关的积分函数来表示,因折射指数受大气密度时空分布的影响比较复杂,导致求取大气折射积分函数的精确解几乎不可能,所以人们将研究集中在大气折射积分函数近似解的模拟上^[5]。其中,对流层延迟的基本表达式为:

$$T = T_w M_{wet} + T_D M_{Dry} \quad (1)$$

式中, T 为对流层延迟; T_w 为对流层天顶方向延迟湿分量; T_D 为对流层天顶方向延迟干分量; M_{wet} 为湿分量映射函数; M_{Dry} 为干分量映射函数。

目前,一般采用 Hopfield 模型和 Saastam-

收稿日期:2013-04-12。

项目来源:国家重大科学仪器设备开发专项基金资助项目(2011YQ12004503);国家 863 计划资助项目(2006AA06A202, 2009AA121405);国家自然科学基金资助项目(41274045, 41174062, 41074002, 61071006);国家海洋局海底科学重点实验室开放研究基金资助项目(KLSG1002)。

oinen 模型作为经验对流层模型。这两种模型中都有与高程有关的参数,在计算天顶对流层延迟时,既可以使用标准气象元素,也可以利用实测气象数据。然而,在海上动态定位中,湿度较大,气候变化较快,测点局部的实测气象元素不能很好地反映相对湿度、气压和温度的梯度变化。下面利用标准气象元素对上述模型进行对比分析。

采用某海岛 CORS 站一个星期的数据,其采样间隔为 30 s,时段长度为 24 h。分别选用 Saastamoinen 模型、Hopfield 模型和改进的 Hopfield 模型估计对流层延迟。如图 1 所示,估计结果分别与 GAMIT 软件估计的对流层延迟进行比较。

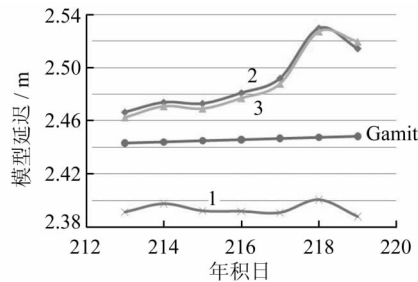


图 1 不同模型估计的对流层天顶延迟

Fig. 1 Tropospheric Zenith Delay Using Different Models

由图 1 可以看出,Saastamoinen 模型估计的精度为 6 cm,且估计值相对于另外两种方法较稳定,Hopfield 模型及其改进方法的估计精度为 10 cm 左右。此实验表明,利用 Saastamoinen 模型估计海上对流层延迟优于后两种模型。

另外,该实验还发现,利用模型改正对流层延迟影响后,干分量部分的改正精度可以达 cm 级,而湿分量部分的残余影响还比较大。因此,还必须考虑对流层湿分量的残余影响。

2 基于 PPP 的对流层延迟参数估计

在稳定的气象条件下使用函数模型法可以很好地改正对流层延迟,但海上水汽变化较大,无论模型中使用的是标准大气参数还是实测气象参数,往往难以反映真实的垂直大气状态。因此,在高精度 GPS 数据处理时,一般将 Saastamoinen 模型改正值作为先验值,然后将天顶延迟的剩余误差作为待定参数,与待定点坐标以及其他未知量一起求解^[6-11]。

在参数最优估计中,Kalman 滤波能够利用状态方程根据前一时刻的状态估计和当前时刻观

测值递推估计新的状态估值。目前,在 GPS 动态定位中较多地应用了 Kalman 滤波技术。由于 GPS 接收机位置及各种误差因子(如对流层延迟)的状态特征是非线性变化的^[12],为此,在对状态方程和观测方程进行线性化后,本文中利用扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filtering,EKF)估计对流层延迟参数及其他用户状态参数,具体步骤如图 2 所示。

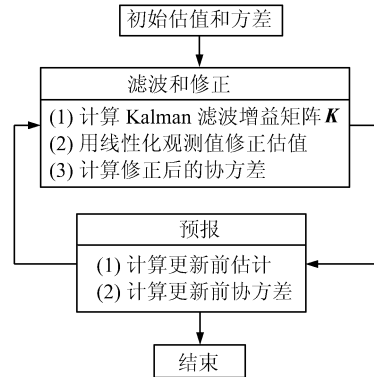


图 2 Kalman 滤波流程

Fig. 2 Flowchart of Kalman Filtering

计算时,把海上移动站的三维位置(X_R, Y_R, Z_R)、整周模糊度、接收机钟差、对流层延迟等作为未知参数。具体滤波递推过程如下:

1) 根据各参数拟达到的精度确定初始协方差阵 $\Sigma_{\hat{x}_0}$ 。

2) 对 GPS 接收机位置及各种误差因子进行线性化,用精密星历中的卫星轨道和前一历元的位置估值计算得到站星间距离:

$$\rho = \sqrt{(X^i - X)^2 + (Y^i - Y)^2 + (Z^i - Z)^2} + c \cdot dT - c \cdot dt - d\rho_{\text{ion}}^i - d\rho_{\text{trop}}^i + d\rho_{\text{mul}} \quad (2)$$

式中, dT 为卫星钟差; dt 为接收机钟差; $d\rho_{\text{ion}}^i$ 为电离层延迟改正; $d\rho_{\text{trop}}^i$ 为对流层延迟改正; $d\rho_{\text{mul}}^i$ 为伪距多路径误差。

令 $A_k = [\partial\rho/\partial x \quad \partial\rho/\partial y \quad \partial\rho/\partial z \quad \cdots]$, A_k 为设计矩阵,矩阵中各元素是式(2)中各变量的偏导数,则可得改正数为:

$$V = L_k - A_k \bar{X}_k \quad (3)$$

3) 将前一历元解算的模糊度 N 作为当前历元的模糊度估值,利用前一历元的信息计算出一步预测值及其预测误差方差阵 $\Sigma_{\hat{x}_k}$ 。

4) 计算增益矩阵 K_k ,得到状态估计值 \hat{X}_k 和状态估计误差方差阵 $\Sigma_{\hat{x}_k}$ 。

5) 利用上一步算得的 \hat{X}_k 以及精密星历经过插值所得的卫星轨道参数和钟差,计算状态转移矩阵 $\Phi_{k,k-1}$ 。

采用某海岛机载双频 GPS 动态定位数据,其

采样间隔为 1 s,时段长度约为 1 h。利用上述方法对天顶延迟进行估计,天顶延迟参数状态噪声初始值为 0.25 m,其结果如图 3 所示。

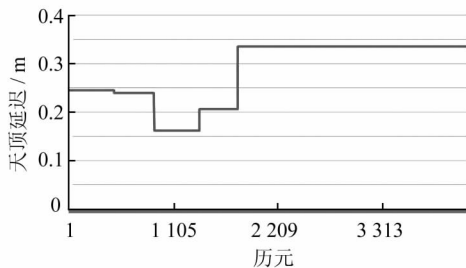


图 3 对流层天顶延迟的参数估值

Fig. 3 Estimating Tropospheric Zenith Delay Using Parameters of Aerial Vehicle

3 基于差分定位的对流层延迟处理

利用差分定位技术可以减小对流层延迟误差的影响,但仅限于移动站与基准站的距离较近、高差较小的情况。对于距离较远或高差较大的基线,差分后残余的对流层延迟将影响基线解的精度,甚至影响整周模糊度的解算^[5]。根据对基线解精度的不同影响,残余对流层延迟大致分为以下两种情况。

3.1 相对对流层延迟

相对对流层延迟是指移动站与基准站之间的对流层延迟差值,它对高程的影响特别显著,其所引起的高程误差为:

$$\Delta h = \Delta d_{\text{trop}} / \sin E_{\min} \quad (4)$$

式中, Δd_{trop} 为相对对流层延迟; E_{\min} 为卫星截止高度角。

利用式(4)可以计算出天顶对流层延迟 ΔZTD 对高程的影响为:

$$\Delta h = \Delta ZTD / \sin^2 E_{\min} \quad (5)$$

当 $E_{\min} = 15^\circ$ 时,1 mm 的 ΔZTD 将导致 14 mm 的高程误差。

3.2 绝对对流层延迟

绝对对流层延迟是指移动站与基准站之间的对流层延迟相同值,主要影响基线的尺度因子,估算公式为:

$$\Delta l / l = d_{\text{trop}} / R_e \sin E_{\min} \quad (6)$$

式中, d_{trop} 为绝对对流层延迟; l 和 Δl 分别为基线长度和偏差; R_e 为地球半径。当 $E_{\min} = 20^\circ$ 时,2 m 的 d_{trop} 将导致约 1×10^{-6} 的尺度偏差。

4 数据实验与分析

海道测量实践表明,在海上动态定位中,即使对于短基线,也需要考虑对流层延迟误差的影响。在数据验证实验中,本文将 PPK 和 PPP 两种定位方式结合使用,首先对基准站和移动站数据采用 PPP 定位方法估算对流层改正量,并将其作为差分计算初值代入到常规差分解算模型中。由于初值精度较高,可以解决前述差分解算中可能遇到的滤波发散问题,从而达到提高对流层改正量估算精度和可靠性的目的。

4.1 船载测量实验

在某海岛附近海域,利用双频接收机的测量数据进行评估验证,其采样间隔为 1 s,测船航迹如图 4 所示。

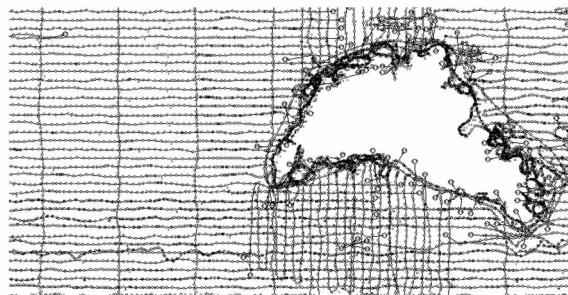


图 4 某海岛水深测量航迹图

Fig. 4 Track Line of Island Depth Surveying

测区离基准站最远距离约 5 km,移动站和基准站的高差约 13 m。利用 PPK 无验潮测量技术^[13-14],使用两种对流层延迟改正方法进行三维坐标解算,其测深结果与基于人工验潮的水深测量的差值如表 1 所示。

表 1 两种定位方法对测深结果的影响/m

Tab. 1 Comparison of Depth Differences as to Two Positioning Methods/m

统计量	常规 PPK 测深 与人工验潮测深	加对流层改正的 PPK 测深与人工验潮测深
最大偏差	0.187	0.200
最小偏差	-0.519	-0.505
平均偏差	-0.118	-0.102
均方根	0.132	0.122
标准差	0.059	0.056

从表 1 可以看出,当测区距离基准站较近时,基准站和移动站的对流层相对变化不大,相对于人工验潮作业方式,两种定位方法的测深精度相当,均能精确地描绘测区的海底地形。

4.2 机载测量实验

采用某海岛机载双频 GPS 动态定位数据进行评估验证。基准站采用该岛临时参考站,采样间隔为 1 s,飞行时长为 1 h,测区面积约为 30 km²,飞机与基准站的最大高差为 490 m,飞行高度随时间的变化如图 5 所示。

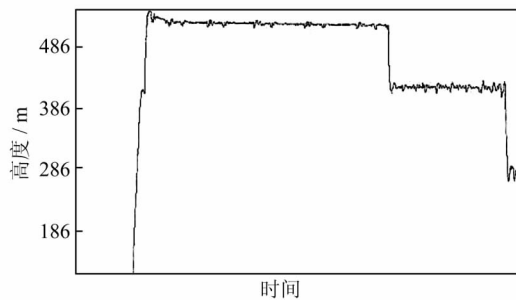


图 5 飞行高度剖面图

Fig. 5 Section of Flying Height

采用传统 PPK、加对流层改正的 PPK 和 PPP 3 种模式对机载双频 GPS 动态定位数据进行处理。以 PPP 测高的定位结果为基准,PPK、改进 PPK 两种模式分别与 PPP 测高结果求差,结果如图 6 所示。

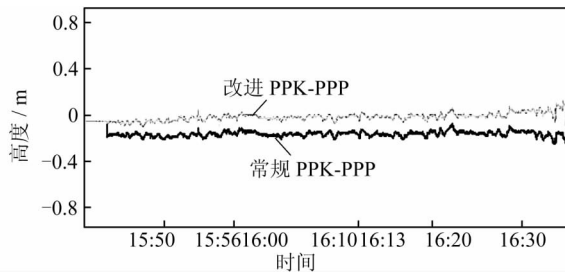


图 6 PPK 及改进 PPK 方法与 PPP 测高差值

Fig. 6 Height Differences by PPK, Improved PPK Versus PPP Method

利用上述差分定位中对流层处理方法计算两组实验数据的天顶相对对流层延迟,其值随时间的变化如图 7 所示。

以 Track 动态定位模块计算结果为真值,进一步比较常规 PPK、加对流层改正的 PPK 和 PPP 在高程方向的精度(见表 2)。可见,利用本文提出的改进 PPK 定位方法亦能提高机载测量中高程方向的定位精度,相对常规 PPK,高程精度提高了 17.6%。

表 2 机载定位中 3 种定位方法在高程方向的精度/cm

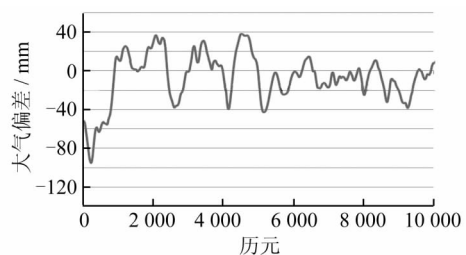
Tab. 2 Height Precision of Airplane by PPK,

Improved PPK, and PPP Methods/cm

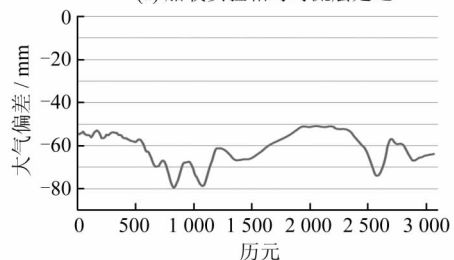
统计量	常规 PPK	改进 PPK	PPP
平均差值	-55.58	-14.04	-1.94
中误差	40.60	33.45	29.10

由图 6 知,常规 PPK 解与 PPP 解的测高平均差值为 0.116 m,而本文提出的加对流层改正的 PPK 解与 PPP 解的测高平均差值仅为 0.032 m,有效提高了高程方向的定位精度。

由表 1 和图 7 可知:① 在双差定位中,动态载体与基准站高差较大时,相对对流层延迟较大,如图 7(b)机载实验中相对对流层延迟均值为 -7.0 cm;② 在船载实验中,海上测量船与基准站的水平距离约为 5 km,高差相对较小,尽管 PPK 与人工验潮水深测量的偏差的标准差优于 6 cm,但此时图 7(a)中的相对对流层延迟变化可达 -9.5 cm,因此,即使是高差较小时,在差分定位中也应考虑对流层延迟变化对定位精度的影响。



(a) 船载实验相对对流层延迟



(b) 机载实验相对对流层延迟

图 7 两组试验数据的天顶相对对流层延迟

Fig. 7 Relative ZTD of Two Experiments

5 结 语

在海道测量中,对流层的梯度变化复杂,移动站与基准站的相对对流层变化较大,对流层延迟是影响海上动态定位精度的主要因素之一。针对对流层延迟干湿分量的特性,本文采用 PPP 定位方法估算对流层改正量,并将其作为差分计算初值代入到常规差分解算模型中,用传统 PPK、加对流层改正的改进 PPK 和 PPP 3 种定位模式对双频 GPS 动态定位数据进行处理。结果表明,改进 PPK 解的精度与 PPP 解的精度相当,优于传统 PPK 解的精度,有效地解决了海上定位中基准站和移动站对流层延迟不一致而导致的测高定位精度降低的问题。

参 考 文 献

- [1] 陈招华,戴吾蛟. 区域对流层延迟水平变化对 GPS 测量精度的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(3):83-87
- [2] 叶世榕,张双成,刘经南. 精密单点定位方法估计对流层延迟精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(8):788-791
- [3] 戴吾蛟,陈招华,匡翠林,等. 区域精密对流层延迟建模[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4):392-396
- [4] 戴吾蛟,陈招华,梁铭. 高差对 GPS 大地高测量精度的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(3):80-83
- [5] 丁晓光. 对流层延迟改正在 GPS 数据处理中的应用与研究[D]. 西安:长安大学, 2009
- [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, 31(1):19-22
- [7] 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉:武汉大学, 2002
- [8] Alkan R M. Hydrographic Surveying with a Tide Gauge [J]. International Hydrographic Review, 2001, 2(1):69-79
- [9] Abdel-tawwab Abdel-salam M. Precise Point Positioning Using Un-Differenced Code and Carrier Phase Observations[D]. Canada: The University of Calgary, 2005
- [10] Wichayangkoon B. Elements of GPS Precise Point Positioning[D]. Orono:University of Maine, 2000
- [11] Hobiger T, Ichikawa R. Ray-traced Troposphere Slant Delays for Precise Point Positioning[J]. Earth Planets Space, 2008, 60(1):1-4
- [12] 杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京:测绘出版社, 2006
- [13] 黄祖珂,黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛:中国海洋大学出版社, 2005:113-115
- [14] 欧阳永忠,陆秀平,黄涛涛,等. GPS 测高技术在无验潮水深测量中的应用[J]. 海洋测绘, 2005, 25(1):6-9

第一作者简介:李凯锋,工程师,主要从事卫星导航定位精密数据处理研究。

E-mail:kaifengli@sina.com

A Differential Estimation Technique of Troposphere Delay for Precise Positioning in Hydrographic Surveying

LI Kaifeng¹ OUYANG Yongzhong^{1,2} LU Xiuping¹ WU Taiqi¹

(1 Naval Institute of Hydrographic Surveying and Charting, 40 Youyi Road, Tianjin 300061, China)

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

Abstract: To reduce the influence of troposphere delay for precise positioning in hydrographic surveying, a novel estimation method of troposphere delay was proposed based on the differential estimation idea. Taking the value originating from a Saastamoinen model as the priori value, the amended value of the troposphere delay was calculated through precise point positioning. Taking the residual error of the zenith troposphere delay as the unknown parameter, the delay error was determined by Kalman filtering. Then, the troposphere delay of the base station and the marine rover were estimated respectively. These delay values were then entered into the differential estimation model as the initial values, and the precise position of the rover was determined. The result of boat and airplane experiments show that as compared to the conventional kinematic solution, the locational precision for boats and the airplanes is improved by the differential estimation technique of troposphere delay. Additionally, the precision in the vertical direction increased about 17.6%.

Key words: hydrographic surveying; precise point positioning; troposphere delay; parameter estimation

About the first author: LI Kaifeng, engineer. His main research focus on precise GNSS data processing.

E-mail: kaifengli@sina.com