doi:10.11887/j.cn.201705008　　http://journal.nudt.edu.cn

北斗导航系统移动基准站差分定位算法*

王一军,杨　杰,余明杨
(中南大学 信息科学与工程学院,湖南 长沙　410075)

摘　要:针对复杂测量环境无法建立固定基准站及进行精密定位的问题,提出一种基于北斗导航系统的移动基准站差分定位算法,即基准站与流动站同时运动并实现高精度差分定位的算法。基于载波相位测量值,在动态短基线条件下,对数据进行站间和星间双差处理,消除接收机钟差以及其他公共误差。对多频观测值进行线性组合,构造双差载波相位超宽巷、宽巷、中巷及窄巷观测量。对上述观测量进行窗口滑动均值滤波并采用逐级模糊度确定法固定整周模糊度,即沿着从超宽巷到窄巷的顺序依次求解整周模糊度。为验证算法有效性,设计基于北斗导航系统的轨道外部几何参数检测仪进行实验,实现毫米级静态相对定位精度和厘米级 RTK 相对定位精度。

关键词:移动基准站;双差载波相位窄巷组合;逐级模糊度确定法;线性组合
中图分类号:P228　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-2486(2017)05-045-05

Differential positioning algorithm for mobile base station based on BeiDou navigation system

WANG Yijun, *YANG Jie*, *YU Mingyang*
(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Aiming at the problem that fixed measurement environments cannot establish a fixed base station and thus cannot carry out precise positioning, a differential positioning algorithm for mobile base station based on BeiDou navigation system was proposed, which means achieving high-precise differential positioning while the base station and the rover both moving. Based on the carrier phase measurement, under the condition of dynamic short baseline, the datum were inter-station and inter-satellite double-difference processed, eliminating receiver clock error and other common errors. Based on the linear combination of multi-frequency measurement, the observation of the super-wide lane, the wide lane, the middle lane and the narrow lane was obtained, the window-moving average filter was carried out and the ambiguities were fixed by the stepwise ambiguity determination method, that is, along the order from the super-wide lane to the narrow lane to solve the ambiguity. In order to verify the effectiveness of the algorithm, a verification experiment of the external geometric parameter detector based on the BeiDou navigation system was designed to realize the static relative positioning accuracy of millimeter and the RTK relative positioning accuracy of centimeter.

Key words: mobile base station; double-difference carrier phase narrow-lane combination; step-by-step ambiguity determination method; linear combination

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite System,BDS)载波相位差分定位中基准站一般都必须固定不动。在铁路轨道外部几何参数检测系统中一般难以建立固定的基准站来满足用户需求。基于 BDS 移动基准站的差分定位算法就是在基准站和流动站同时移动的情况下实现相对定位。

目前,国内外针对动态基站差分定位技术方面的研究相对较少,研究成果也鲜有公开。1995 年,Hermann 等[1]研究的移动基站相对定位算法达到了厘米级精度,但其研究成果直接用于商业软件开发,未曾公布核心算法。日本学者 Kawano 等[2]采用基于伪距差分定位的移动基站相对定位技术辅助在轨卫星交会对接。截至目前,国内尚无该技术的相应产品。武汉大学刘立龙[3]提出一种 GPS 移动基站载波相位差分中整周模糊度快速固定的方法并实现厘米级相位定位,但是该算法初始坐标由伪距单点定位方法提供,精度不够高。喻国荣[4]在短基线条件下,根据双空间特性提出双空间模糊度快速搜索算法,通过极大地减少模糊度候选值来提高模糊度解算速度。

本文基于载波相位测量值,针对动态基准站

* 收稿日期:2017-06-03
基金项目:铁道部开发计划重点资助项目(2012G003-B)
作者简介:王一军(1963—),男,辽宁台安人,教授,博士,博士生导师,E-mail:wyj861696@sina.com

构造的短基线测量条件,对接收机采集数据进行双差处理。利用多频观测量的线性组合得到不同波长的组合观测量并对其进行窗口滑动均值滤波。采用几何无关算法对整周模糊度进行逐级固定,降低算法复杂度,提高解算效率,满足实时动态(Real Time Kinematic, RTK)定位需求。设计基于 BDS 的新型轨检仪进行验证实验,静态差分定位精度和 RTK 定位精度分别达到毫米级和厘米级,证明算法有效可行。

1 利用双差观测量构造窄巷组合

1.1 伪距观测值

伪距等于信号接收时间与信号发射时间之间的差再乘以真空中的光速,它是 BDS 接收机对卫星信号的一个最基本的距离测量值[5-7],其表达式为:

$$\rho = r + c(\delta t_u - \delta t^s) + I + T + \varepsilon_\rho \tag{1}$$

式中:ρ 为接收机到卫星以距离为单位的伪距观测量;r 为接收机到卫星的几何距离;c 为真空中的光速;δt_u 为接收机钟差;δt^s 为卫星钟差;I 为以距离为单位的电离层延迟;T 为以距离为单位的对流层延迟;ε_ρ 为以距离为单位的伪距测量噪声量。

1.2 载波相位观测量

载波相位是 BDS 接收机从卫星信号中获取的除了伪距之外的另一个基本测量值[5-7],其观测方程式为:

$$\phi = \lambda^{-1}[r + c(\delta t_u - \delta t^s) - I + T] + N + \varepsilon_\phi \tag{2}$$

式中:ϕ 为载波相位测量值;λ 为载波波长;N 为整周模糊度;ε_ϕ 为载波相位测量噪声量,包括多路径误差和接收机噪声等。

1.3 站间星间双差处理

双差测量值是指两次差分所得测量值,即站间星间各求一次差分[8-9]。首先令流动站 u 和移动基站 z 分别对卫星 i 和 j 作单差处理,在短基线条件下,两测站的对流层延迟和电离层延迟可视为相等,因此可以完全消除二者影响,得到单差载波相位测量值:

$$\phi_{uz}^{(i)} = \lambda^{-1} r_{uz}^{(i)} + f\delta t_{uz} + N_{uz}^{(i)} + \varepsilon_{\phi,uz}^{(i)} \tag{3}$$

$$\phi_{uz}^{(j)} = \lambda^{-1} r_{uz}^{(j)} + f\delta t_{uz} + N_{uz}^{(j)} + \varepsilon_{\phi,uz}^{(j)} \tag{4}$$

式中:$\phi_{uz}^{(i)}$,$\phi_{uz}^{(j)}$ 为流动站 u 和移动基站 z 分别对卫星 i 和 j 作单差处理所得到的单差载波相位测量值;$r_{uz}^{(i)} = r_u^{(i)} - r_z^{(i)}$,$r_{uz}^{(j)} = r_u^{(j)} - r_z^{(j)}$;$\delta t_{uz} = \delta t_u - \delta t_z$;$N_{uz}^{(i)} = N_u^{(i)} - N_z^{(i)}$,$N_{uz}^{(j)} = N_u^{(j)} - N_z^{(j)}$;$\varepsilon_{\phi,uz}^{(i)} = \varepsilon_{\phi,u}^{(i)} - \varepsilon_{\phi,z}^{(i)}$,$\varepsilon_{\phi,uz}^{(j)} = \varepsilon_{\phi,u}^{(j)} - \varepsilon_{\phi,z}^{(j)}$。

由单差测量值 $\phi_{uz}^{(i)}$,$\phi_{uz}^{(j)}$ 构造双差载波相位测量值,进一步消除接收机时钟误差。双差观测量表达式如下:

$$\phi_{uz}^{(ij)} = \lambda^{-1} r_{uz}^{(ij)} + N_{uz}^{(ij)} + \varepsilon_{\phi,uz}^{(ij)} \tag{5}$$

式中:$\phi_{uz}^{(ij)}$ 为双差观测量,$r_{uz}^{(ij)} = r_{uz}^{(i)} - r_{uz}^{(j)}$,$N_{uz}^{(ij)} = N_{uz}^{(i)} - N_{uz}^{(j)}$,$\varepsilon_{\phi,uz}^{(ij)} = \varepsilon_{\phi,uz}^{(i)} - \varepsilon_{\phi,uz}^{(j)}$

1.4 双差窄巷组合测量值

BDS 可在 B1,B2 和 B3 三个频率载波上同时发射信号,频率分别为 1561.098 MHz、1207.140 MHz 和 1268.520 MHz。三频双差载波相位测量值可分别表示为:

$$\phi_1 = \lambda_1^{-1} r + N_1 + \varepsilon_{\phi,1} \tag{6}$$

$$\phi_2 = \lambda_2^{-1} r + N_2 + \varepsilon_{\phi,2} \tag{7}$$

$$\phi_3 = \lambda_3^{-1} r + N_3 + \varepsilon_{\phi,3} \tag{8}$$

其线性组合为:

$$\phi_{k_1,k_2,k_3} = k_1\phi_1 + k_2\phi_2 + k_3\phi_3 \tag{9}$$

$$\phi_{k_1,k_2,k_3} = \left(\frac{k_1}{\lambda_1} + \frac{k_2}{\lambda_2} + \frac{k_3}{\lambda_3}\right) r + N_{k_1,k_2,k_3} + \varepsilon_{\phi,k_1,k_2,k_3} \tag{10}$$

式中:$N_{k_1,k_2,k_3} = k_1N_1 + k_2N_2 + k_3N_3$;$\varepsilon_{\phi,k_1,k_2,k_3} = k_1\varepsilon_{\phi,1} + k_2\varepsilon_{\phi,2} + k_3\varepsilon_{\phi,3}$。

取(1,0,1)组合,由 B1,B3 双频双差载波相位测量值 ϕ_1 和 ϕ_3 组成双差窄巷载波相位测量值 ϕ_n:

$$\phi_n = \phi_1 + \phi_3 = \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_3}\right) r + N_n + \varepsilon_{\phi,n} \tag{11}$$

双差窄巷载波相位测量值 ϕ_n 的频率 f_n 为 2829.618 MHz,相应的波长 λ_n 变短至 10.6 cm。虽然缩小的波长会加大模糊度求解难度,但是双差窄巷测量值 ϕ_n 的误差均方差 σ_{ϕ_n} 为

$$\sigma_{\phi_n} = \sqrt{2}\frac{f_1}{f_n}\sigma_{\phi_1} = 0.780\sigma_{\phi_1} \tag{12}$$

有效减小了因双差处理而放大的测量噪声,可应用于精密定位。

1.5 对组合测量值进行滑动均值滤波

得到双差窄巷组合测量值 ϕ_n 后,根据累计消噪原理对动态测试数据 ϕ_n 进行滑动均值滤波处理,以有效抑制起伏频繁的随机误差。令滑动均值滤波器窗口宽度为 H,采样间隔为 Δt,$M = H/\Delta t$,则有:

$$\bar{\phi}_n = \frac{1}{M}\sum_{m=0}^{M-1} \phi_n(t - m\Delta t) \tag{13}$$

式中:M 为采样次数;t 为当前时间。

对观测量 ϕ_n 进行窗口宽度为 H 的滑动均值滤波,其误差方差[10]为:

$$\sigma_{\phi_n}^2 = \int_0^H \left(\frac{2}{H} - 2|\tau|/H^2 \right) R(\tau) \mathrm{d}\tau \quad (14)$$

式中:τ 为时间常数;$R(\tau) = \sigma_{\phi_n}^2 \mathrm{e}^{-|\tau|/\eta}$ 为观测误差自相关函数,η 为多径误差时间常数。

M 越大,H 越大,滤波器对随机噪声的衰减越大。图 1 为观测量处理流程图。

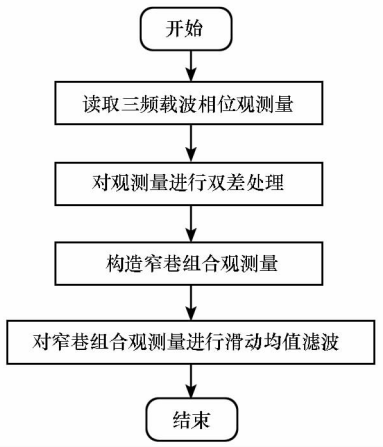


图 1　观测量处理流程图

Fig. 1　Observation processing flow chart

15 min 内的双差载波相位窄巷组合观测量经窗口滑动均值滤波后处理结果如图 2 所示(图中 Cn 为卫星编号)。滤波器窗口宽度 H = 10 min,随机噪声得到有效抑制,使得双差窄巷载波相位观测量平滑连贯,收敛性能好,有助于提高整周模糊度解算精度。

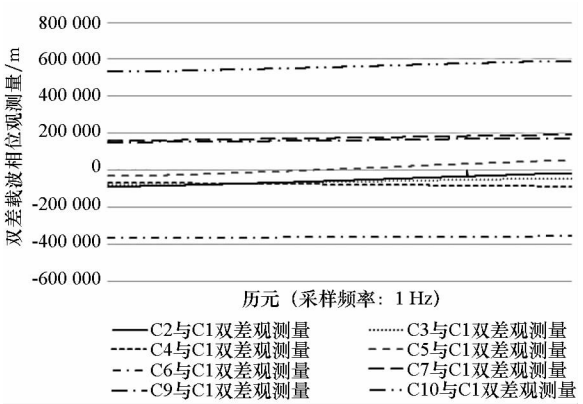


图 2　双差窄巷载波相位处理结果

Fig. 2　Results of double-difference carrier phase processing of narrow lane combination

2　基于线性组合的逐级整周模糊度固定

2.1　线性组合

BDS 载波 B1,B2,B3 的频率 f_1,f_2,f_3 三者之间可形成以下三种频率差异:

$$f_{w12} = f_1 - f_2 = 353.958 \text{ MHz} \quad (15)$$

$$f_{w13} = f_1 - f_3 = 292.578 \text{ MHz} \quad (16)$$

$$f_{w32} = f_3 - f_2 = 61.38 \text{ MHz} \quad (17)$$

相应波长 λ_{w12},λ_{w13} 和 λ_{w32} 分别为 84.756 cm,102.537 cm 和488.759 cm。将 B1 与 B2 的(1,-1,0)组合称为中巷组合,将 B1 与 B3 的(1,0,-1)组合称为宽巷组合[11],将 B2 和 B3 的(0,-1,1)组合称为超宽巷组合。

2.2　逐级模糊度确定法

逐级模糊度确定法基于宽巷测量值的整周模糊度比窄巷测量值的整周模糊度较容易求解的事实,通过对多频测量值进行线性组合进而产生一系列不同波长的组合测量值,然后从最宽巷组合到最窄巷组合依次逐级求解整周模糊度。由于逐级模糊度确定法为几何无关算法,因此非常适用于 RTK[12-14],其具体求解步骤如下。

2.2.1　利用双差伪距测量值 ρ_3 求解双差超宽巷载波相位测量值 ϕ_{w32} 的整周模糊度

由超宽巷组合(0,-1,1)可得到双差超宽巷载波相位测量值 ϕ_{w32} 的观测方程式:

$$\phi_{w32} = \lambda_{w32}^{-1} r + N_{w32} + \varepsilon_{\phi,w32} \quad (18)$$

则超宽巷载波相位测量值的整周模糊度 N_{w32} 的值为:

$$N_{w32} = \left[\phi_{w32} - \frac{\rho_3}{\lambda_{w32}} \right] \quad (19)$$

波长 λ_{w32} 为 488.759 cm,在测量值正常的情况下,式(19)所示的取整算法通常能得到整周模糊度 N_{w32} 的正确解。继而双差超宽巷载波相位测量值 ϕ_{w32} 就可视为没有模糊度的精确测量值,因此可得到高精度的双差距离测量值 $\hat{\rho}_{w32}$,即:

$$\hat{\rho}_{w32} \equiv (\phi_{w32} - N_{w32}) \lambda_{w32} = r + \varepsilon_{\phi,w32} \quad (20)$$

ϕ_{w32} 的误差均方差一般为 0.05 周(文中"周"指一个载波周期),则 $\hat{\rho}_{w32}$ 的误差均方差为 $0.05 \times \sqrt{2}$ 周,其再乘以超宽巷波长 λ_{w32},可得精度约为 34.560 cm。

2.2.2　利用 $\hat{\rho}_{w32}$ 求解双差中巷载波相位测量值 ϕ_{w12} 的整周模糊度

由中巷组合(1,-1,0)可得到双差中巷载波相位测量值 ϕ_{w12} 的观测方程式:

$$\phi_{w12} = \lambda_{w12}^{-1} r + N_{w12} + \varepsilon_{\phi,w12} \quad (21)$$

则中巷载波相位测量值的整周模糊度 N_{w12} 的值为:

$$N_{w12} = \left[\phi_{w12} - \frac{\hat{\rho}_{w32}}{\lambda_{w12}} \right] \quad (22)$$

由于波长 λ_{w12} 达 84.756 cm,而 $\hat{\rho}_{w32}$ 的误差均方差约仅为 34.560 cm,式(22)可以取得 N_{w12} 的

正确解。继而双差中巷载波相位测量值 ϕ_{w12} 就可视为没有模糊度的精确测量值,因此可得到高精度的双差距离测量值 $\hat{\rho}_{w12}$,即:

$$\hat{\rho}_{w12} \equiv (\phi_{w12} - N_{w12})\lambda_{w12} = r + \varepsilon_{\phi,w12} \quad (23)$$

$\hat{\rho}_{w12}$ 的误差均方差为 $0.05 \times \sqrt{2}$ 周,其乘以中巷波长 λ_{w12},得精度约为 5.993 cm,极大地精细了对双差几何距离 r 的测量。

2.2.3 利用 $\hat{\rho}_{w12}$ 求解双差窄巷载波相位测量值 ϕ_n 的整周模糊度

由窄巷组合(1,0,1)可得到双差窄巷载波相位测量值 ϕ_n 的观测方程式:

$$\phi_n = \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_3}\right) r + N_n + \varepsilon_{\phi,n} \quad (24)$$

则窄巷载波相位测量值的整周模糊度 N_n 的值为:

$$N_n = \left[\phi_n - \frac{\hat{\rho}_{w12}}{\lambda_n}\right] \quad (25)$$

波长 λ_n 为 10.6 cm,$\hat{\rho}_{w12}$ 的误差均方差为 5.993 cm,可利用多个时刻的 $\hat{\rho}_{w12}$ 和 ϕ_n 测量值来提高正确求解 N_n 的可靠性。继而双差窄巷载波相位测量值 ϕ_n 就可视为没有模糊度的精确测量值,$(\phi_n - N_n)\lambda_n$ 相应地成为对双差几何距离 r 的极其精确的测量值,它的误差均方差为 $0.05 \times \sqrt{2}$ 周,乘以窄巷波长 λ_n,得精度约为 0.750 cm,即达到毫米级精度。

逐级模糊度确定法固定模糊度流程如图 3 所示。

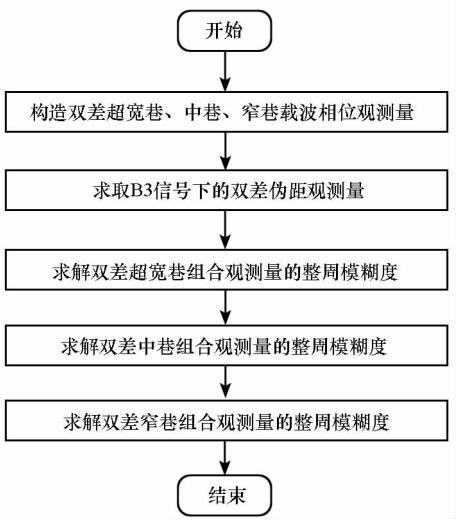


图 3 逐级模糊度确定法流程图

Fig. 3 Step-by-step ambiguity determination method flow chart

利用逐级模糊度确定法固定 15 min 内的观测数据的整周模糊度,结果如图 4 所示。该算法为几何无关算法,此类算法不易受到测量值中对流层延迟误差的影响,与用户接收机运动无关,方程解算一般自由度相对更高,无须简化解算空间并搜索求解,因此算法复杂度相较于几何相关算法大大降低且整周模糊度解算效率较几何相关算法有显著提升[15-16]。

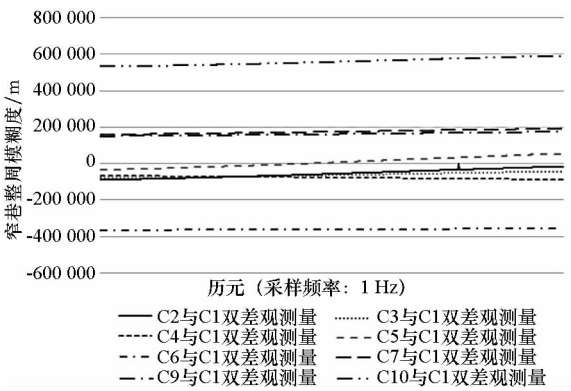


图 4 窄巷组合整周模糊度

Fig. 4 Ambiguity of narrow lane combination

3 算例分析

3.1 静态实验

静态实验中使基准站和流动站分别固定于轨检仪单轮梁两端,并保持静止状态。所用数据于 2017 年 5 月 17 日上午 9 时至 12 时在中南大学铁道学院铁信研究所轨道实验室采集所得,采用两个司南导航四系统十一频接收机,型号均为 M300NETGNSS(K708)。两个型号为 HX-CS7603A 三系统七频天线(AT330)固定在长度为 1.435 m 的单轮梁两端。以事先标定得到的基线长度 1.435 m、基线俯仰角 0°为基准,采样频率为 1 Hz,采样时长为 2 h 45 min,卫星截止高度角为 10°,共有 9270 个历元可用。采集过程流动站和基准站共视卫星为 C1、C2、C3、C4、C5、C6、C7、C9、C10,选取 C1 为基准卫星,按上文提出的算法对实测数据进行处理,令滤波器窗口宽度 H = 30 min,对双差观测量进行平滑滤波,并逐级固定模糊度,然后反代求解基线向量。基线处理结果如图 5 所示。在静态基线条件下,该算法求解的基线长度误差基本小于 8 mm,达到精度要求,证明了该算法在静态基线条件下的有效性。

3.2 动态实验

为进一步验证移动基准站差分定位算法在短基线动态情况下的适用性,2017 年 5 月 19 日上午 9 时至 2017 年 5 月 21 日下午 5 时于中南大学铁道学院铁信研究所轨道实验室进行了动态实验,采样频率设为 1 Hz,采样时间共计 3 h,共获得10 500 个可用历元。

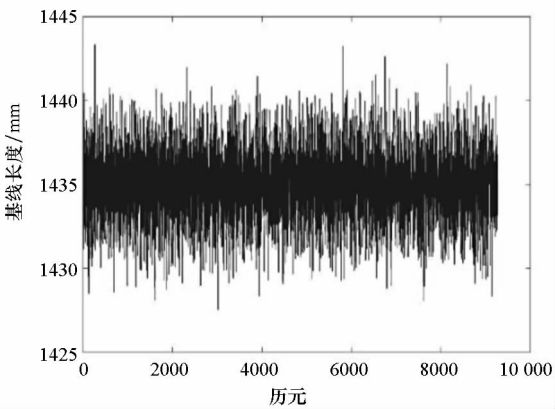


图 5　静态基线处理结果

Fig. 5　Static baseline processing results

3.2.1　验证方案

按静态实验的方式安装好接收机和天线,启动接收机后静态观测 30 min,随后按常规检测速度约 1.5 m/s 沿轨道步行向前推进。实验室轨道长 25 m,在轨道上双向往返测量,对基准站和流动站的原始观测数据和星历数据进行采集。利用上文提出的差分定位算法对实测数据进行实时处理,采集过程两测站共视卫星为 C1、C2、C3、C5、C6、C7、C8、C9、C10,选取 C1 为基准卫星,双差观测量滤波窗口宽度 $H = 30$ min,对双差观测量进行平滑滤波,利用逐级模糊度固定法逐级固定模糊度并实时反代求解基线向量。

3.2.2　实验结果分析

利用上述算法,RTK 短基线条件下处理结果如图 6 所示。在动态短基线条件下,该算法求解的基线长度误差小于 40 mm,证明该算法在动态短基线条件下有效。

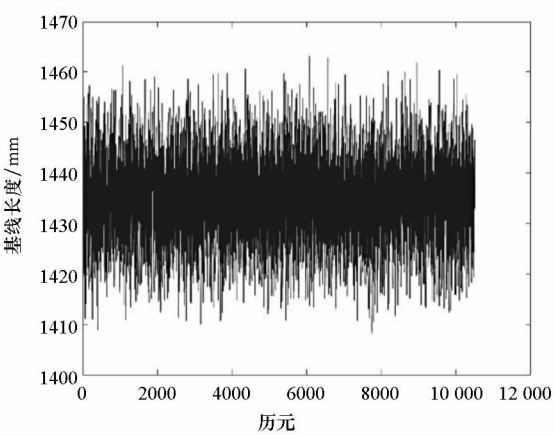


图 6　动态基线处理结果

Fig. 6　Dynamic baseline processing results

4　结论

1)算法基于双差窄巷载波相位观测量,极大地消除了各种公共误差。利用滑动均值滤波平滑观测结果,进一步降低测量值随机噪声,算法准确性和鲁棒性得到较大提高。

2)依据载波波长与整周模糊度求解难度成反比这一客观事实,沿超宽巷到窄巷这一次序逐级求解整周模糊度,模糊度固定效率有较大改善,利于 RTK 定位。

3)算法假设站间差分处理可完全消除对流层及电离层延迟,因此只能应用于短基线情况下。利用几何无关算法固定整周模糊度,方程式自由度高,涉及卫星少,无须搜索解算空间,算法复杂度大大降低。

4)静态实验和动态实验结果表明提出的 BDS 移动基准站差分定位算法可行,静态基线误差达到毫米级,动态基线误差小于 4 cm,算法有效可行。

该算法可以实现观测量的精度优化和整周模糊度的高效固定,有助于 BDS 在轨道检测等难以建立静态基站的精密测绘领域的应用开发。但在具体工程实现上,有待进一步提高算法精度。

参考文献(References)

[1] Hermann B R, Evans A G, Law C S, et al. Kinematic on-the-fly GPS positioning relative to a moving reference [J]. Journal of the Institute of Navigation, 1995, 42(3): 487 – 501.

[2] Kawano I, Mokuno M, Kasai T, et al. First autonomous rendezvous using relative GPS navigation by ETS-VII [J]. Journal of the Institute of Navigation, 2001, 48(1): 49 – 56.

[3] 刘立龙. 动态对动态 GPS 高精度定位理论及其应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
LIU Lilong. The research on the precise KINRTK theory and its applications[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese)

[4] 喻国荣. 基于移动参考站的 GPS 动态相对定位算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2003.
YU Guorong. Research on kinematic GPS positioning relative to a moving reference [D]. Wuhan: Wuhan University, 2003. (in Chinese)

[5] He L N, Ge M R, Wang J X, et al. Experimental study on the precise orbit determination of the BeiDou navigation satellite system[J]. Sensors, 2013, 13(3): 2911 – 2928.

[6] Li M, Qu L Z, Zhao Q L, et al. Precise point with the BeiDou navigation satellite system [J]. Sensors, 2014, 14(1): 927 – 943.

[7] Yang Y X, Li J L, Wang A B, et al. Preliminary assessment of the navigation and positioning performance of BeiDou regional navigation satellite system [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(1): 144 – 152.

[8] Tang W M, Deng C L, Shi C, et al. Triple-frequency carrier ambiguity resolution for BeiDou navigation satellite system[J]. GPS Solution, 2014, 18(3): 335 – 344.

(下转第 138 页)

distributed alarm correlation in computer networks [C]// Proceedings of International Conference on Communication Software and Networks, 2010: 318 – 324.

[48] Khatoun R, Doyen G, Gaïti D, et al. Decentralized alerts correlation approach for DDoS intrusion detection [C]// Proceedings of New Technologies, Mobility and Security, 2008: 1 – 5.

[49] Li Z C, Chen Y, Beach A. Towards scalable and robust distributed intrusion alert fusion with good load balancing[C]// Proceedings of SIGCOMM Workshop on Large-scale Attack Defense, 2006: 115 – 122.

[50] Rees J. Distributed multistage alert correlation architecture based on Hadoop[C]//Proceedings of International Carnahan Conference on Security Technology, 2015: 147 – 152.

[51] da Silva Thiago V, Rego P A L, de Souza J N. Multi-agents architecture for distributed intrusion detection [C]// Proceedings of the Ninth Advanced International Conference on Telecommunications, 2015: 50 – 55.

[52] Bartos K, Rehak M, Svoboda M. Self-organized collaboration of distributed IDS sensors [M]//Flegel U, Markatos E, Robertson W. Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 214 – 231.

[53] Bartos K, Rehak M. Distributed self-organized collaboration of autonomous IDS sensors[C]//Proceedings of the 6th IFIP WG 6.6 International Autonomous Infrastructure, Management, and Security Conference on Dependable Networks and Services, 2012: 113 – 117.

(上接第49页)

[9] 施闯, 赵齐乐, 李敏, 等. 北斗卫星导航系统的精密定轨与定位研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(6): 854 – 861.
SHI Chuang, ZHAO Qile, LI Min, et al. Precise orbit determination of BeiDou satellites with precise positioning[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2012, 42(6): 854 – 861. (in Chinese)

[10] 刘福声, 罗鹏飞. 统计信号处理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999: 194 – 195.
LIU Fusheng, LUO Pengfei. Statistical signal processing[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1999: 194 – 195. (in Chinese)

[11] 阳仁贵, 袁运斌, 欧吉坤. 相对实时查分技术应用于飞行器交会对接研究[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2010, 40(5): 651 – 657.
YANG Rengui, YUAN Yunbin, OU Jikun. Real-time GNSS carrier phase differential technique for spacecraft rendezvous and docking [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2010, 40(5): 651 – 657. (in Chinese)

[12] 李金龙. 北斗/GPS 多频实时精密定位理论与算法[J]. 测绘学报, 2015, 44(11): 1297.
LI Jinlong. BDS/GPS multi-frequency real-time kinematic positioning theory and algorithms [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(11): 1297. (in Chinese)

[13] Ye S R, Chen D Z, Liu Y Y, et al. Carrier phase multipath mitigation for BeiDou navigation satellite system [J]. GPS Solution, 2015, 19(4): 545 – 557.

[14] Zhao C Y, Zhang M J, Wang H B, et al. Analysis on the long-term dynamical evolution of the inclined geosynchronous orbits in the Chinese BeiDou navigation system[J]. Advances in Space Research, 2015, 56(3): 377 – 387.

[15] Li J L, Yang Y X, Xu J Y, et al. GNSS multi-carrier fast partial ambiguity resolution strategy tested with real BDS/GPS dual-and triple-frequency observations [J]. GPS Solution, 2015, 19(1): 5 – 13.

[16] Han C H, Yang Y X, Cai Z W, et al. BeiDou navigation satellite system and its time scales [J]. Metrologia, 2011, 48(4): S213 – S218.