

一种基于多频模糊度快速解算方法的 BDS/GPS 中长基线 RTK 定位模型

谢建涛¹ 郝金明¹ 刘伟平¹ 于合理¹ 田英国¹

1 信息工程大学导航与空天目标工程学院,河南 郑州,450050

摘 要:随着全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)进入多系统时代,空中导航卫星的可见卫星数不断增加,中国北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)已开始面向用户提供三频导航信号,这都有利于改善单历元实时动态定位(real-time kinematic, RTK)的精度和可靠性。中长基线单历元 RTK 通常采用电离层无关组合算法,但是该方法将观测噪声进行了放大,模糊度固定成功率随着基线长度的增加而明显降低。提出一种 BDS/GPS(global positioning system)中长基线单历元多频 RTK 定位算法,先以较高成功率快速固定 BDS 的两个超宽巷模糊度,继而通过简单变换得到 BDS 宽巷模糊度,然后将其辅助提高 GPS 宽巷模糊度固定成功率,最后采用将电离层延迟误差参数化的策略以提高 BDS/GPS 窄巷模糊度固定成功率。结合实测数据进行验证分析,结果表明本文算法是可行的。

关键词:BDS/GPS;三频模糊度算法;多频 RTK;模糊度解算
中图法分类号:P228 **文献标志码:**A

全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)应用于城市高楼密集区和深山峡谷等环境下采用单卫星系统进行定位时,用户接收机可见的卫星数目少且分布不佳,无法满足定位的最低要求。多系统条件下,可见卫星增加,可显著增强实时动态定位(real-time kinematic, RTK)定位模型的几何强度,进而可缩减 RTK 定位的初始化时间并提高其可靠性^[1],从而为解决上述问题提供了可能。

文献[2]和[3]对短基线北斗卫星导航系统/全球定位系统(BeiDou navigation satellite system/global positioning system, BDS/GPS)组合单历元 RTK 定位进行了研究。文献[4]研究表明,若直接固定窄巷模糊度,BDS 三频数据相较于双频数据并无明显优势,且模糊度参数的增加也会造成很大的计算压力。

文献[5]给定不同长度基线对应的电离层延迟、对流层延迟、轨道误差、多路径和观测噪声的量级,通过综合分析这些误差的影响,得出了不同多频 GNSS 系统的最优组合并推荐了一种三频模糊度算法(three carrier ambiguity resolution,

TCAR)。文献[7]分析得出单历元短基线三频模糊度解算成功率低的主要原因是 TCAR 算法中宽巷模糊度不易确定,采用不同频率模糊度之间的约束条件改进了 TCAR 方法;基于半仿真 GPS 数据,对中长基线 TCAR 算法进行了优化。基于 BDS 实测数据,文献[8]对单历元 TCAR 算法进行了研究,结果表明即使 43 km 基线,模糊度解算的成功率依然能够达到 94%。

鉴于 TCAR 算法的优越性以及多系统组合定位的优势,本文基于 TCAR 算法,对中长基线 BDS/GPS 单历元多频 RTK 定位进行研究,提出一种多频模糊度解算(multiple carrier ambiguity resolution,MCAR)方法,该算法将电离层延迟残差通过参数化进行了有效的分离,克服了窄巷模糊度固定成功率随基线长度增加而明显降低的缺点,其主要思想是先以较高成功率快速固定 BDS 的两个超宽巷模糊度,然后通过简单的变换得到 BDS 宽巷模糊度,继而固定 GPS 宽巷模糊度,最后鉴于中长基线电离层延迟对窄巷模糊度固定的影响,采用将电离层延迟参数化的策略以提高 BDS /GPS 组合窄巷模糊度固定成功率。

1 TCAR 观测测量

1.1 观测测量线性组合

基于三频数据的双差组合观测测量可描述为^[5]:

$$\Delta P_{(i,j,k)} = \frac{i \cdot f_1 \cdot \Delta P_1 + j \cdot f_2 \cdot \Delta P_2 + k \cdot f_3 \cdot \Delta P_3}{i \cdot f_1 + j \cdot f_2 + k \cdot f_3} \tag{1}$$

$$\Delta \varphi_{(i,j,k)} = \frac{i \cdot f_1 \cdot \Delta \varphi_1 + j \cdot f_2 \cdot \Delta \varphi_2 + k \cdot f_3 \cdot \Delta \varphi_3}{i \cdot f_1 + j \cdot f_2 + k \cdot f_3} \tag{2}$$

式中,“Δ”为双差运算,这里采用的双差观测测量都是基于系统内部;组合系数*i*、*j*、*k*为整数,Δ*P*、Δ*φ*表示以“*m*”为单位的双差伪距和载波相位观测测量。

表 1 不同载波线性组合观测测量的特性及总噪声水平(σ_{Δ*p*} = 1 cm)

Tab. 1 Characteristics of Different Combinations and Total Noise Level Under Two Different Error Budgets(σ_{Δ*p*} = 1 cm)

<i>(i, j, k)</i>	<i>λ/m</i>	<i>β_(i,j,k)</i>	<i>μ_(i,j,k)</i>	Δ <i>δI</i> ₁ = 10 cm	Δ <i>δI</i> ₁ = 100 cm
				Δ <i>δ_{trop}</i> = 5 cm	Δ <i>δ_{trop}</i> = 15 cm
				Δ <i>δ_{orb}</i> = 1 cm	Δ <i>δ_{orb}</i> = 8 cm
(0, −1, 1)	4. 884 2	−1. 591 5	28. 528 7	0. 067 7	0. 332 9
(1, 4, −5)	6. 370 7	0. 652 1	172. 623 5	0. 271 3	0. 290 9
(1, −1, 0)	0. 847 0	−1. 293 2	5. 575 2	0. 176 8	1. 540 4
(1, 0, −1)	1. 024 7	−1. 230 6	6. 875 1	0. 146 3	1. 214 3

表 1 中,假定双差原始载波观测噪声为 1 cm,针对双差电离层延迟 Δ*δI*₁、双差对流层延迟 Δ*δ_{trop}*,以及双差轨道误差 Δ*δ_{orb}*的两组不同误差水平,给出不同载波线性组合观测测量的总噪声水平。

2 多频模糊度解算

无几何条件下观测噪声和电离延迟误差对窄巷模糊度解算造成的影响非常敏感,制约着模糊度解算的收敛速度和可靠性。因此,对于多系统多频情形,鉴于整数最小二乘估计的几何模糊度解算方法可以将模糊度固定成功率最大化,其仍然是模糊度解算的第一选择^[4]。

文献[8]研究表明,对于 40 km~50 km 以内的中距离基线,双差电离层延迟残差是主要误差,通常小于 0. 4 m,而双差对流层延迟残差小于 0. 025 m,远小于前者,因此,在本文采用的中距离基线中,可忽略双差对流层残差的影响。

本文提出中长基线条件下基于 GPS 双频数据和 BDS 三频数据的 MCAR 算法。

组合之后的虚拟载波频率定义为:

$$f_{(i,j,k)} = i \cdot f_1 + j \cdot f_2 + k \cdot f_3 \tag{3}$$

组合观测测量的一阶电离层延迟尺度因子 β_(*i,j,k*) 和载波噪声因子 μ_(*i,j,k*) 分别表示为式(4)和式(5):

$$\beta_{(i,j,k)} = \frac{f_1^2(i/f_1 + j/f_2 + k/f_3)}{i \cdot f_1 + j \cdot f_2 + k \cdot f_3} \tag{4}$$

$$\mu_{(i,j,k)}^2 = \frac{(i \cdot f_1)^2 + (j \cdot f_2)^2 + (k \cdot f_3)^2}{(i \cdot f_1 + j \cdot f_2 + k \cdot f_3)^2} \tag{5}$$

1.2 最优超宽巷、宽巷和窄巷组合观测测量

近年来,国内外的许多学者都对适用于模糊度解算的三频载波观测最优线性组合进行了研究^[2-7],得出许多具有长波长、弱电离层延迟、低噪声的最优虚拟观测测量。对于 BDS 系统,三频最优组合观测值的相关特性以及对于不同的误差水平,相应的总噪声(单位:周)如表 1 所示。

2.1 超宽巷模糊度解算

由于中长基线条件下双差电离层延迟残差增大,宽巷模糊度固定变得困难,而组合系数为零的所有超宽巷(extra wide-lane, EWL)和宽巷(wide-lane, WL)组合观测值中,只有两个是独立的,一旦固定两个组合模糊度,其余组合模糊度都可简单变换得到,例如,Δ*N*_(1,−1,0) = 5 · Δ*N*_(0,−1,1) − Δ*N*_(1,4,−5),因此,没有必要直接求解 WL 巷模糊度,而是先固定两个 EWL 模糊度,然后通过简单变换得到宽巷模糊度。

BDS 三频条件下,对载波观测测量进行组合可得到 EWL(*λ* ≥ 2. 76 m)载波观测测量,综合考虑组合观测测量的各项优良特性,本文采用(0, −1, 1)组合和(1, 4, −5)组合,其对应的双差组合观测测量可表示为 EWL1 和 EWL2。组合波长 λ_(0,−1,1) = 4. 884 m, λ_(1,4,−5) = 6. 371 m。相较于 EWL2, EWL1 模糊度极易进行固定,先固定 EWL1 模糊度参数,然后固定 EWL2 模糊度参数,以提高 EWL2 模糊度参数固定成功率。EWL1 载波观测测量与三个伪距观测测量 *P*₁、*P*₂、*P*₃ 组成的基于几何模型的双差观测方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{\text{EWL1}}^{\text{B}} \\ \mathbf{v}_{P_1}^{\text{B}} \\ \mathbf{v}_{P_2}^{\text{B}} \\ \mathbf{v}_{P_3}^{\text{B}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^{\text{B}} & \mathbf{I} \cdot \lambda_{\text{EWL1}}^{\text{B}} \\ \mathbf{B}^{\text{B}} & 0 \\ \mathbf{B}^{\text{B}} & 0 \\ \mathbf{B}^{\text{B}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b}_{\text{EWL1}}^{\text{B}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{\text{EWL1}}^{\text{B}} \\ \mathbf{l}_{P_1}^{\text{B}} \\ \mathbf{l}_{P_2}^{\text{B}} \\ \mathbf{l}_{P_3}^{\text{B}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, \mathbf{v} 表示观测量减掉计算量 (observed minus computed, OMC) 后的残余向量; \mathbf{B}^{B} 为基线位置向量 \mathbf{a} 的设计矩阵, 其右上标还表示 BDS 系统, \mathbf{a} 为位置参数 (x, y, z) 。 $\mathbf{b}_{\text{EWL1}}^{\text{B}}$ 为双差 EWL1 模糊度参数, \mathbf{I} , $\lambda_{\text{EWL1}}^{\text{B}}$, \mathbf{l} 分别代表单位矩阵、EWL1 波长以及 EWL1 和伪距观测量。这里采用经典最小二乘估计得到 $\mathbf{b}_{\text{EWL1}}^{\text{B}}$ 参数的浮点解, 然后采用 LAMBDA 算法对浮点解进行固定。当 $\mathbf{b}_{\text{EWL1}}^{\text{B}}$ 参数得到固定时, 将 EWL1 看作高精度的伪距观测量用于 EWL2 模糊度解算, 以提高中长基线条件 EWL2 模糊度参数固定成功率, 解算模型为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{\text{EWL2}}^{\text{B}} \\ \mathbf{v}_{\text{EWL1}}^{\text{B}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^{\text{B}} & \mathbf{I} \cdot \lambda_{\text{EWL2}}^{\text{B}} \\ \mathbf{B}^{\text{B}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b}_{\text{EWL2}}^{\text{B}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{\text{EWL2}}^{\text{B}} \\ \mathbf{l}_{\text{EWL1}}^{\text{B}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 宽巷模糊度解算

对于 WL 载波组合, BDS 系统采用 $(1, -1, 0)$ 和 $(1, 0, -1)$, GPS 系统采用 $(1, -1, 0)$ 。 $(1, -1, 0)$ 和 $(1, 0, -1)$ 组合各记为 WL12 和 WL13。当 $\mathbf{b}_{\text{EWL}}^{\text{B}}$ 参数得到固定时, 可由式(8)直接解算得到 BDS 的两个 WL 模糊度参数:

$$\begin{aligned} \Delta N_{(1,-1,0)} &= 5 \cdot \Delta N_{(0,-1,1)} - \Delta N_{(1,4,-5)} \\ \Delta N_{(1,0,-1)} &= 4 \cdot \Delta N_{(0,-1,1)} - \Delta N_{(1,4,-5)} \end{aligned} \quad (8)$$

对于 GPS 单系统, 中长基线条件下直接固定

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^{\text{G}} \\ \mathbf{v}_{\text{WL12}}^{\text{G}} \\ \mathbf{v}_1^{\text{B}} \\ \mathbf{v}_{\text{WL12}}^{\text{B}} \\ \mathbf{v}_{\text{WL13}}^{\text{B}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^{\text{G}} & -\mathbf{I} & 0 \\ \mathbf{B}^{\text{G}} & \mathbf{I} \cdot \frac{f_1^{\text{G}}}{f_2^{\text{G}}} & 0 \\ \mathbf{B}^{\text{B}} & 0 & -\mathbf{I} \\ \mathbf{B}^{\text{B}} & 0 & \mathbf{I} \cdot \frac{f_1^{\text{B}}}{f_2^{\text{B}}} \\ \mathbf{B}^{\text{B}} & 0 & \mathbf{I} \cdot \frac{f_1^{\text{B}}}{f_3^{\text{B}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{a}_{\text{ion}}^{\text{G}} \\ \mathbf{a}_{\text{ion}}^{\text{B}} \\ \mathbf{b}_1^{\text{G}} \\ \mathbf{b}_1^{\text{B}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{l}_1^{\text{G}} \\ \mathbf{l}_{\text{WL12}}^{\text{G}} \\ \mathbf{l}_1^{\text{B}} \\ \mathbf{l}_{\text{WL12}}^{\text{B}} \\ \mathbf{l}_{\text{WL13}}^{\text{B}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $\mathbf{a}_{\text{ion}}^{\text{G}}$ 、 $\mathbf{a}_{\text{ion}}^{\text{B}}$ 分别表示 GPS 系统 L1 和 BDS 系统 B1 频点上的电离层延迟误差参数向量, 式(10)可简化为:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (11)$$

由于对电离层延迟参数进行了先验约束(对一阶项进行了参数化), 在参数化过程中, 先验电离层修正模型仅针对电离层延迟一阶项, 对于高阶项残差的影响仍无法消除, 其影响约为 0.1%, 因此, 所采用的先验模型存在模型误差。这里需

WL 模糊度参数成功率不高, 这里采用 BDS 模糊度得到固定的 WL 观测量辅助解算 GPS 的 WL 模糊度参数, 以增强解算模型的强度, 提高模糊度解算成功率, 观测方程如式(9):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{\text{WL12}}^{\text{G}} \\ \mathbf{v}_{P_1}^{\text{G}} \\ \mathbf{v}_{P_2}^{\text{G}} \\ \mathbf{v}_{\text{WL12}}^{\text{B}} \\ \mathbf{v}_{\text{WL13}}^{\text{B}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^{\text{G}} & \mathbf{I} \cdot \lambda_{\text{WL12}}^{\text{G}} \\ \mathbf{B}^{\text{G}} & 0 \\ \mathbf{B}^{\text{G}} & 0 \\ \mathbf{B}^{\text{B}} & 0 \\ \mathbf{B}^{\text{B}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b}_{\text{WL12}}^{\text{G}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{\text{WL12}}^{\text{G}} \\ \mathbf{l}_{P_1}^{\text{G}} \\ \mathbf{l}_{P_2}^{\text{G}} \\ \mathbf{l}_{\text{WL12}}^{\text{B}} \\ \mathbf{l}_{\text{WL13}}^{\text{B}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\mathbf{v}_{\text{WL12}}^{\text{G}}$ 、 $\mathbf{v}_{P_1}^{\text{G}}$ 和 $\mathbf{v}_{P_2}^{\text{G}}$ 分别表示 GPS 的 WL12 载波和两个伪距观测量的 OMC 残余向量。 \mathbf{B}^{G} 和 $\lambda_{\text{WL12}}^{\text{G}}$ 分别表示 GPS 位置向量的设计矩阵以及 WL 波长。 $\mathbf{l}_{\text{WL12}}^{\text{G}}$ 、 $\mathbf{l}_{P_1}^{\text{G}}$ 、 $\mathbf{l}_{P_2}^{\text{G}}$ 表示 WL12 载波和两个伪距观测量, $\mathbf{l}_{\text{WL12}}^{\text{B}}$ 表示 WL 伪距观测量。这里仍采用经典最小二乘估计计算 $\mathbf{b}_{\text{WL12}}^{\text{G}}$ 的浮点解, 采用 LAMBDA 算法得到固定解。

2.3 模糊度解算

将模糊度得到固定的 WL 看作是精度比 EWL 更高的伪距观测量, 用于窄巷 (narrow-lane, NL) 模糊度解算, 这里 NL 采用 B1 和 L1 频点上的载波信号。对于中长基线, 双差电离层延迟残差严重影响 NL 模糊度固定成功率, 若采用消电离层组合会大幅增大组合观测量的观测噪声, 模糊度固定成功率亦有限。这里通过参数化的策略将电离层延迟残差进行有效分离, 精化误差模型, 优化解算方法, NL 载波的双差观测方程为:

对电离层延迟参数加权, 以避免观测方程的线性化^[9]。其最小二乘解算结果如下:

$$d\mathbf{x} = (\mathbf{A}^{\text{T}} \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{P}_{a_{\text{ion}}})^{-1} \mathbf{A}^{\text{T}} \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (12)$$

式中, $\mathbf{P}_{a_{\text{ion}}} = (\Sigma_{a_{\text{ion}}})^{-1}$; $\Sigma_{a_{\text{ion}}}$ 为电离层延迟参数的协方差阵; $\mathbf{P}_{a_{\text{ion}}}$ 为对称阵; 主对角线上的元素等于 $1/\sigma_{a_{\text{ion}}}^2$; $\sigma_{a_{\text{ion}}}^2$ 为电离层延迟约束模型的先验误差, 该误差的取值源于经验值, 其大小与基线长度有关, 与高度角无关, 因此可通过顾及基线长度给出 $\sigma_{a_{\text{ion}}}^2$ 的经验值作为先验约束。

3 实验与分析

为验证 MCAR 模型的有效性和可行性,本文采用了 6 组静态基线数据进行实验。卫星高度截止角设为 15°,采样间隔均为 1 s,数据集如表 2。

表 2 采用的数据集

Tab. 2 General Situation of Data Set

数据集	基线	观测	GPS 平均	BDS 平均
	长度	时长/s	可见卫星数	可见卫星数
A	8 m	9 644	8	9
B	8 km	7 200	6	8
C	17 km	9 726	8	10
D	37 km	7 200	8	10
E	44 km	7 200	8	9
F	50 km	7 200	7	9

实验分别就 MCAR 模型模糊度解算和定位精度两个指标进行验证分析。解算过程均采用单历元模糊度固定模式。采用后处理精密相对定位得到的固定解作为比对标准,将每个历元解算得到的模糊度固定解与“真值”比较,以判断模糊度参数是否固定正确。这里采用模糊度解算成功率来评价和比较模型的有效性和可靠性。模糊度解

算成功率定义为得到正确固定解的历元数与总历元数的百分比。

EWL、WL 模糊度和 ratio 阈值分别设为 2、3 和 5,以分析 MCAR 模式下 BDS 的 EWL、GPS 的 WL 以及单 GPS 模式下 WL 模糊度解算(ambiguity resolution,AR)效果。对数据集解算结果进行统计,结果如表 3 所示。

(1)EWL 模糊度,对于数据集 A、B、C,针对不同的阈值水平,固定成功率都能达到 100%,对于数据集 F,50 km 长基线固定成功率依然优于 99%,因此,对于中长基线,MCAR 算法中 EWL1 和 EWL2 模糊度能可靠得到固定。

(2)WL 模糊度固定成功率,对于数据集 A 和 B 代表的短基线条件,MCAR 算法和 GPS 单系统条件效果相近,都能保持较高的水平,但是随着基线长度的不断增加,由数据集 C、D、E 和 F 可以看出,MCAR 算法要明显优于 GPS 单系统条件,即使对于 50 km 长基线,当 ratio 阈值为 3.0 时,MCAR 算法 WL 模糊度固定成功率依然优于 90%,这主要得益于利用 BDS 系统模糊度已固定的 WL 观测量,极大地增加了模型的约束强度,有利于提高 GPS 系统 WL 模糊度固定成功率。

表 3 超宽巷/宽巷模糊度解算效果

Tab. 3 AR Performance of EWL and WL

数据集	模糊度固定成功率/%								
	ratio≥2.0			ratio≥3.0			ratio≥5.0		
	EWL	WL	WL	EWL	WL	WL	EWL	WL	WL
	(MCAR)	(MCAR)	(GPS)	(MCAR)	(MCAR)	(GPS)	(MCAR)	(MCAR)	(GPS)
A	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
B	100.0	100.0	98.0	100.0	100.0	92.1	100.0	100.0	65.3
C	100.0	99.9	91.2	100.0	94.2	78.6	100.0	69.1	54.5
D	100.0	99.8	73.1	99.9	94.0	61.6	99.5	68.8	37.1
E	99.9	99.6	65.3	99.6	93.7	55.3	99.3	68.6	32.8
F	99.7	99.5	59.9	99.5	93.3	42.2	99.2	68.2	24.9

表 4 窄巷模糊度解算效果

Tab. 4 AR Performance of NL

数据集	模糊度固定成功率/%					
	ratio≥2.0		ratio≥3.0		ratio≥5.0	
	消电离层模型	MCAR	消电离层模型	MCAR	消电离层模型	MCAR
A	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
B	100.0	100.0	100.0	100.0	96.6	94.9
C	99.7	99.9	90.7	91.6	40.0	47.0
D	48.2	96.2	16.3	88.4	0.0	38.7
E	35.7	94.5	11.3	82.6	0.0	34.4
F	30.9	93.4	8.7	78.2	0.0	29.5

对于 NL 模糊度,采用消电离层组合模型和将电离层延迟残差参数化两种不同的策略以比较分析不同长度基线条件下电离层延迟残差对 NL 模糊度解算造成的影响,对四组数据集的解算结

果进行分析统计,结果如表 4 所示。

(1)短基线条件下,对于数据集 A、B,即使 ratio 阈值为 5.0,两种算法 NL 模糊度固定成功率依然优于 90%;对于数据集 C,采用消电离层

模型, ratio 阈值为 2.0 和 3.0 时, NL 模糊度优于 90%。

(2) 对于数据集 *F*, 当基线长度增大到 50 km, 采用消电离层模型, ratio 阈值为 2.0 时, NL 模糊度固定成功率仅为 30.9%, 无法保证单历元 RTK 定位的可靠性, 这是因为在将组合观测噪声放大之后, 随着基线变长, 电离层延迟高阶项以及对流层延迟残差的作用增大, 与噪声叠加到一起后被模糊度浮点解吸收, 使得模糊度固定变得十分困难。采用将电离层延迟残差参数化的策略, 对电离层延迟残差进行参数化, 进一步精化了误差模型, MCAR 算法 NL 模糊度固定成功率优于 90%, 能够有效保证 RTK 定位的可靠性。

采用文献[2]中的模糊度解算结果评价方法, 分析 MCAR 算法模糊度固定效果。ratio 阈值为 2 时, 对未得到 NL 固定解的历元, 当其浮点解与参考位置在东向和北向上的偏差小于 0.1 m, 在天顶向的偏差小于 0.2 m 时, 认为其模糊度固定解被错误的拒绝而未被采纳^[2]。对 6 组数据集进行统计得到表 5。

表 5 ratio 阈值为 2 时模糊度解算效果						
Tab. 5 AR Performance with Threshold is 2						
数据集	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
固定成功率/%	100	100	99.9	96.2	94.5	93.4
未固定但解算正确历元	0	0	10	64	96	135
错误拒绝率/%	0	0	0.01	0.89	1.33	1.87

由表 5 看出, 由于采用 BDS/GPS 双系统组合定位以及对双差电离层延迟残差进行了有效的分离, MCAR 算法 NL 模糊度固定错误拒绝率很低, 即使对于 17 km 的的基线, 数据集 *C* 中 NL 模糊度固定错误拒绝率仅为 0.01%。随着基线长度增加到 50 km, 双差电离层延迟残差增大, 对 NL 模糊度固定影响增大, 错误拒绝率随之变大, 但也仅为 1.87%。ratio 阈值为 2 时, 针对所有得到固定解的历元, 将解算得到的位置参数与参考位置作差, 得到东(E)、北(N)、天(U)三个方向上的定位误差, 如图 1 所示。

对不同方向上的定位偏差进行数理统计, 得到表 6。由表 6 可以看出, 随着基线长度不断增大, E、N、U 三个方向的定位误差不断增大, 其中 U 向上最大。对于 50 km 长基线, 数据集 *F* 在 E、N 向上的均方根优于 1 cm, U 向上均方根优于 2 cm。双差电离层延迟残差是影响中长基线 NL 模糊度解算的最主要因素, 因此将其参数化是非常必要的, 而双系统条件下的 3 个模糊度得到固

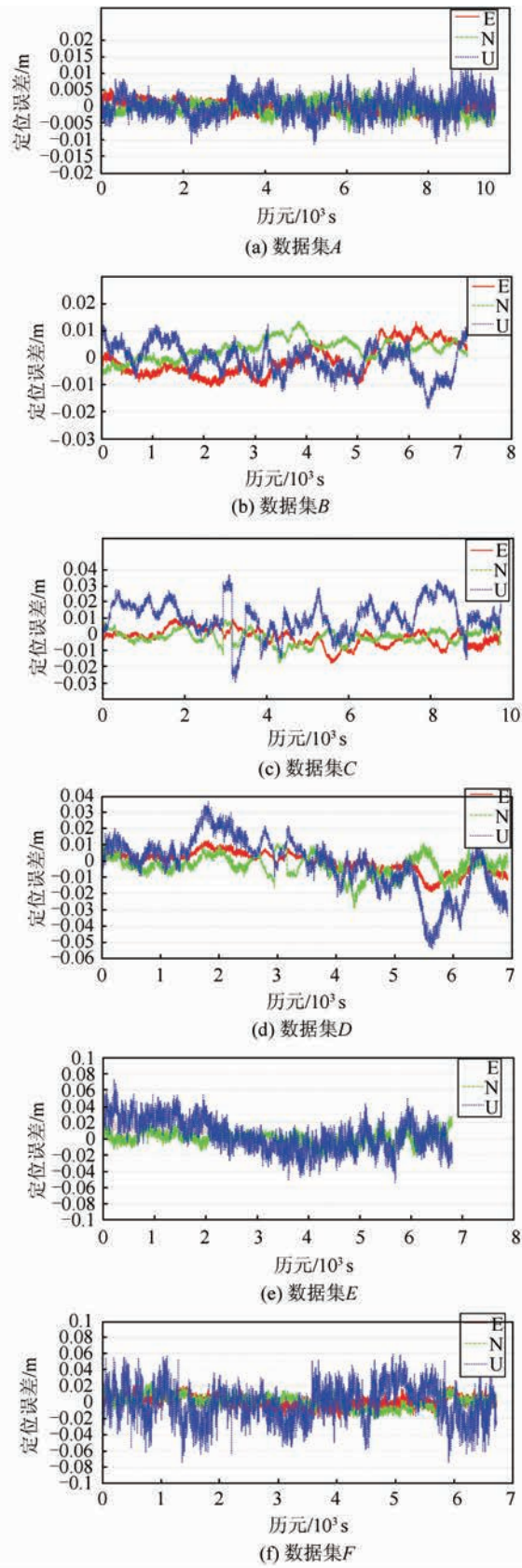


图 1 定位误差时间序列图
Fig. 1 Time Sequence Diagram of Positioning Error

定的 WL 组合作为高精度的“伪距观测量”, 可有效保证 NL 模糊度解算过程中将电离层延迟残差参数化时的模型强度, 进而有利于 NL 模糊度的

固定。因此,总的来看,就模糊度解算效果和定位精度而言,MCAR 算法是可行的。

表 6 定位精度统计结果(均方根)/cm
Tab. 6 Statistical Results of RTK Positioning
Error(RMS)/cm

数据集	E	N	U
A	0.15	0.17	0.43
B	0.48	0.37	0.56
C	0.51	0.43	1.05
D	0.59	0.61	1.65
E	0.60	0.66	1.74
F	0.63	0.74	1.90

4 结 语

针对中长基线 RTK 定位中双差电离层延迟残差对 GPS 单系统 WL 模糊度以及 BDS/GPS 组合 NL 模糊度固定造成的不利影响,本文借鉴多系统组合定位以及 BDS 单系统 TCAR 模型的优点,提出基于多系统组合的 MCAR 优化算法,先以较高成功率快速固定 BDS 的两个 EWL 模糊度,继而通过简单变换得到 BDS 宽巷模糊度,然后将其辅助提高 GPS 宽巷模糊度固定成功率,最后采用将电离层延迟误差参数化的策略,对电离层延迟误差进行了有效地分离,进一步精化了误差模型,以提高 BDS/GPS 窄巷模糊度固定成功率。结合实测数据就模糊度解算效果和定位精度两个指标进行了验证分析,结果表明 MCAR 优化算法是可行的。本文提出的模型针对的是 50 km 以内的中长基线,该模型将电离层延迟残差进行了有效的分离,且顾及了先验模型的误差,其中,先验约束的误差取值与基线长度相关,只要取值在合适的区间内,该方法可行的。对于大于 50 km 长基线,双差电离层延迟残差高阶项以及双差对流层延迟残差增大,使得单历元模糊度解算变得困难。

参 考 文 献

[1] He Haibo, Li Jinlong, Yang Yuanxi, et al. Per-

formance Assessment of Single-and Dual-frequency BeiDou/GPS Single-epoch Kinematic Positioning[J]. *GPS Solut*, 2013,12(4): 131-137

[2] Deng Chenlong, Tang Weiming, Liu Jingnan, et al. Reliable Single-epoch Ambiguity Resolution for Short Baselines Using Combined GPS/BeiDou System[J]. *GPS Solut*, 2013, 17(2): 126-132

[3] Gao Xingwei, Guo Jingjun, Cheng Pengfei, et al. Fusion Positioning of Compass/GPS Based on Spatio-Temporal System Unification[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012,41(5):744-75 (高星伟, 过静珺,程鹏飞,等. 基于时空系统统一的北斗与 GPS 融合定位[J]. *测绘学报*,2012,41(5):744-75)

[4] Li Jinlong. BDS/GPS Multi-frequency Real-Time Kinematic Positioning Theory and Algorithms[D]. Zhengzhou, China: PLA Information Engineering University. 2014(李金龙. 北斗/GPS 多频实时精密定位理论与算法[D]. 郑州,信息工程大学,2014

[5] Feng Yanming. GNSS Three Carrier Ambiguity Resolution Using Ionosphere-reduced Virtual Signals[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(12): 847-862)

[6] Fan Jianjun, Wang Feixue. A Method for GNSS Three Frequency Ambiguity Resolution Based on Short Baselines [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007,36(1):43-49(范建军,王飞雪. 一种短基线 GNSS 的三频模糊度解算(TCAR)方法[J]. *测绘学报*,2007,36(1):43-49)

[7] Li Bofeng, Shen Yunzhong, Zhou Zebo. A New Method for Medium and Long Range Three Frequency GNSS Rapid Ambiguity Resolution[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009,38(4): 296-301(李博峰, 沈云中, 周泽波. 中长基线三频 GNSS 模糊度的快速算法[J]. *测绘学报*. 2009,38(4):296-301)

[8] Tang Weiming, Deng Chenlong, Shi Chuang, et al. Triple-frequency Carrier Ambiguity Resolution for Beidou Navigation Satellite System[J]. *GPS Solut*. 2014,18(3):335-344

[9] Leick A. GPS Satellite Surveying 3rd Edn [M]. New York, USA:Wiley Press, 2003

A Method of BDS/GPS RTK Positioning Based on MCAR Algorithm for Medium-baseline

XIE Jiantao¹ HAO Jinming¹ LIU Weiping¹ YU Heli¹ TIAN Yingguo¹

1 Institute of Navigation and Space Target Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450050, China

Abstract: The number of visible satellites is increasing in the age of multiple global navigation systems. The global navigation satellite system (GNSS) , and Chinese BeiDou satellite navigation system

(BDS) offer three frequencies signals to users, the ambiguity resolution is improved the higher accuracy and reliability of GNSS-RTK positioning . In general, ionosphere-free combinations are used in single-epoch RTK(Real-Time Kinematic)for medium-baseline. But this algorithm amplifies the measurement noise and the ambiguity resolution performance deteriorates as the length of baseline increases. In this paper, a single-epoch and multi-frequency RTK positioning algorithm for medium-baseline is presented, based on the BDS/GPS dual system combination. Two BDS extra-wide lane ambiguities were fixed at a high success rate and the BDS wide-lane ambiguity was sloved through a simple transformation. Ambiguity-fixed WL was used to improve the success rate of GPS WL ambiguity fixing, and parameterization strategy of ionospheric delay error was used to improve the success rate of BDS/GPS NL ambiguity fixing. This algorithm was validated with real-time data. The results show that the proposed algorithm ia feasible for ambiguity resolution and positioning accuracy.

Key words: BDS/GPS; three carrier ambiguity resolution; RTK of multi-systems; ambiguity resolution

First author: XIE Jiantao, PhD, lecturer, specializes in GNSS precision data processing. E-mail: xiejiantao0911@sina.com
Corresponding author: YU Heli, PhD. E-mail: zh_ljpd@163.com

(上接第 1208 页)

A Method to Improve the Utilization of Observation for Water Vapor Tomography by Adding Assisted Tomographic Area

ZHAO Qingzhi^{1,2} YAO Yibin¹ LUO Yiyong¹

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2 College of Geomatics, Xi'an University of Sciece and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract: In existing Global Navigation Satellite System (GNSS) water vapor tomographic techniques, only signals which penetrate the entire research area are used. Due to the specific geometric distribution of satellite constellations and receivers as well as the specificity of tomography area, many signals penetrating from the side of a research area are excluded as ineffective information, which undermines the tomographic result. To solve this issue, a method is proposed for improving the utilization of signal rays by adding an assisted tomographic area, which allows the signal information crossed from the side of a research area to be utilized as well. An experiment using data from the Continuously Operation Reference Stations (CORS) network of Texas in UAS, is compared with radiosonde data of 72 249. The results show that the proposed method can enhance the accuracy of tomographic results, the improvement rate of Root Mean Square Error (RMS) was14.6%.

Key words: water vapor tomography; CORS; signal utilization; radiosonde

First author: ZHAO Qingzhi, PhD, specializes in GNSS data processing and GNSS Meteorology. E-mail: zhaoqingzhia@163.com
Corresponding author: YAO Yibin, PhD, professor. E-mail: ybyao@whu.edu.cn
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41174012, 41274022; the Jiangxi Province Natural Science Foundation of China, No. 20151BAB213031.