

DOI:10.13203/j.whugis20150017



文章编号:1671-8860(2017)07-0989-06

基于 BDS/GPS 组合定位的部分模糊度固定效果分析

舒 宝¹ 刘 晖¹ 张晋升² 潘国富² 蒋 军¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

2 广州中海达卫星导航技术股份有限公司,广东 广州,511400

摘要:多系统组合有利于提高卫星导航定位的精度及可靠性,然而对于载波差分定位由于模糊度维数的陡增、观测噪声、大气残余误差等原因用传统的 Lambda 方法很难得到所有模糊度的固定解,采用部分模糊度方法固定最优的模糊度子集则相对容易。总结了现有的部分模糊度固定方法,分析了不同方法的特点,并用实测数据分析了 BDS/GPS 组合动态定位时部分模糊度固定的效果。实验结果表明,部分模糊度方法可以显著提高模糊度固定时的成功率及 Ratio 值,并且可以缩短 RTK 定位时的初始化时间,加快坐标的收敛速度,提高组合系统动态定位结果的精度。

关键词:部分模糊度固定; BDS/GPS 组合; 成功率; RTK; Lambda

中图法分类号:P228.41

文献标志码:A

近年来,随着北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)的迅猛发展,北斗系统已具备在亚太大部分地区提供卫星导航服务的能力,结合现有的 GPS 等全球卫星导航定位系统,GNSS 组合导航定位已成为趋势。多模、多频信号的使用将会提高 RTK(real-time kinematic)用户的精度和可靠性,但其关键技术是快速准确固定载波信号的模糊度,然而过去的研究表明,随着模糊度维数的陡增,模糊度正确固定概率会降低^[1]。对于多模、多频组合定位,由于卫星数较多,以及观测噪声、大气残余误差等影响,很难在短时间内成功固定所有卫星的模糊度。基于此,国内外学者提出一系列关于部分模糊度固定的方法^[1,4-8]来提高模糊度成功固定概率,这些方法归纳起来有以下 3 种:①根据信噪比^[7]、高度角^[8]、最优解与次最优解是否相等^[4]等标准选取噪声较小的卫星频段的模糊度参与固定,去除噪声较大、残余误差较大的卫星;②将各频段模糊度浮点解及方差阵进行组合形成宽窄巷,先固定宽巷模糊度,在宽巷模糊度固定后,通过提高窄巷模糊度方差阵的精度进而促进窄巷模糊度的固定^[3];③直接选取模糊度的子集进行固定,在降相关后根据成功率^[1,5,7]等准则在投影空间选取模糊度的最优子集,提高模糊度固定概率。这些

方法各具特点,在不同的环境下表现出的效果也不尽相同,例如在双频环境下,模糊度难以固定时,可以采取先固定宽巷的方式加快坐标收敛的速度^[3],在卫星数非常多时直接采取高截止高度角的方式得到较好的定位结果^[14]。已有文献中大多都是针对 GPS 单系统或 GPS 和 Galileo 模拟数据组合^[4,5,9],本文研究在 BDS/GPS 双系统组合模式下的模糊度固定效果以及坐标的收敛速度情况,为当前的 GNSS 组合导航定位用户提供参考。

1 模糊度固定的理论与方法

模糊度是载波信号首次跟踪时未知周数的整数部分,模糊度参数的求解以简化的方程表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{a} + \mathbf{B}\mathbf{b} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

式中, \mathbf{a} 是双差整周模糊度参数向量; \mathbf{b} 是实参数向量包括基线分量及可能的电离层、对流层参数等; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 是与之对应的系数矩阵; \mathbf{y} 是观测值向量,包括伪距和载波相位观测值; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是随机噪声向量。根据式(1)可以解出模糊度参数和其他参数的浮点解 \mathbf{X} 以及方差协方差矩阵 \mathbf{Q} :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{a}} \\ \hat{\mathbf{b}} \end{bmatrix}; \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_a & \mathbf{Q}_{ab} \\ \mathbf{Q}_{ba} & \mathbf{Q}_b \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.1 Lambda 方法概述

目前,使用最广泛的是 Lambda 方法^[15]:

$$\check{\mathbf{z}} = \min_{\mathbf{z} \in \mathbb{Z}} (\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{z})^T \mathbf{Q}_z^{-1} (\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{z}) \quad (3)$$

式中, $\hat{\mathbf{z}}$ 和 \mathbf{Q}_z 的表达式为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{z}} = \hat{\mathbf{Z}} \hat{\mathbf{a}} \\ \mathbf{Q}_z = \mathbf{Z} \mathbf{Q}_a \mathbf{Z}^T \end{cases} \quad (4)$$

式中, \mathbf{Z} 为降相关矩阵; \mathbb{Z} 代表整数集。在搜索结束后结合 \mathbf{Z} 将固定后的模糊度度 $\check{\mathbf{z}}$ 恢复到原始空间,然后通过模糊度检验指标确定是否接受搜索模糊度的最佳备选组,常用的模糊度检验方法有 Ratio 检验、FFRT^[10] 检验等,这些方法主要计算次最优备选组和最优备选组残差二次型的比值:

$$RT = \frac{\|\hat{\mathbf{a}} - \check{\mathbf{a}}\|_{\mathbf{Q}_a}}{\|\hat{\mathbf{a}} - \check{\mathbf{a}}\|_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}}}} \geq t \quad (5)$$

式中, $\check{\mathbf{a}}$ 是次最优整周模糊度备选组; t 是阈值,一般情况设 $t=2$ 或 3,对于 FFRT, t 根据先验的失败率计算^[10],是动态变化的。

若最优模糊度备选组通过检验,可以用模糊度的固定解根据条件平差得到基线的固定解:

$$\check{\mathbf{b}} = \hat{\mathbf{b}} - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}}^{-1} (\hat{\mathbf{a}} - \check{\mathbf{a}}) \quad (6)$$

1.2 部分模糊度固定

当所有卫星的模糊度用 Lambda 方法难以固定时可以考虑用部分模糊度固定的方法。先固定那些较为容易固定的模糊度,假设将模糊度向量 $\hat{\mathbf{a}}$ 分解为两部分,它和对应的协方差矩阵 \mathbf{Q} 为:

$$\hat{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{a}}_1 \\ \hat{\mathbf{a}}_2 \end{bmatrix}; \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}_1} & \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}_1 \hat{\mathbf{a}}_2} \\ \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}_2 \hat{\mathbf{a}}_1} & \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}_2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $\hat{\mathbf{a}}_1$ 代表在原始空间按某些准则选定的容易固定部分卫星频段或者双频组合形成的宽巷模糊度; $\hat{\mathbf{a}}_2$ 代表噪声较大的卫星或者窄巷模糊度部分。若采用 Lambda 方法固定 $\hat{\mathbf{a}}_1$ 后,类似于坐标分量的修正过程,用 $\hat{\mathbf{a}}_1$ 的固定解修正 $\hat{\mathbf{a}}_2$ 及其方差协方差阵:

$$\begin{cases} \check{\mathbf{a}}_2 = \hat{\mathbf{a}}_2 - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}_2 \hat{\mathbf{a}}_1} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}_1}^{-1} (\hat{\mathbf{a}}_1 - \check{\mathbf{a}}_1) \\ \mathbf{Q}_{\check{\mathbf{a}}_2} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}_2} - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}_2 \hat{\mathbf{a}}_1} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}_1}^{-1} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}_1} \end{cases} \quad (8)$$

然后再用 Lambda 方法固定 $\hat{\mathbf{a}}_2$ 部分模糊度,若只有 $\hat{\mathbf{a}}_1$ 固定则可以用式(6)更新坐标参数得到固定解,若 $\hat{\mathbf{a}}_2$ 固定则可用其再次修正坐标参数解。

对于引言中的方法 3,首先用 bootstrapping 方法计算成功率,根据设定的成功率阈值 P_0 。挑选降相关后模糊度的最优子集^[13]:

$$P_{s, B_i} = \prod_{j=i}^n \left(2\Phi\left(\frac{1}{2\sigma_{z_{j|J}}}\right) - 1 \right) > P_0 \quad (9)$$

式中, $\Phi(x)$ 是正态分布函数; $\sigma_{z_{j|J}}$ 代表条件方差,其计算方法如下,式(4)中降相关后的方差-协方差矩阵 \mathbf{Q}_z 经过三角分解得:

$$\mathbf{Q}_z = \mathbf{L}^T \mathbf{D} \mathbf{L} \quad (10)$$

其中 \mathbf{L} 和 \mathbf{D} 满足:

$$\begin{cases} l_{j,i} = \sigma_{z_{j|J}} \sigma_{z_{j|J}}^{-2} \\ d_j = \sigma_{z_{j|J}} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\sigma_{z_{j|J}}$ 即为 \hat{z}_j 的条件方差,其条件是 \hat{z}_j 得到固定解,其中 $J = \{j+1, j+2, \dots, n\}$; $\sigma_{z_{n|n}} = \sigma_{z_n}$ 是精度最高的浮点解模糊度。 \mathbf{D} 是对角阵,矩阵中的元素是按顺序排列的,满足 $\sigma_{z_{i|J}} \geq \sigma_{z_{k|J}}, i < k$ 。

根据式(9)即可从降相关后的 $\hat{\mathbf{z}}$ 向量中挑选出 $n-i+1$ 个元素的模糊度子集,因为 Lambda 算法中,经过 Z 变换后 $\hat{\mathbf{z}}$ 的排列顺序与条件方差 $\sigma_{z_{j|J}}$ 是对应的,所以选取的子集为 $\hat{\mathbf{z}}_p = \{\hat{z}_i, \hat{z}_{i+1}, \dots, \hat{z}_n\}$,其对应的 Z 变换矩阵为 \mathbf{Z}_p , \mathbf{Z}_p 即为 \mathbf{Z} 矩阵的第 i 到 n 列元素。当 $\hat{\mathbf{z}}_p$ 固定后,可以根据式(8)更新另一部分模糊度的浮点解,然后根据 \mathbf{Z} 矩阵将其恢复到原始空间,由于 $\hat{\mathbf{z}}$ 中部分是浮点数,恢复后所有的模糊度仍是浮点数,也可以不用恢复,直接根据式(12)得到基线的“固定解”(原始模糊度并未固定为整数):

$$\check{\mathbf{b}}_p = \hat{\mathbf{b}} - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}_p} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}_p}^{-1} (\hat{\mathbf{a}}_p - \check{\mathbf{a}}_p) \quad (12)$$

其中, $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}_p} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}} \mathbf{Z}_p$, $\mathbf{Q}_{\check{\mathbf{a}}_p} = \mathbf{Z}_p^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}} \mathbf{Z}_p$ 。

2 BDS/GPS 组合定位

对于 BDS/GPS 双系统组合定位时需采用统一的时间和坐标基准。WGS-84 与 CGCS2000 的系统差异理论上在 0~0.105 mm 范围内,对短距离的相对定位来说完全可以忽略^[2]。对于时间基准同步,BDT 和 GPST 除了相差 1 356 周 14 s 外还存在微小的同步误差,为了消除不同卫星系统对定位的影响,本文在双差组合时,在各自系统内部分别选取参考卫星。实时定位时采用伪距和载波观测值,双差观测方程为:

$$\begin{cases} \Delta \nabla P^S = \Delta \nabla R^S + \mathbf{A} \mathbf{d} \mathbf{X} + \Delta \nabla T^S + \\ \Delta \nabla I^S + \Delta \nabla e_P^S \\ \lambda^S \Delta \nabla \varphi^S = \Delta \nabla R^S + \mathbf{A} \mathbf{d} \mathbf{X} + \lambda^S \cdot \Delta \nabla N^S + \\ \Delta \nabla T^S - \Delta \nabla I^S + \Delta \nabla e_\varphi^S \end{cases} \quad (13)$$

式中, S 代表系统类型; λ 为波长; P 为伪距观测值; φ 为载波观测值; R 为卫星到接收机相位中心的近似几何距离; N 为模糊度; T 为对流层延迟误差; I 为电离层延迟误差; e 为未模型化的误差和观测噪声; $\mathbf{d} \mathbf{X}$ 表示相对坐标改正向量,是双系

统共有的未知参数; A 为坐标改正向量的系数矩阵。若基线较短,可不考虑电离层误差和对流层误差。

3 实验数据分析

为了分析部分模糊度对于 BDS/GPS 组合实时定位的效果,本文从总结的 3 种类型选取了相应典型的部分模糊度固定方法:①从 Lambda 算法中得到的最优与次最优模糊度备选组挑选相等的模糊度重新用 Lambda 方法固定直到其通过 Ratio 检验,若挑选的子集中模糊度个数太少则结果采用浮点解(FS 方法);②通过频率间的组合,先选取波长较长的宽巷模糊度参与固定,宽巷固定后再固定窄巷(WN 方法);③基于成功率准则在投影空间选取成功率较高的模糊度子集(SRC 方法)。本文主要从模糊度子集的成功率、固定率(通过模糊度检验的历元所占的比例)、基线解算精度、收敛时间等几方面进行评价部分模糊度固定的效果。实验数据采用上海司南卫星导航技术有限公司官网上下载的两条基线数据,分别是位于广州市天河区的长约 8 km 的多系统观

测数据(基线一)和位于上海闵行区的长约 17 km 的多系统观测数据(基线二),两条基线的采样率都为 10 s,本文采用其中的 BDS/GPS 双系统 L1L2B1B2 频段数据用于实验分析。

3.1 模糊度成功率与固定率分析

成功率是模糊度是否能正确固定的重要参考指标之一^[1],同时也反应了浮点解的精度。现有的成功率计算方法很多,其中 Lambda 最小二乘准则搜索模糊度的成功率是最高的,但是其难以直接计算,而 bootstrapping 的成功率与最小二乘成功率是相当接近的^[16],因此一般用其作为最小二乘成功率的下界。模糊度固定的另一个重要指标是 Ratio 值,在 Lambda 算法中一般以其作为模糊度是否固定的最终指标。本文首先处理了基线一的 BDS/GPS 组合数据,处理方式为动态单历元解算。图 1 给出了全部模糊度参与固定(FULL 方法)及上述 3 种部分模糊度固定方法的成功率及 Ratio 值,其中蓝色线条表示 Ratio 值,青色代表模糊度子集的成功率,红色虚线是指参考的 Ratio 阈值,大小为 2。图 2 是 3 种部分模糊度固定方法选取子集的模糊度以及全部模糊的个数,FULL 代表所有模糊度的个数。

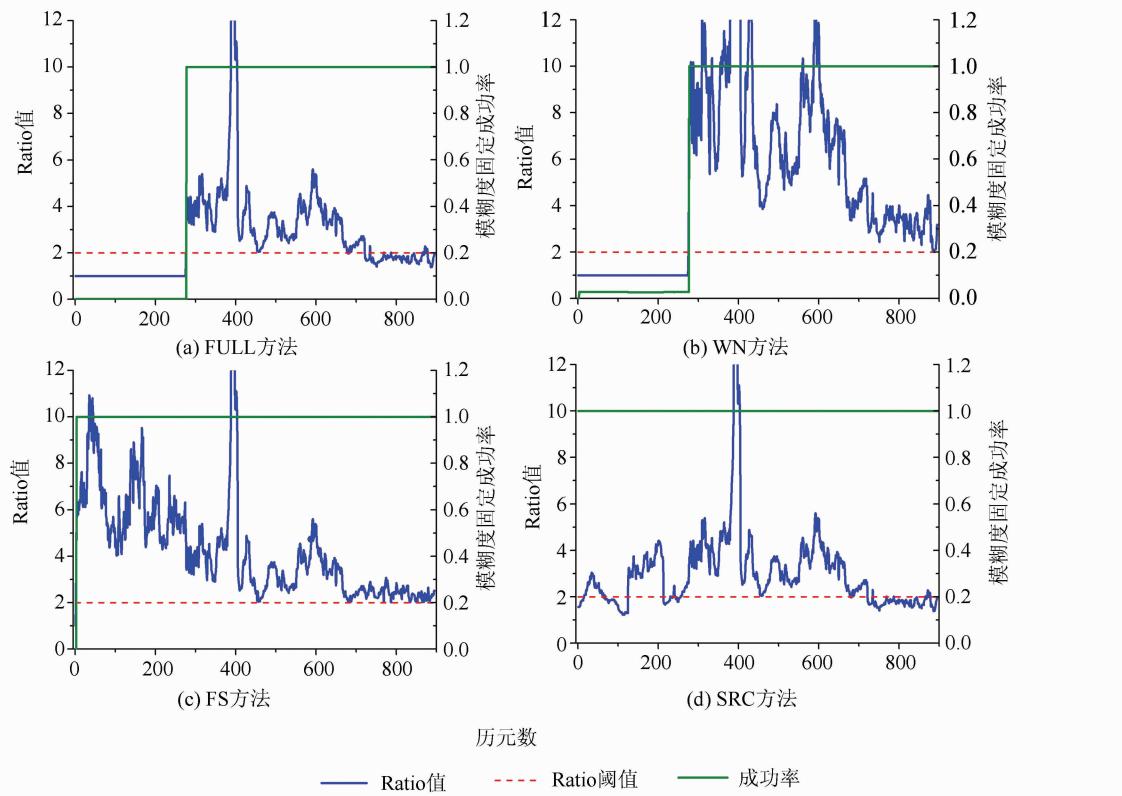


图 1 模糊度的成功率与 Ratio 值

Fig. 1 Success Rate and Ratio Value of Ambiguities to Fix

本文中 SRC 方法设置的成功率阈值 $P_0 = 0.99$,FS 方法中挑选最优子集的截止条件是

Ratio 值大于给定的阈值 2 且模糊度个数不少于 10(若小于 10 则该历元是浮点解),WN 方法由于

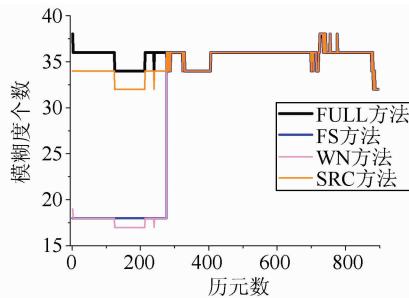


图2 选取的子集中模糊度的个数

Fig. 2 The Ambiguity Number of Selected Subset

宽巷固定后再固定窄巷,因此前半段的成功率是宽相模糊度的成功率(窄巷未固定),后半段是宽巷固定后窄巷模糊度参与固定时的成功率,Ratio值与之对应。从图1可以看出WN方法的成功率也有了一定的提高,但不明显,主要原因是该时段一些观测值误差较大,通过增加波长的方法并不能排除误差较大的卫星频段的模糊度,FS和SRC方法部分模糊度选取子集的成功率都显著提高了,成功率接近于1,结合图2可知,这两种方法的模糊度个数都有所减少,自动排除了噪声较大的模糊度,而FS方法的模糊度个数减少相对较多,接近一半,原因可能是利用该准则选取最优子集时可能过于苛刻,误删了一些精度较高的模糊度。从Ratio值方面来看,WN方法在宽巷模糊度固定后窄巷模糊度的Ratio值有了显著的提高,FS和SRC方法在排除精度较差的模糊度后Ratio值也有了显著提高,固定率大大提升,将Ratio阈值设为2时,FS方法的固定率接近100%。

由图1可以看出,SRC方法虽然成功率很高,当Ratio阈值为2时,仍有很多历元不能通过模糊度检验,当阈值设为3时,固定率会更低,因此Ratio阈值的设置比较关键。特别对于多系统而言,模糊度个数较多,Ratio值一般较低^[10],用某一确定的阈值模糊度固定率较低,Teunissen等提出用基于失败率的FFRT方法得到Ratio阈值(动态阈值),该阈值与成功率和模糊度的个数有关^[10],是动态变化的,有更好的适应性。表1是基线一在Ratio阈值设置为2、3以及失败率为0.01的FFRT阈值时得到的4种模糊度固定方法的固定率情况。

由表1结合图1可以看出,Ratio阈值对固定率的影响很大,当Ratio阈值从2变为3时,FS和SRC方法固定率都下降了20%以上,同时也可看出当Ratio阈值为定值时FS方法的固定率最高,采用FFRT方法设置阈值时各种方法固定率有了明显的提高,SRC方法固定率提高到100%。由此可以看出BDS/GPS组合时,Ratio

值一般较小,采用动态的Ratio阈值更适合多系统组合时模糊度个数较多的情况;利用FS方法时,由于其选取子集时以Ratio值作为选取条件之一,该种方法的固定率受Ratio阈值的影响相对较小。

表1 四种方法在不同的Ratio阈值下的固定率/%

Tab. 1 The Proportion of Successfully Fixed Epochs Under Different Ratio Threshold/%

Ratio阈值	FULL	FS	WN	SRC
3.0	32.9	63.8	61.8	41.4
2.0	50.4	99.8	69.0	67.2
动态阈值	69.1	99.9	69.2	100

3.2 基线解算精度及收敛时间分析

通过§3.1的分析可知,BDS/GPS组合时,不同的Ratio阈值设置方法对模糊度固定率影响较大,因此,只用固定率评判部分模糊度固定的效果是不充分的。事实上,模糊度通过Ratio检验也可能出现固定错误的情况。如果选取的模糊度子集(子集一)固定错误,较难固定的模糊度子集(子集二)根据式(8)更新相应的模糊度浮点解及方差协方差阵必然也会受到影响,因此,子集二在采用Lambda方法固定时,一般不会通过Ratio检验,即使通过,子集二错误固定的可能性也较大。为了进一步检验其效果,需要分析模糊度固定后基线解算的精度。本文用公式 $\|\bar{b}-b\|=c \times \|\hat{b}-b\|$ 评定部分模糊度基线解算的精度,其中, b 代表真实坐标向量; \bar{b} 代表部分模糊度方法解算的坐标向量; \hat{b} 代表全部模糊度参与固定的解算结果; c 是部分模糊度方法的三维坐标误差与FULL方法坐标误差的比值。图3是基线一单历元动态解算时部分模糊度基线解算效果情况,其中图3(a)是全部模糊度参与固定(FULL)时基线误差情况,图3(b)是相应的部分模糊度方

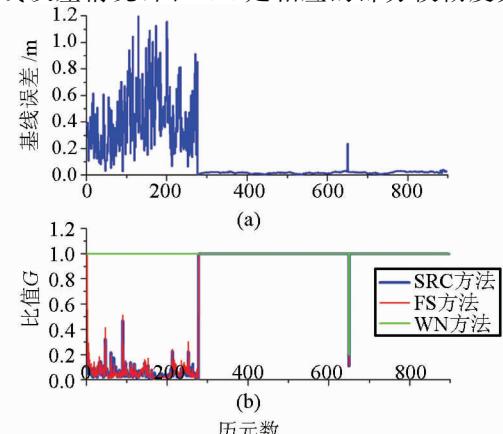


图3 3种部分模糊度与FULL方法基线解算精度比较

Fig. 3 Contrast of Three Partial Ambiguities Resolution Methods with “FULL” Method about the Precision of Baseline Solution

法解算的误差的比值。当 $c=1$ 时代表该历元的解算结果都为浮点解或者都固定且结果一致, 当 $c<1$ 时表示部分模糊度方法解算的结果精度有所提高。从图 3 中可以看出, FS 和 SRC 方法对于 FULL 方法未固定的模糊度其比值大多都在 0.2 以下, 基线解算精度有明显的提升, WN 方法在某些历元精度也有所提高, 由此表明采用部分模糊度固定的方法不仅可以提高固定率, 且在模糊度固定后, 基线解算精度有大幅的提升。

图 4 是采用滤波的方式动态解算基线二时的 NEU 坐标误差随着时间的变化结果, 图中蓝色点

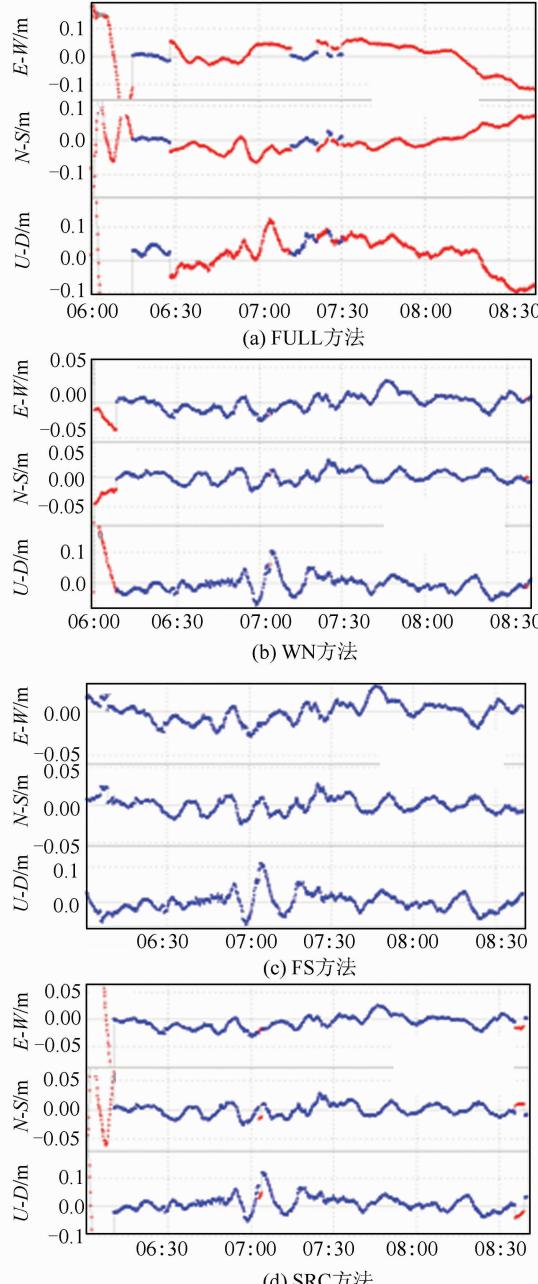


图 4 4 种模糊度固定方法解算的坐标误差结果

Fig. 4 Performance of Four Ambiguity Resolution Methods for "Baseline 2"

代表固定解, 红色点代表浮点解。图 5 是 4 种不同的方法所对应的模糊度固定的个数, 表 2 是该条基线用 4 种方法解算时首次固定时所需要的时间以及每种方法解算坐标误差 NEU 方向的 STD 值。由图 4 和表 2 可知, 3 种部分模糊度固定方法都明显缩短了初始化时间, FS 方法只需用 20 s 即可得到固定解, WN 方法虽有很多历元是浮点解, 然而其坐标误差较小 (0.012, 0.016, 0.042), 结合图 5 可知其原因是红点部分对应的窄巷模糊度虽没有固定, 但从第 3 个历元开始宽相模糊度已固定, 可以得到较为准确的坐标解; 图中 FULL 方法出现固定后又浮点的情况, 主要原因是视野中出现的新升起的卫星, 其高度角较低, 噪声较大, 影响模糊度的固定, 而用部分模糊度的方法可以较好地解决此问题。

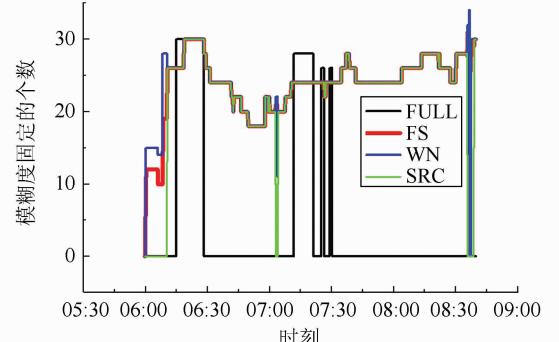


图 5 滤波过程中模糊度成功固定的个数

Fig. 5 The Number of Successfully Fixed Ambiguities for "Baseline 2"

表 2 4 种解算方法的初始化时间及坐标误差结果

Tab. 2 The Initialization Time and Baseline Solution Error of Four Methods

模糊度固定方法	FULL	FS	WN	SRC
初始化时间/s	910	20	500	640
N/m	0.040	0.012	0.014	0.030
E/m	0.063	0.016	0.016	0.036
U/m	0.111	0.030	0.042	0.082

4 结语

本文针对 BDS/GPS 组合动态定位模糊度难以固定的问题, 归纳总结了现有的部分模糊度固定方法, 分析了每种方法的特点, 最后用实测数据分析了 3 种部分模糊度固定的效果。实验结果表明, 部分模糊度固定方法对于 BDS/GPS 组合定位可以显著提高模糊度固定的成功率及固定率, 并可以缩短 RTK 定位的初始化时间, 得到更高精度的基线解算结果。其中宽窄巷 (WN) 方法通

过先固定波长较长的宽巷模糊度再固定窄巷,宽巷固定后不仅可以得到较高精度的基线解,而且又能促进窄巷的固定,缩短初始化时间。另外两种方法通过一些准则挑选最优模糊度子集,可以自动排除噪声较大的卫星或浮点解精度较低的模糊度,从而提高模糊度固定的成功率,加快模糊度的固定,缩短坐标的收敛时间。在后续的研究中若能结合各种部分模糊度固定方法的优势,则可能会得到更好的结果。

参考文献

- [1] Teunissen P J G, et al. Geometry-free Ambiguity Success Rates in Case of Partial Fixing[C]. Proceedings of ION-NTM, San Diego, CA, 1999
- [2] Gao Xingwei, Guo Jingjun, Cheng Pengfei, et al. Fusion Positioning of BeiDou/GPS Based on Spatio Temporal System Unification[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 743-748(高星伟,过静君,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):743-748)
- [3] Li Jinlong, Yang Yuanxi, Xu Junyi, et al. GNSS Multi-carrier Fast Partial Ambiguity Resolution Strategy Tested with Real BDS/GPS Dual-and Triple-frequency Observations [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1): 5-13
- [4] Dai Liwen, Eslinger D, Sharpe T. Innovative Algorithms to Improve Long Range RTK Reliability and Availability[C]. Proceedings of the 2007 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, CA, 2007
- [5] Wang Jun, Feng Yanming. Reliability of Partial Ambiguity Fixing with Multiple GNSS Constellations[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(1): 1-14
- [6] Li Pan, Zhang Xiaohong. Precise Point Positioning with Partial Ambiguity Fixing [J]. *Sensors*, 2015, 15(6): 13 627-13 643
- [7] Parkins A. Increasing GNSS RTK Availability with a New Single-epoch Batch Partial Ambiguity Resolution Algorithm[J]. *GPS Solutions*, 2011, 15(4): 391-402
- [8] Takasu T, Yasuda A. Kalman-filter-based Integer Ambiguity Resolution Strategy for Long-baseline RTK with Ionosphere and Troposphere Estimation [C]. Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, OR, 2010
- [9] Cao Wei, O'Keefe K, Cannon M. Partial Ambiguity Fixing within Multiple Frequencies and Systems[C]. Proceedings of ION GNSS, Fort Worth, TX, 2007
- [10] Verhagen S, Teunissen P J G. The Ratio Test for Future GNSS Ambiguity Resolution[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(4): 535-548
- [11] Verhagen S, Teunissen P J G, van der Marel H, et al. GNSS Ambiguity Resolution: Which Subset to Fix[C]. Proceedings of IGNSS Symposium, Sydney, Australia, 2011
- [12] Teunissen P J G. GNSS Ambiguity Bootstrapping: Theory and Application[C]. Proceedings of International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada, 2001
- [13] Teunissen P J G. Success Probability of Integer GPS Ambiguity Rounding and Bootstrapping [J]. *Journal of Geodesy*, 1998, 72(10): 606-612
- [14] Teunissen P J G. Instantaneous BeiDou + GPS RTK Positioning with High Cut-off Elevation Angles [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(4): 335-350
- [15] Teunissen P J G. The Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(1/2): 65-82
- [16] Verhagen S. On the Approximation of the Integer-least-squares Success Rate: Which Lower or Upper-bound to Use[J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2003, 2(2):117-124

Performance Assessment of Partial Ambiguity Resolution Based on BDS/GPS Combined Positioning

SHU Bao¹ LIU Hui¹ ZHANG Jinsheng² PAN Guofu² JIANG Jun¹

1 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Hi-Target Surveying Instrument Co., Ltd., Guangzhou 511400, China

Abstract: Multi-GNSS combination is helpful to improve the accuracy and reliability of satellite navigation

(下转第 1001 页)

GPS Satellite Clock Bias Prediction Based on Exponential Smoothing Method

WANG Li^{1,2} ZHANG Qin^{1,2} HUANG Guanwen^{1,2} TIAN Jie³

1 School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

3 Centre for Geodetic Data Processing, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Xi'an 710054, China

Abstract: A new method of GPS satellite clock bias prediction based on exponential smoothing method (ESM) is presented in this paper. This new method can develop the prediction model successfully by using a small amount of data and has the advantages of easier calculation and convenience in operation. And the good results can still be acquired by this new method when the relevant historical data are absent or the changing trend of data is unobvious or unstable. By contrast with the quadratic polynomial model (QPM) and gray system model (GM) which are usually used in GPS satellite clock bias prediction, the calculating and analyzing results indicated that the ESM can be used in the medium-term and short-term prediction of GPS satellite clock bias and the prediction precision can reach up to nanosecond (ns) level. The prediction results of ESM are better than QPM but on the same level with GM when a small amount of data is used to establish the prediction model. And in the mean time, the ESM can also be used in the long-term prediction of GPS satellite clock bias and the prediction precision can reach up to microsecond (μ s) level which is on the same level with GM.

Key words: exponential smoothing method (ESM); GPS; satellite clock bias; prediction

First author: WANG Li, PhD, associate professor, specializes GNSS precise positioning and deformation monitoring. E-mail: wangli@chd.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Qin, PhD, professor. E-mail: zhangqinle@263.net.cn

Foundation support: The Major State Basic Research Development Program(973 Program) of China, No. 2014CB744700; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41104019, 41274005, 41202189, 41304033; the Project of State Land Resources Survey of China, Nos. 1212011220186, 1212011220142, 12120114079101; the Fundamental Research Founds for the Central Universities, Nos. 310826172006, 310826172202, 310826173101.

(上接第 994 页)

and positioning. However, in case of BDS/GPS combined carrier phase positioning systems, it is difficult to fix all the ambiguities due to the increasing number of ambiguities, high measurement noises or residual atmosphere delays with the traditional Lambda method. But it is of greater probability to fix a subset of ambiguities. In this paper, we divided current partial ambiguity fixing methods into three categories and analyzed the characteristics of every method. Finally, the effect of the three partial resolution methods were tested with the measured BDS/GPS data. The results show that the success rate and ratio value is obviously improved when using partial ambiguity fixing, at the same time, the initialization time of RTK is shortened, the precision of kinematic positioning is also improved.

Key words: partial ambiguity resolution; BDS/GPS; success rate; RTK; Lambda

First author: SHU Bao, PhD candidate, specializes in data processing of GNSS and ionosphere modeling. E-mail: baos613@163.com

Foundation support: The Chang Jiang Waterway Bureau Funding Project, No. 2013-364-548-200; the National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0800405.