

引文格式:ZHANG Baocheng, OU Jikun, YUAN Yunbin. Method of Processing GNSS Reference Network Data with Refined Datum Definition for Rank-deficiency Elimination[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(9): 895-901. (张宝成, 欧吉坤, 袁运斌. 精选基准消秩亏的 GNSS 参考网数据处理方法[J]. 测绘学报, 2014, 43(9): 895-901.) DOI:10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0164

精选基准消秩亏的 GNSS 参考网数据处理方法

张宝成, 欧吉坤, 袁运斌

中国科学院 测量与地球物理研究所 动力大地测量学国家重点实验室, 湖北 武汉 430077

Method of Processing GNSS Reference Network Data with Refined Datum Definition for Rank-deficiency Elimination

ZHANG Baocheng, OU Jikun, YUAN Yunbin

State Key Laboratory of Dynamic Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract: Global navigation satellite system (GNSS) networks are widely used for determining satellite orbit/clocks, monitoring crustal deformation and velocity field of the Earth as well as estimating the Earth's rotation parameters. The data processing strategies comprise double-difference (DD) based baseline solution as well as un-differenced based precise point positioning (PPP) solution. On the basis of fundamental GNSS observation equations, full-rank function models adopted by both strategies are respectively derived after identification of two distinct sets of datum parameters. Moreover, the potential pitfalls associated with both strategies are summarized. For instance, the estimable phase biases are biased by the clocks in context of DD strategy and thus become time-varying between adjacent epochs; with respect to PPP strategy, the integer nature of estimable ambiguities is deteriorated due to absorption of phase biases. A modified strategy is proposed in this paper by means of determining a set of refined datum parameters so as to combine benefits belonging to either DD or PPP strategies. Its main advantages involve: the solvability and the time-constancy of phase biases would largely reduce the number of unknowns and consequently improve formal precision of network solution. Furthermore, owing to well-kept integer nature of the estimable ambiguities, the reliability of network solution would be potentially strengthened after successful ambiguity resolution.

Key words: GNSS; reference network data processing; rank-deficiency elimination; time-varying parameters; time-constant parameters; precise point positioning

摘 要: 全球导航卫星系统(GNSS)参考网多用于估计卫星轨道/钟差、监测地表形变和速度场、确定精密地球自转参数等,相关数据处理模式包括:双差基线解(DD)和非差精密单点定位(PPP)等。本文首先从 GNSS 基本观测方程出发,通过选取两组基准参数,导出上述两模式下的列满秩观测方程,然后分析它们的不足,例如:相位偏差在 DD 模式中吸收了钟差,丧失了时不变特性;模糊度在 PPP 模式中吸收了相位偏差,失去了整数性。基于上述分析,提出一种新的参考网数据处理方案,以充分融合 DD 和 PPP 模式的优点。它的关键策略是精选基准参数,以达到消秩亏的目的,具体优点体现在:相位偏差独立可估,若合理约束为时不变参数,可充分减少参数个数,提高网解精度;待估模糊度具备整周特性,经由模糊度固定,可改善网解可靠性。

关键词: 全球导航卫星系统;参考网数据处理;消秩亏;时变参数;时不变参数;精密单点定位

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2014)09-0895-07

基金项目:国家自然科学基金重点基金(41231064);国家自然科学基金(41174015; 41374043); 大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLGED2013-1-6-E)

1 引言

联合处理多参考站的 GNSS 数据,可服务高精度大地测量。数据处理模式包括双差基线解(简称“DD 模式”)和非差精密单点定位解(简称“PPP 模式”)两种策略。基于全球参考站网,各 IGS(international GNSS service)分析中心采用 DD 模式确定卫星轨道^[1-2],而采用 PPP 模式估计卫星钟差^[3]。上述各类产品已广泛应用于授时和导航等领域^[4-5]。此外,广域/局域 GNSS 参考网数据处理,还是实现广域差分^[6]、大气延迟提取^[7]、形变监测^[8-9]和实时动态定位(RTK)^[10]等技术的前提。

DD 模式与 PPP 模式各有利弊。DD 模式下,通过最优独立基线选取,可确定一组整周相位模糊度^[11]。经由模糊度固定,其余参数的估计精度将得到改善^[12]。然而,独立基线选取易受共视卫星个数、基线长度等因素的限制,影响了观测数据利用效率;PPP 模式下,基本观测量为消电离层组合观测值,摆脱了对卫星需共视的要求,更充分地利用了观测数据^[3-4]。然而,由于吸收了接收机和卫星相位偏差,可估模糊度一般为实数,网解参数的可靠性将由此受到影响^[13]。

通过 S 基准变换和消秩亏理论^[14],文献^[15]推导了基于非差观测值的 GNSS 参考网数据处理模型:一方面,相位偏差参数被当作时变参数,并与钟差参数进行了合并;另一方面,通过定义一组基准模糊度,消除了模糊度与钟差参数的线性相关,并确保了剩余可估模糊度的整周特性。这两方面因素致使所导出的非差模型与 DD 模式具备完全等价性^[15]。针对 PPP 模式,文献^[12]对其实施了改进:首先,将实数解的非差模糊度映射成双差模糊度,以便于发掘模糊度的整周特性;随后,实施整周模糊度固定,以改善网解的可靠性。

依照文献^[15]所提供的思路,基于非差、非组合的 GNSS 参考网观测值,通过选取两组基准参数,本文分别推导了对应于 DD 和 PPP 模式的满秩观测方程,以此为基础,对比分析了两种模式的特点和不足。随后,借鉴文献^[12]中的算法思想,在综合考虑相位偏差的时不变性、双差模糊度的整周性基础上,提出一种基准参数的精选方案,实现了新的参考网数据处理策略。其优点包括:①相位偏差独立可估,其时间稳定性可在参数估计中加以考虑^[16];②既有效利用了所有观测信

息,又确保了可估模糊度的整数性。

2 非差网观测方程消秩亏

从 GNSS 非差、非组合观测值出发,推导了对应于 DD 和 PPP 模式的列满秩观测方程。为了简化推导,本节假定测站和卫星位置,对流层延迟等无法引起秩亏的几何参数已知。而在实际中,当该假设不成立时,则还需在观测方程中引入未知的几何参数(如本文随后算例),但这并不会引起额外的列秩亏,更不会影响本节所导出的满秩模型和相关结论的适用性。

2.1 GNSS 观测方程

GNSS 伪距和相位方程分别为^[17]

$$\left. \begin{aligned} \bar{p}_{r,j}^s &= dt_r - dt^s + \mu_j I_{r,1}^s + b_{r,j} - b_j^s \\ \bar{\phi}_{r,j}^s &= dt_r - dt^s - \mu_j I_{r,1}^s + \lambda_j N_{r,j}^s + \varphi_{r,j} - \varphi_j^s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $\bar{p}_{r,j}^s$ 和 $\bar{\phi}_{r,j}^s$ 为测站 r 至卫星 s 第 j 个频率的伪距、相位观测值,几何参数均已事先改正,单位为 m; dt_r 、 $b_{r,j}$ 和 $\varphi_{r,j}$ 分别为接收机的钟差、伪距偏差以及相位偏差参数; dt^s 、 b_j^s 和 φ_j^s 则为对应的卫星参数; $N_{r,j}^s$ 为非差整周模糊度; $I_{r,1}^s$ 表示 L_1 频率电离层群延迟; $\mu_j = \lambda_j^2 / \lambda_1^2$, λ_j 表示频率 j 相位观测值的波长。除 $N_{r,j}^s$ 单位为周外,式(1)中其余参数的单位均为 m。

若实施多历元数据处理,还需考虑各类参数的时变特性:例如,钟差历元间变化较大,需每历元估计一组新参数;伪距和相位偏差、模糊度等随时间变化极为缓慢,通常被模型化为时不变参数等。

若某历元时刻,构成参考网的 n 个测站($r=1,2,\dots,n$)同步观测到 m 颗共视卫星($s=1,2,\dots,m$)的双频观测值($j=1,2$),式(1)设计矩阵的零空间维数,即列秩亏个数为 $4(n+m)+1$ ^[18]。为确保参数可估性,须将一部分参数约束为“基准”以消除秩亏,并遵循如下准则:①凡构成设计矩阵零空间的子矩阵,其对应的一组未知参数均可被选取为基准;②基准参数的个数须与秩亏数相等;③基准参数的取值可任意假定,但一般设为零值。

2.2 消秩亏策略 I: DD 模式

DD 模式下的消秩亏步骤和基准选取原则可简述如下:

(1) 将 $n+m$ 个 dt_r 和 dt^s 选取为基准,消除钟差与伪距和相位偏差的相关性。

(2) 将 4 个 $\varphi_{1,j}$ 和 $b_{1,j}$ 选取为基准,消除卫星和接收机偏差之间的相关性。

(3) 将 $n+m-1$ 个 $\varphi_{i,1}^s$ 和 $\varphi_{i,1}$ ($i \neq 1$) 选取为基准,消除电离层和相位偏差之间的相关性。

(4) 将 $2(n+m-1)$ 个 $\lambda_j N_{p,j}^q$ ($p=1 \vee q=1$) 选取为基准,消除相位偏差和模糊度之间的相关性,其中 \vee 表示并集运算符。

表 1 第 1 列列举了 DD 模式下所选取的基准参数,第 2 列给出了可估参数,主要包括(由上到下):(第 2 个频率的)接收机和卫星相位偏差,双频的接收机和卫星伪距偏差、电离层以及模糊度参数。值得注意的是,所有可估参数均包含了基准参数,其物理含义与式(1)中的对应项有所不同。

表 1 DD 模式下的基准参数和可估参数

Tab. 1 The datum parameters and the estimable parameters in DD mode

| 基准参数 | 可估参数 |
|---|---|
| dt_r, dt^s | $\Delta\varphi_{i1,2} - \lambda_2 \Delta N_{1i,2}^1 - \mu_2 (\Delta\varphi_{i1,1} - \lambda_1 \Delta N_{1i,1}^1) + (1 - \mu_2) \Delta dt_{i1}$ $i \neq 1$ |
| $\varphi_{1,j}, b_{1,j}$ | $\varphi_{i,2}^s - b_{1,2} - \lambda_2 N_{1,2}^s + (1 - \mu_2) (dt^s - dt_1) - \mu_2 (\varphi_{i,1}^s - b_{1,1} - \lambda_1 N_{1,1}^s)$ $i \neq 1$ |
| $\varphi_{i,1}^s, \varphi_{i,1}$ $i \neq 1$ | $\Delta b_{i1,j} + \mu_j (\Delta\varphi_{i1,1} - \lambda_1 \Delta N_{1i,1}^1) + (1 + \mu_j) \Delta dt_{i1}$ |
| $\lambda_j N_{p,j}^q$ $p=1 \vee q=1$ | $b_{i,j}^s - b_{1,j} + \mu_j (\varphi_{i,1}^s - \varphi_{1,1} - \lambda_1 N_{1,1}^1) + (1 + \mu_j) (dt^s - dt_1)$ |
| | $\begin{cases} I_{p,1}^q + \varphi_{r,1} - \varphi_{i,1}^s + dt_r - dt^s + \lambda_1 N_{p,1}^q \\ I_{p,1}^q + \varphi_{r,1} - \varphi_{i,1}^s + dt_r - dt^s + \lambda_1 (N_{p,1}^1 + N_{1,1}^q - N_{1,1}^1) \end{cases}$ $p=1 \vee q=1$ |
| | $\lambda_j (N_{p,j}^q - N_{p,j}^1 - N_{1,j}^q + N_{1,j}^1)$ $p \neq 1 \wedge q \neq 1$ |

注: Δ 为站间单差运算符,如 $\Delta\zeta_{ab} = \zeta_a - \zeta_b$; \wedge 为交集运算符

考察 DD 模式下可估参数,可得几点结论:首先,模糊度参数具备双差形式和整数特性,经由整周模糊度解算,可有效改善其余参数的估计精度和可靠性;但另一方面,伪距和相位偏差中均吸收了钟差参数,致使其随时变性受不稳定的钟差变化支配。这就意味着,在多历元数据处理中,该类偏差的时变模型将“不得不”选取为白噪声过程,进而导致待估参数个数的增加(详见后文算例)。

2.3 消除秩亏策略 II: PPP 模式

类似的,PPP 模式下消除秩亏步骤和基准参数选取原则为:

(1) 将 $2(n+m)$ 个 $b_{r,j}$ 和 $b_{i,j}^s$ 选取为基准,消除伪距偏差和钟差以及电离层间的相关性。

(2) 将 $2(n+m)$ 个 $\varphi_{r,j}$ 和 $\varphi_{i,j}^s$ 选取为基准,消除相位偏差和模糊度之间的相关性。

(3) 将 1 个 dt_1 选取为基准,消除接收机和卫星钟差之间的相关性。

表 2 中列举了 PPP 模式下的基准参数和可估参数的形式,其中后者主要包括(从上到下):接收机和卫星钟差、电离层和模糊度参数。与表 1 对比可知,由于基准参数选取的差异,两种模式下可估参数的含义发生变化,主要表现为两个方面:首先,前文已述,由于将钟差选取为基准,DD 模式下相位偏差独立可估,但时不变性受到影响,而 PPP 模式下,相位偏差选为基准,进而被模糊度吸收,有效保留了其时间稳定性;其次,为消除模

糊度和相位偏差之间的线性相关,DD 和 PPP 模式分别选取部分模糊度和相位偏差作为基准,致使两种模式下的可估模糊度分别保留和丧失了整数特性。

表 2 PPP 模式下的基准参数和可估参数

Tab. 2 The datum parameters and the estimable parameters in PPP mode

| 基准参数 | 可估参数 |
|--|--|
| $dt_i - dt_1 + \frac{1}{\mu_2 - 1} (\mu_2 \Delta b_{i1,1} - \Delta b_{i1,2})$ $i \neq 1$ | |
| $b_{r,j}, b_{i,j}^s$ | $dt^s - dt_1 + \frac{1}{\mu_2 - 1} \{ \mu_2 (b_{i,1}^s - b_{1,1}) - (b_{i,2}^s - b_{1,2}) \}$ |
| $\varphi_{r,j}, \varphi_{i,j}^s$ | dt_1 |
| | $I_{r,1}^s - \frac{1}{\mu_2 - 1} \{ (b_{i,2}^s - b_{i,1}^s) - (b_{r,2} - b_{r,1}) \}$ |
| | $\lambda_j N_{r,j}^s + (\varphi_{r,j} - \varphi_{i,j}^s) - \{ r_2 (b_{r,j1} - b_{i,1}^s) - r_1 (b_{r,2} - b_{i,2}^s) \}$ |

注: $\gamma_l = (\mu_j + \mu_l) / (\mu_2 - 1)$, $l=1, 2$

2.4 精选基准消除秩亏的新模式

针对上述两种模式下,选取不同基准所引起待估参数的特性变化,提出一种新的基准参数选取策略,同时顾及了模糊度的整数特性和相位偏差参数的时间稳定性。具体的消除秩亏模式可简述为:

(1) 将 $2(n+m)$ 个 $b_{r,j}$ 和 $b_{i,j}^s$ 选取为基准,消除伪距偏差和钟差以及电离层间的相关性。

(2) 将 2 个 $\varphi_{1,j}$ 选取为基准,消除卫星和接收机相位偏差偏差间的相关性。

(3) 将 1 个 dt_1 选取为基准,消除接收机和卫星钟差之间的相关性。

(4) 将 $2(n+m-1)$ 个 $\lambda_j \cdot N_{p,j}^q$ ($p=1 \vee q=1$) 选取为基准, 消除相位偏差和模糊度之间的相关性。

与 DD 和 PPP 模式下的消秩亏过程相比, 新模式特性包括: ① 借鉴 PPP 模式, 将偏差参数选取为基准, 保留了可估相位偏差的时不变性; ② 借鉴 DD 模式, 将部分模糊度选取为基准, 使得可估模糊度具有整数特性。因此, 新模式融合了 DD 和 PPP 模式的优点, 进而在多历元数据

处理中, 可发掘更多的有用信息, 以增强参数解的可靠性。值得注意的是, 在估计浮点模糊度的条件下, 新模式和 PPP 模式下的时不变参数个数相同, 且存在一一对应的转换关系, 故两种模式下, 各类参数的模糊度浮点解等价。表 3 中给出了新模式下可估参数的具体形式, 由上到下分别为: 接收机和卫星钟差、(双频的)接收机和卫星相位偏差、电离层和模糊度参数。

表 3 新模式下的基准参数和可估参数

Tab. 3 The datum parameters and the estimable parameters in new mode

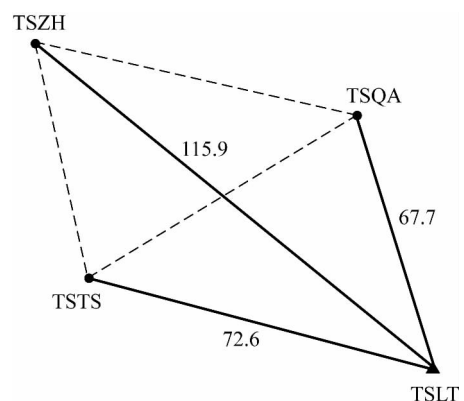
| 基准参数 | 可估参数 |
|--|---|
| $b_{r,j}, b_{s,j}^s$ | $dt_i - dt_1 + \frac{1}{\mu_2 - 1} (\mu_2 \Delta b_{i1,1} - \Delta b_{i1,2})$ $i \neq 1$ |
| $\varphi_{1,j}$ | $dt^s - dt_1 + \frac{1}{\mu_2 - 1} \{ \mu_2 (b_{s,1}^s - b_{1,1}) - (b_{s,2}^s - b_{1,2}) \}$ |
| dt_1 | $\Delta \phi_{i1,j} - \lambda_j \Delta N_{1i,j}^1 + \gamma_1 \Delta b_{i1,2} - \gamma_2 \Delta b_{i1,1}$ $i \neq 1$ |
| $\lambda_j N_{p,j}^q \quad p=1 \vee q=1$ | $\phi_{s,j}^s - \phi_{1,j} - \lambda_j N_{1,j}^s + \gamma_1 (b_{s,2}^s - b_{1,2}) - \gamma_2 (b_{s,1}^s - b_{1,1})$ |
| | $I_{r,1}^s - \frac{1}{\mu_2 - 1} \{ (b_{s,2}^s - b_{s,1}^s) - (b_{r,2} - b_{r,1}) \}$ |
| | $\lambda_j (N_{p,j}^q - N_{p,j}^1 - N_{1,j}^q + N_{1,j}^1)$ $p \neq 1 \wedge q \neq 1$ |

3 试验分析

试验基于某 4 个测站在 2009-08-08 采集的双频 GPS 观测值 (L1-L2-C1-P2), 采样间隔为 15 s。各测站的空间分布、DD 模式下的独立基线和长度等如图 1 所示。设计 4 种网数据处理模式 (均采用动态基线解算): S1—DD 模式, 浮点模糊度解; S2—DD 模式, 整数模糊度解; S3—PPP 模式; S4—新模式, 整数模糊度解, 以便于单独考察相位偏差时变模型选取、整周模糊度固定对位置解的影响。试验选取的测站均是某省级连续运行参考系统的参考站, 其先验坐标精度优于 1 cm, 将用作 S1—S4 模式下解算的参考值。试验还采用了 IGS 精密卫星轨道和钟差产品, 以尽可能地降低星历误差的影响。

假定某观测时段共包含 t 个历元, 且不存在卫星的升降变化, 上述 4 种模式下的时变和时不变参数个数随历元数变化如表 4 所示。基于 1 h 的上述试验数据, 图 2 中由上而下绘出了 4 条直线, 依次对应 4 种模式下参数总数随时间变化规律。显见, S1 和 S2 模式下总的参数个数随历元

迅速增加, 1 h 后均接近 16 000 个。但由于整周模糊度解算, S2 模式的参数个数略少于 S1; 而在 S3 和 S4 模式中, 由于考虑了相位偏差的时间稳定性, 1 h 后参数总数仅为 8000 个。因此, 通过解算整周模糊度和约束相位偏差, 可以显著地减少待估参数, 提高相应的模型强度。



实线和数字表示独立基线及其长度, 单位为 km

图 1 试验所采用的 4 测站参考网

Fig. 1 The 4-station reference network used in the experiment

表 4 不同网数据处理模式下,时变和时不变参数个数随历元变化

Tab. 4 The numbers of time-varying and time-constant parameters versus epoch numbers: in different network processing modes

| 网处理模式 | 时变参数个数 | 时不变参数个数 |
|-------|------------------|---------------|
| S1 | $t[3(n+m-1)+nm]$ | $2(n-1)(m-1)$ |
| S2 | $t[3(n+m-1)+nm]$ | 0 |
| S3 | $t(n+m-1+nm)$ | $2nm$ |
| S4 | $t(n+m-1+nm)$ | $2(n+m-1)$ |

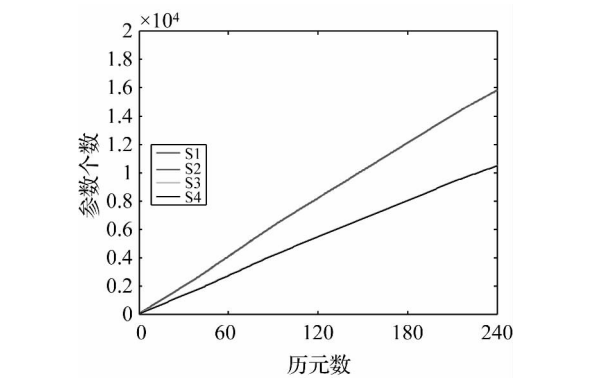


图 2 4 种模式下参数个数随历元变化(1 h 内)
Fig. 2 The numbers of unknown parameters versus the epochs for four schemes (in 1 h)

试验的参数估计策略可概括为:①基于正、反向卡尔曼滤波,仿动态求解各历元基线分量的全局最优解;②待估参数包括基线分量(白噪声过程)、天顶对流层延迟(批参数,每 2 h 估计一组)、模糊度(时不变)、相位偏差(S1 和 S2 模式,白噪声过程;S3 和 S4 模式,时不变)、钟差(仅 S3 和 S4 模式,白噪声过程);③观测值的截止高度角为 15° ,伪距和相位观测值的先验中误差选为 3 dm 和 3 mm;④S2 和 S4 模式中,采用 LAMBDA 和固定失败率的 FFRatio 实施模糊度固定和有效性检验^[19-20]。

特别的,S1—S2 模式下,电离层参数包含时变的接收机钟差基准,失去短期内平稳变化的特性;而 S3—S4 模式下,电离层参数吸收稳定的伪距偏差基准,其时变性未受影响,可因此对其引入适当的动态模型^[21-22]。在试验中,为便于考察相位偏差和模糊度固定对基线解的影响,S1—S4 模式下的电离层参数均统一地模型化为白噪声过程。

以基线 TSLT-TSZH 为例,分析了 4 种模式下的三维(北、东和天顶)基线解误差(单位:m)及其两类统计量:均值和 RMS(单位:cm)。可得到如下结论(图 3 中仅绘出北分量误差,以节约篇幅):

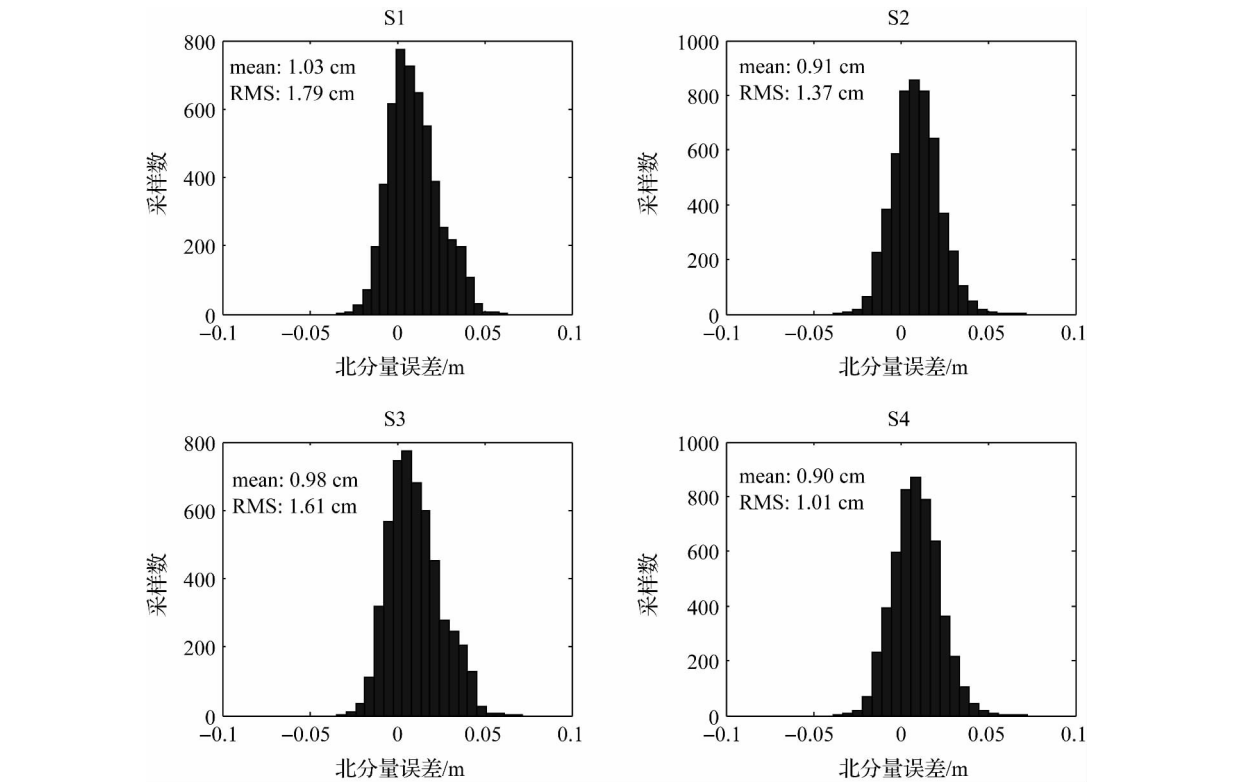


图 3 4 种模式下,基线 TSLT-TSZH 的北分量误差(动态解)
Fig. 3 The north component errors of baseline TSLT-TSZH (kinematic solution) in four schemes

(1) 模糊度固定之前, S3 模式下的三维基线解误差 RMS 分别为 1.61 cm、1.46 cm 和 5.30 cm。较之 S1 的北、东和天顶基线分量 RMS 改善可分别达 10%、8.8% 和 1.7%; 模糊度固定之后, S4 模式下的三维基线解误差 RMS 则分别为 1.01 cm、0.93 cm 和 3.26 cm, 较之 S2 模式的三维基线分量改善则分别为 26%、24% 和 24.2%。相位偏差的不同时变模型是上述 RMS 差异的主因, 且对基线分量固定解的影响远大于浮点解。

(2) 对比 S2 和 S1 模式的位置解可知, DD 模式下, 整周模糊度固定对三维基线分量 RMS 改善程度分别为 23.4%、21.8% 和 20.2%; 而通过比较 S4 和 S3 模式可知, 新模式下, 模糊度固定所引起的基线分量改善则分别为 37.3%、36.3% 和 38.5%。后两种模式中, 由于对相位偏差的历元间变化施加了合理的约束, 在减少待估参数个数的同时, 增强了模型的可靠性, 此时, 整周模糊度固定更加明显地改善了基线解。

(3) S4 较之 S1 模式位置解的精度改善, 源于相位偏差的时变模型选取和整周模糊度固定的综合作用, 3 分量上分别为 43.6%、41.9% 和 39.5%。

总之, 通过分析 RMS 指标, 上述试验方案量化了 S1—S4 模式下, 不同的模型假设对动态基线分量的影响。另一方面, 若在解算静态基线的条件下重复该试验, 前述若干量化性的结论(如不同模式之间, RMS 改善量级等)将发生改变, 但有关不同模式优劣的结论(如 S4 模式下, RMS 改善最显著)将依然成立。

4 总结和展望

目前, GNSS 参考站网数据处理模式包括两种: 基于双差观测值的 DD 模式和基于非差观测值的 PPP 模式。本文从秩亏的非差 GNSS 观测方程出发, 选取两组基准参数消秩亏, 导出了分别对应于 DD 和 PPP 模式的满秩函数模型。随后, 归纳了两种模式下, 各类待估参数的具体形式和时变特性。分析表明, DD 模式和 PPP 模式分别顾及了模糊度的整数性和相位偏差的时间稳定性。通过精选另一组基准参数, 本文推导了一种参考网数据处理模式。该模式同时发掘了相位偏差的稳定性和模糊度的整数性条件, 因此保留了 DD 和 PPP 模式的优势, 并回避了各自的不足。基于某 4 测站的实测 GPS 双频数据, 通过设计不

同的参考网数据处理方案, 考察了相位偏差动态模型或(和)整周模糊度固定对北、东和天顶基线分量仿动态解的影响, 证实了该模式能提供较 DD 和 PPP 模型更为可靠的结果。

针对基于局域参考网的网络 RTK 技术, 本文模式能估计非差形式的大气延迟。与双差大气延迟相比, 内插非差大气延迟将不再受参考测站(卫星)的影响, 用户站处改正信息的生成将更为简单、直观; 针对基于广域参考网的 PPP-RTK 技术, 本文模式能提供基准一致的卫星相位偏差、卫星钟差等, 以用作实现单站 PPP 模糊度固定所必须的改正信息。

参考文献:

- [1] DOW J, NEILAN R, RIZOS C. The International GNSS Service in a Changing Landscape of Global Navigation Satellite Systems[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3-4): 191-198.
- [2] BLEWITT G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines Up to 2000 km[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B8): 10187-10203.
- [3] ZUMBERGE J, HEFLIN M, JEFFERSON D, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 5005-5017.
- [4] ZHANG Baocheng, OU Jikun, YUAN Yunbin, et al. Precise Point Positioning (PPP) Algorithm Based on Original Dual-frequency GPS Code and Carrier-phase Observations and Its Application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(5): 478-483. (张宝成, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 基于 GPS 双频原始观测值的精密单点定位算法及应用[J]. *测绘学报*, 2010, 39(5): 478-483.)
- [5] TEUNISSEN P J G, ODIJK D, ZHANG B C. PPP-RTK: Results of CORS Network-based PPP with Integer Ambiguity Resolution[J]. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation; Series A*, 2010, 42(4): 223-230.
- [6] WUEBBENA G, SCHMITZ M, BAGGE A. PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-space Representation in RTK Networks[C]// *Proceedings of the ION GNSS 2005*, Long Beach, [s. n.], 2005: 2584-2594.
- [7] YUAN Y B, TSCHERNING C C, KNUDSEN P. The Ionospheric Eclipse Factor Method (IEFM) and Its Application to Determining the Ionospheric Delay for GPS[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(1): 1-8.
- [8] HAMMOND W C, BLEWITT G, KREEMER C. Block Modeling of Crustal Deformation of the Northern Walker Lane and Basin and Range from GPS Velocities[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B4): 10-37.

- [9] GAGNON K, CHADWELL C, NORABUENA E. Measuring the Onset of Locking in the Peru-Chile Trench with GPS and Acoustic Measurements[J]. *Nature*, 2005, 434(3): 205-208.
- [10] ZHANG B C. Determination of Un-differenced Atmospheric Delays for Network-based RTK [C] // *Proceedings of Institute of Navigation GNSS 2009*. Savannah: [s. n.], 2009: 2727-2738.
- [11] BOCK Y, ABBOT R, COUNSELMAN III C, et al. Establishment of Three-dimensional Geodetic Control by Interferometry with the Global Positioning System[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1985, 90(B9): 7689-7703.
- [12] BLEWITT G. Fixed Point Theorems of GPS Carrier Phase Ambiguity Resolution and Their Application to Massive Network Processing: Ambizap[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(B12): 7689-7703.
- [13] LAURICHESSE D, MERCIER F, BERTHIAS J P, et al. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination[J]. *Navigation*, 2009, 56(2): 135-149.
- [14] TEUNISSEN P J G. Generalized Inverses, Adjustment, the Datum Problem and S-transformations[C] // *Optimization and Design of Geodetic Networks*. Berlin: Springer, 1985: 11-55.
- [15] JONGE P J D. A Processing Strategy for the Application of the GPS in Networks [M]. Amsterdam: NCG Nederlandse Commissie voor Geodesie, 1998: 37-59.
- [16] OU Jikun. Uniform Expression of Solutions of Ill-posed Problems in Surveying Adjustment and the Fitting Method by Selection of the Parameter Weights[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(4): 283-288. (欧吉坤. 测量平差中不适定问题解的统一表达与选权拟合法[J]. *测绘学报*, 2004, 33(4): 283-288.)
- [17] TEUNISSEN P J G, KLEUBERG A. GPS for Geodesy [M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 1998: 188-194.
- [18] LANNES A, TEUNISSEN P J G. GNSS Algebraic Structure [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(5): 273-290.
- [19] TEUNISSEN P J G. The Least-square Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Resolution [J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(1-2): 65-82.
- [20] TEUNISSEN P J G, VERHAGEN S. The GNSS Ambiguity Ratio-test Revisited: A Better Way of Using It [J]. *Survey Review*, 2009, 41(312): 138-151.
- [21] ZHANG Baocheng, OU Jikun, YUAN Yunbin, et al. Calibration of Slant Total Electron Content and Satellite-receiver's Differential Code Biases with Uncombined Precise Point Positioning Technique[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(4): 446-453. (张宝成, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 利用非组合精密单点定位技术确定斜向电离层总电子含量和站星差分码偏差[J]. *测绘学报*, 2011, 40(4): 446-453.)
- [22] ZHANG Baocheng, OU Jikun. On the Different Strategies for Integer Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(6): 710-716. (张宝成, 欧吉坤. 论精密单点定位整周模糊度解算的不同策略[J]. *测绘学报*, 2011, 40(6): 710-716.)

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2013-03-18

修回日期: 2013-12-21

第一作者简介: 张宝成(1985—),男,博士后,研究方向为精密单点定位算法和应用。

First author: ZHANG Baocheng(1985—), male, post-doctoral fellow, majors in precise point positioning and its applications.

E-mail: b. zhang@curtin. edu. au

(上接第 894 页)

- [24] QIU Weining, TAO Benzao, YAO Yibin, et al. The Theory and Method of Surveying Data Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008: 126-139. (邱卫宁, 陶本藻, 姚宜斌, 等. 测量数据处理理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008: 126-139.)
- [25] ZHOU Jiangwen. Classical Theory of Errors and Robust Estimation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographic Sinica*, 1989, 18(2): 115-120. (周江文. 经典误差理论与抗差估计[J]. *测绘学报*, 1989, 18(2): 115-120.)
- [26] YANG Yuanxi. The Principle of Equivalent Weight: The Robust Least Squares Solution of Uniformity Model of the Parameter Adjustment [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 1994, 49(6): 33-35. (杨元喜. 等价权原理: 参数平差模型的抗差最小二乘解[J]. *测绘通报*, 1994, 49(6): 33-35.)

- [27] GUI Q, Li X, GONG Y, et al. A Bayesian Unmasking Method for Locating Multiple Gross Errors Based on Posterior Probabilities of Classification Variables [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(4), 191-203.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2013-10-24

修回日期: 2014-07-22

第一作者简介: 龚循强(1988—),男,博士生,研究方向为空间数据获取与处理。

First author: GONG Xunqiang (1988—), male, PhD candidate, majors in space data acquisition and processing.

E-mail: xqgong1988@163.com