

ZHU Huizhong, LIU Jingnan, TANG Weiming, et al. The Algorithm of Single-epoch Integer Ambiguity Resolution between Long-range Network RTK Base Stations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(3): 359-365. (祝会忠, 刘经南, 唐卫明, 等. 长距离网络 RTK 基准站间整周模糊度单历元确定方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 359-365.)

长距离网络 RTK 基准站间整周模糊度单历元确定方法

祝会忠¹, 刘经南¹, 唐卫明¹, 高星伟²

1. 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉 430079; 2. 中国测绘科学研究院, 北京 100830

The Algorithm of Single-epoch Integer Ambiguity Resolution between Long-range Network RTK Base Stations

ZHU Huizhong¹, LIU Jingnan¹, TANG Weiming¹, GAO Xingwei²

1. GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

Abstract: The algorithm of integer ambiguity resolution between long-range (typically 100~200 km) base stations at single-epoch is proposed. The wide-lane ambiguities are determined by linear relationship between carrier phase ambiguities. In order to reduce the residuals of non-divergent error in carrier phase ambiguities resolution, a new idea of reselecting base satellite by elevation is used. Then candidates of double frequency carrier phase ambiguities can be selected by fixed double difference wide-lane ambiguities. The double difference carrier phase ambiguities are searched and fixed through the computation of non-divergent error's residual. This algorithm was tested, and the advantages of this method are rapid, stable. This algorithm avoids the effect of cycle slips. The double difference integer ambiguity between long-range base stations can be fixed at single-epoch.

Key words: network RTK; long-range; single-epoch; double difference ambiguity; linear relationship

摘 要: 提出一种长距离(100~200 km)网络 RTK 基准站间的整周模糊度单历元确定方法。该方法首先利用载波相位模糊度间的线性约束关系对双差宽巷模糊度进行搜索。为了减小非弥散误差残差对载波相位模糊度解算的影响,采用了一种新的根据高度角重新选择基准卫星的方法。然后根据双差宽巷模糊度选取双频载波相位模糊度的备选组合,利用基准站间非弥散误差残差的计算值对双差载波相位模糊度进行搜索和确定。经试验算例的验证,该方法快速、稳定,不受周跳影响,只需一个历元的观测数据即可确定长距离基准站间的双差整周模糊度。

关键词: 网络 RTK; 长距离; 单历元; 双差模糊度; 线性关系

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2012)03-0359-07

基金项目: 国家自然科学基金(41104024); 国家 863 计划(2011AA120503863); 中国测绘科学研究院基本科研业务费(7771017; 7771202; 7771020; 7771120); 地理空间信息工程国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(201103)

1 引 言

网络 RTK 技术实现高精度动态定位的首要条件是基准站间整周模糊度的准确确定,只有正确固定了基准站模糊度才能得到高精度的综合误差或是建立高精度的误差模型。由于长距离网络 RTK 基准站间距离较长,达到 100~200 km,采用简单双差组合的方法确定整周模糊度非常困难,主要是由于电离层延迟和对流层延迟等误差对双差观测值的影响远大于模糊度的半个波长。即使在使用双频观测数据和基准站坐标已知的情况下,整周模糊度也难以与误差分离。

国内外学者对基准站间双差模糊度解算作了大量研究,并取得了一些成果^[1-15]。文献[8—14]

研究了长距离静态定位模糊度解算算法;文献[3]提出网络 RTK 基准站间基线单历元模糊度搜索方法,解决了基准站间模糊度的单历元解算问题;文献[4]提出可实现基准站间双差模糊度快速解算的三步法。长距离单历元网络 RTK 技术成为目前网络 RTK 的一个重要发展趋势,而单历元基准站间的整周模糊度确定是单历元高精度定位的关键。但现有的模糊度解算方法需要较长时间的观测数据才能确定长距离基准站间的整周模糊度,而且需要对周跳进行探测和修复。因此,本文提出一种长距离基准站间整周模糊度单历元解算方法,首先利用模糊度间的线性关系确定双差宽巷模糊度,并选取载波相位模糊度备选组合,最后根据非弥散误差的残差搜索确定双差载波相位模

糊度。

2 载波相位模糊度间的线性约束关系

通常情况下,基准站都设在比较开阔的地方,所以可忽略多路径的影响,基准站 A、B 对于卫星 p、q 的双差载波相位观测方程可表示为^[5]

$$\frac{c}{f_1} \nabla \Delta \Phi_{1AB}^{pq} = \nabla \Delta \rho_{AB}^{pq} - \frac{c}{f_1} \nabla \Delta N_{1AB}^{pq} - \frac{\nabla \Delta I_{0AB}^{pq}}{f_1^2} + \nabla \Delta T_{AB}^{pq} + \nabla \Delta \epsilon_{1AB}^{pq} \quad (1)$$

$$\frac{c}{f_2} \nabla \Delta \Phi_{2AB}^{pq} = \nabla \Delta \rho_{AB}^{pq} - \frac{c}{f_2} \nabla \Delta N_{2AB}^{pq} - \frac{\nabla \Delta I_{0AB}^{pq}}{f_2^2} + \nabla \Delta T_{AB}^{pq} + \nabla \Delta \epsilon_{2AB}^{pq} \quad (2)$$

式中,∇Δ 是双差因子,下标 1、2 分别表示两个载波;Φ 是以周为单位的载波相位观测值;f 为载波的频率;ρ 为卫星到接收机的几何距离;c 为真空中的光速;I₀ 是与频率无关的电离层延迟(一阶项);T 为对流层延迟和卫星轨道等非弥散误差;N 为载波相位模糊度;ε 为观测噪声。

非弥散误差 T 主要是对流层和卫星轨道误差,可以通过模型改正或其他方法进行消除或削弱^[16-17]。消除式(1)和式(2)中都含有的电离层折射 ∇ΔI_{0AB}^{pq},用 ∇Δη_{AB}^{pq} 表示 T 经对流层模型改正后的残差,则有

$$\nabla \Delta \eta_{AB}^{pq} = \nabla \Delta T'_{AB}{}^{pq} - \nabla \Delta T_{AB}^{pq} \quad (3)$$

式中,∇ΔT'_{AB}^{pq} 表示计算值。整理后得到双频模糊度间的一种线性关系

$$\nabla \Delta N_{2AB}^{pq} = \frac{f_1}{f_2} \nabla \Delta N_{1AB}^{pq} - \nabla \Delta l_{AB}^{pq} - \nabla \Delta \omega_{AB}^{pq} \quad (4)$$

式中各项以周为单位,其中

$$\nabla \Delta l_{AB}^{pq} = \nabla \Delta \Phi_{2AB}^{pq} - \frac{f_1}{f_2} \nabla \Delta \Phi_{1AB}^{pq} - \frac{f_2^2 - f_1^2}{c f_2} \cdot (\nabla \Delta \rho_{AB}^{pq} + \nabla \Delta T'_{AB}{}^{pq}) \quad (5)$$

$$\nabla \Delta \omega_{AB}^{pq} = \frac{f_2^2 - f_1^2}{c f_2} \nabla \Delta \eta_{AB}^{pq} + \frac{f_1^2 \nabla \Delta \epsilon_{1AB}^{pq} - f_2^2 \nabla \Delta \epsilon_{2AB}^{pq}}{c f_2} \quad (6)$$

因为基准站的坐标已知,∇Δρ_{AB}^{pq} 可以精确计算,所以 ∇Δl_{AB}^{pq} 是常数项,∇Δω_{AB}^{pq} 为残余误差和观测噪声。式(4)是表示模糊度 ∇ΔN_{2AB}^{pq} 与 ∇ΔN_{1AB}^{pq} 间线性约束关系的直线形式,令直线斜率为:k = f₁/f₂ = 77/60 = 1.283̇。

另外,将式(2)与式(1)相减,消除 ∇ΔT_{AB}^{pq},则有模糊度间的另一种线性约束关系

$$\nabla \Delta N_{2AB}^{pq} = \frac{f_2}{f_1} \nabla \Delta N_{1AB}^{pq} - \nabla \Delta l_{1AB}^{pq} - \nabla \Delta \omega_{1AB}^{pq} \quad (7)$$

式中

$$\nabla \Delta l_{1AB}^{pq} = \nabla \Delta \Phi_{2AB}^{pq} - \frac{f_2}{f_1} \nabla \Delta \Phi_{1AB}^{pq} - \frac{f_2^2 - f_1^2}{c f_1 f_2} \nabla \Delta I_{0AB}^{pq} \quad (8)$$

$$\nabla \Delta \omega_{1AB}^{pq} = \frac{f_2^2 - f_1^2}{c f_1 f_2} \nabla \Delta \xi_{AB}^{pq} + \frac{f_2}{c} (\nabla \Delta \epsilon_{1AB}^{pq} - \nabla \Delta \epsilon_{2AB}^{pq}) \quad (9)$$

式中,∇Δξ_{AB}^{pq} 为电离层高阶项等残余误差;∇Δω_{1AB}^{pq} 为残余误差和观测噪声的综合影响。式(7)也是表示模糊度 ∇ΔN_{2AB}^{pq} 与 ∇ΔN_{1AB}^{pq} 间线性约束关系的直线形式,令直线斜率为 k₁ = f₂/f₁ = 60/77 ≈ 0.779 22。

3 长距离基准站间模糊度的单历元确定

3.1 宽巷模糊度的确定

3.1.1 双差宽巷模糊度初值的计算

基准站间的双差宽巷模糊度初值可由 P 码伪距和载波相位观测值的 Melbourne-Wübbena 组合(M-W 组合),按式(11)计算得到

$$\nabla \Delta MW_{AB}^{pq} = \frac{(f_1 \nabla \Delta P_{1AB}^{pq} + f_2 \nabla \Delta P_{2AB}^{pq})}{(f_1 + f_2)} - \frac{(c \nabla \Delta \Phi_{1AB}^{pq} - c \nabla \Delta \Phi_{2AB}^{pq})}{(f_1 - f_2)} \quad (10)$$

$$\nabla \Delta N_{WAB}^{pq} = \frac{(f_1 - f_2) \nabla \Delta MW_{AB}^{pq}}{c} \quad (11)$$

式中,∇ΔP_{1AB}^{pq},∇ΔP_{2AB}^{pq} 为双差伪距观测值;∇ΔMW_{AB}^{pq} 为双差 M-W 组合观测值;∇ΔN_{WAB}^{pq} 为双差宽巷模糊度,其他符号与式(1)、式(2)相同。M-W 组合观测值消除了电离层、对流层、钟差和计算的几何观测值等因素的影响,不受测站间距离限制,只受观测噪声的影响,因此,适用于长距离基准站间双差宽巷模糊度初值的计算。

3.1.2 双差宽巷模糊度的搜索

正确的双频模糊度备选值满足上述两个线性约束关系。式(7)表示的线性约束关系主要受双差电离层延迟误差的影响。式(4)表示的线性约束关系不受电离层延迟一阶项的影响,主要是包含对流层残差和轨道误差等非弥散误差的影响。对于式(4),如果各种误差和残差完全消除,则该线性关系的约束下 ∇ΔN_{1AB}^{pq} 备选值变化 60 周,∇ΔN_{2AB}^{pq} 备选值将变化 77 周,与之对应的双差宽巷模糊度会变化 17 周。实际上由于误差并不能完全消除,所以这个约束关系是由比值与 1.283̇ 近似或非常近似的两个整数表示的,也能表示出

双差宽巷模糊度备选值的变化周期。例如 $14/11 \approx 1.2727$, 即 $\nabla\Delta N_{1AB}^{pq}$ 变化 11 周, $\nabla\Delta N_{2AB}^{pq}$ 变化 14 周, 同时宽巷模糊度变化的周期为 $14 - 11 = 3$ 。由式(1)和式(2)经过对流层延迟模型改正后直接计算得到 $\nabla\Delta N_{1AB}^{pq}$ 、 $\nabla\Delta N_{2AB}^{pq}$ 的初值, 给定二者的搜索范围, 在搜索范围内确定双频模糊度的备选值。并由双频模糊度搜索范围内的模糊度值构成了一个如图 1 所示的二维模糊度搜索空间。

求出双差宽巷模糊度的初值以后, 给定模糊度的搜索范围, 按照模糊度备选值的变化周期确定宽巷模糊度备选值。根据式(12)可由宽巷模糊度值计算出双差宽巷电离层延迟。

$$\nabla\Delta I_{WAB}^{pq} = \nabla\Delta\rho_{AB}^{pq} - \frac{c}{f_w} \nabla\Delta N_{WAB}^{pq} - \frac{c}{f_w} \nabla\Delta\Phi_{WAB}^{pq} + \nabla\Delta T_{AB}^{pq} + \nabla\Delta\epsilon_{WAB}^{pq} \quad (12)$$

式中各符号含义与式(1)、式(2)中相同, 下标 W 表示宽巷载波。与频率无关的双差电离层延迟, 可由式(13)计算。

$$\nabla\Delta I_{0AB}^{pq} = -f_1^3 \nabla\Delta_{WAB}^{pq} / f_2 \quad (13)$$

利用式(12)、式(13), 每个宽巷模糊度备选值可计算出相应的双差电离层延迟, 代入式(7), 得到多个双频模糊度间线性约束关系的直线方程式。但其中只有一条直线关系是正确的, 即正确宽巷模糊度对应的直线关系式。假如双差宽巷模糊度的搜索空间有 3 个备选值, 得到 3 条平行直线 I_1 、 I_2 、 I_3 , 单历元宽巷模糊度搜索过程如图 1 所示。

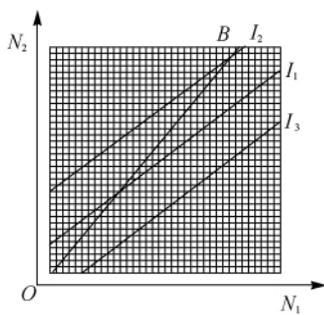


图 1 长距离基准站间单历元宽巷模糊度搜索

Fig. 1 The wide-lane ambiguity searching between long-range base stations at single epoch

图 1 中直线 B 为式(4)表示的线性约束关系。宽巷模糊度的搜索就变成了确定 I_1 、 I_2 、 I_3 3 条直线中正确的双频模糊度间的线性约束关系。确定方法有两种: 第 1 种方法是, 利用伪距计算出双差电离层延迟误差, 代入式(7)确定出一条

直线, 与之最接近的那条直线所对应的模糊度备选值即为正确的双差宽巷模糊度。第 2 种方法是, 将直线 B 作为基准, 根据 3 条直线对模糊度的约束能力进行宽巷模糊度搜索。对于当前历元的模糊度固定, 直线关系 B 是唯一确定的, 所以直线 B 对载波相位模糊度备选值的约束是确定不变的。而在 3 条直线中, 正确直线关系对双频模糊度的约束能力与直线 B 的约束能力是最相近的, 即在模糊度搜索空间中该直线与直线 B 的位置分布最紧凑。两相交直线的夹角在搜索空间中所包含的面积大小能够反映出两直线位置分布的紧凑程度, 面积越小, 二者的位置分布越紧凑。图中实线 I_1 与 B 的位置分布最紧凑, 即 I_1 所对应的模糊度备选值是正确的双差宽巷模糊度。由于宽巷模糊度具有长波长特性, 模糊度备选值还具有周期变化, 所以可以较为容易地寻找出正确的宽巷模糊度值。

3.1.3 宽巷模糊度的检验

对于任意两个以上的基准站所组成的闭合基线, 双差整周模糊度的代数和理论上为零。以基准站 A 、 B 和 C 为例, 则

$$\nabla\Delta N_{WAB}^{pq} + \nabla\Delta N_{WBC}^{pq} + \nabla\Delta N_{WCA}^{pq} = 0 \quad (14)$$

将闭合基线的双差宽巷模糊度带入式(14)进行检验, 如果满足该闭合条件则认为被检验的宽巷模糊度是正确的, 可用于双差载波相位模糊度的确定。

3.2 确定双差载波相位模糊度

利用双差宽巷电离层延迟可以得到双差载波相位电离层延迟误差的改正数。但宽巷观测值组合扩大了观测噪声, 而且计算出的双差电离层延迟包含了非弥散误差的残差。由于长距离基准站间误差相关性弱, 特别是在低高度角时, 双差非弥散误差的残差较大。所以, 双差载波相位电离层延迟误差改正数中的残差较大, 导致双差载波相位模糊度的计算误差大于模糊度的半个波长, 不能直接解算得到载波相位的模糊度。因此, 本文采用搜索方法对双差载波相位模糊度进行确定。宽巷模糊度固定之后, $L1$ 载波相位备选模糊度有唯一的 $L2$ 载波相位备选模糊度与之对应。利用固定的宽巷模糊度以及双频模糊度间的线性约束关系式(4)、式(7), 找出在 $\nabla\Delta N_{1AB}^{pq}$ 搜索范围内的模糊度备选值和相应的 $\nabla\Delta N_{2AB}^{pq}$ 的备选值即可组成载波相位模糊度的搜索空间。然后进行模糊度搜索, 并使用一种新的基准卫星选择方法。

3.2.1 基准卫星的选择

在进行双差观测值组合时,一般情况下都将高度角最高的卫星作为基准卫星。本文在确定载波相位模糊度时,采用一种新的基准卫星选取思想,以尽量减小对流层延迟误差残差的影响,保证载波相位模糊度固定的成功率,其理论依据及实现如下。

基准站的坐标已知而且基准站上一般都安装有气象仪器来观测温度、气压等气象参数,所以可通过对流层模型计算出对流层延迟。如果基准站A、B使用对流层模型计算出的天顶对流层延迟为 ZTD_A^0 、 ZTD_B^0 ;天顶对流层延迟的真值为 ZTD_A 、 ZTD_B 。测站A、B的投影函数分别为 $mf_A(p)$ 、 $mf_B(p)$ 、 $mf_A(q)$ 、 $mf_B(q)$,其中 p 为卫星号; q 为基准卫星。则双差对流层延迟的残差为

$$\Delta\nabla\xi_{D_{\text{trop}}} = (mf_A(p) - mf_A(q))\xi_{ZTD_A} - (mf_B(p) - mf_B(q))\xi_{ZTD_B} \quad (15)$$

式中, $\xi_{ZTD_A} = ZTD_A - ZTD_A^0$; $\xi_{ZTD_B} = ZTD_B - ZTD_B^0$ 。

在长距离基准站间,根据已知的气象参数,利用对流层模型可以改正大部分对流层延迟误差,但双差观测值中还存在对流层延迟残差的影响。当卫星与基准卫星的高度角相差大时,两颗卫星的投影函数差值就大,所以 $\Delta\nabla\xi_{D_{\text{trop}}}$ 值比较大。如果两颗卫星高度角比较接近,则投影函数差值小, $\Delta\nabla\xi_{D_{\text{trop}}}$ 值就比较小。因此,本文以高度角最接近的卫星作为基准卫星,按照卫星高度角从高到低依次解算载波相位模糊度,尽量减小对流层残差的影响。由3.1节中确定的宽巷模糊度,可以得到新双差卫星的宽巷模糊度,并选取双频载波相位模糊度的备选组合,用于载波相位模糊度的搜索。

3.2.2 双差载波相位模糊度的搜索

利用每个模糊度备选组合的非弥散误差残差对双差载波相位模糊度进行搜索,根据观测方程(1)、(2),得到双差非弥散误差的计算公式

$$\nabla\Delta T_{AB}^{pq} = \frac{cf_2}{f_2^2 - f_1^2} \nabla\Delta l - \nabla\Delta\rho_{AB}^{pq} \quad (16)$$

式中

$$\begin{aligned} \nabla\Delta l = & \nabla\Delta N_{2AB}^{pq} - \frac{f_1}{f_2} \nabla\Delta N_{1AB}^{pq} + \nabla\Delta\Phi_{2AB}^{pq} - \\ & \frac{f_1}{f_2} \nabla\Delta\Phi_{1AB}^{pq} + \nabla\Delta\omega_{AB}^{pq} \end{aligned} \quad (17)$$

上式中各符号与式(4)中相同。如果使用精度为0.5 m的精密预报轨道,对200 km的基线而言,双差轨道误差仅为5 mm,可以忽略。如果使用1.5~2 m左右精度的广播星历,对于100~200 km的长基线,也可以不考虑双差轨道误差的影响。

因此 $\nabla\Delta T_{AB}^{pq}$ 中主要是双差对流层延迟误差。将双频载波相位模糊度的备选组合带入式(16),求出相应的 $\nabla\Delta T_{AB}^{pq}$,与模型计算的结果 $\nabla\Delta T_{AB}^{pq}$ 比较得到残差 ξ ,如果有

$$\nabla\Delta T_{AB}^{pq} - \nabla\Delta T_{AB}^{pq} = \xi \quad |\xi| < \delta \quad (18)$$

式中, δ 为一限值,可根据式(15)由经验值得到。当残差 ξ 小于这一限值时认为该组模糊度备选组合为正确的双差载波相位模糊度。

3.2.3 双差载波相位模糊度的检验

与宽巷模糊度的检验相同,双频载波相位模糊度也满足基准站网的闭合关系,即有

$$\nabla\Delta N_{1AB}^{pq} + \nabla\Delta N_{1BC}^{pq} + \nabla\Delta N_{1CA}^{pq} = 0 \quad (19)$$

$$\nabla\Delta N_{2AB}^{pq} + \nabla\Delta N_{2BC}^{pq} + \nabla\Delta N_{2CA}^{pq} = 0 \quad (20)$$

将搜索出的载波相位模糊度带入上式进行检验,如果满足条件则认为是正确的。载波相位模糊度确定后,再将载波相位模糊度转换为同一颗基准卫星的双差模糊度,以便于进行基准站间的各种误差计算和流动站的误差改正。

4 算例与分析

本文使用2006-04-05在渤海湾采集的数据进行算法检验,取1 h的观测数据,截止高度角为 10° ,采样间隔1 s。利用式(4)进行模糊度固定不受电离层延迟的影响,而主要受对流层延迟影响。渤海湾地区水汽含量较高,对流层延迟的湿分量较大,对流层误差处理比较困难,因此采用该区域的观测数据进行算法检验。该试验数据采用3个基准站BASE1、BASE2、BASE3,基线信息如图2。

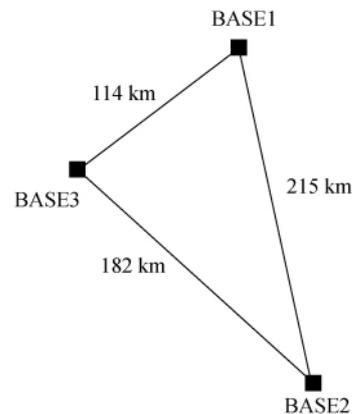


图2 基线信息

Fig. 2 Information of baselines

按照本文的方法进行双差宽巷模糊度解算,以PRN24(基准卫星PRN4)的第1个历元为例。

一般基准站都设在比较开阔的地方并且配置高质量的双频接收机,观测噪声相对较小,M-W 组合观测值适合用于双差宽巷模糊度初值的计算。按式(11)计算出双差宽巷模糊度的初值,然后给出宽巷模糊度的搜索范围。根据载波相位模糊度间的线性约束关系选出双差宽巷模糊度的备选值,如表 1 所示,3 条基线双差宽巷模糊度的真值分别为: -80、100、-20。线性约束关系对模糊度约束能力的强弱随非弥散误差残差的不同而变化,因此各基线模糊度备选值的变化周期并不一致。使用 3.1.2 节中的方法确定宽巷模糊度,由每个模糊度备选值确定出相应的直线方程。对于方法 1,各直线方程与伪距电离层延迟确定的直线方程间的距离,如表 1 中括号内第 1 项所示,单位为 m;第 2 项为方法 2 计算的各直线与直线 B 间夹角面积的大小,单位为周的平方。方法 1 或方法 2 都可以搜索出正确的宽巷模糊度,然后用式(14)检验确定出的双差宽巷模糊度。

表 1 PRN24-4 双差宽巷模糊度备选值

Tab.1 Wide-lane DD-Ambiguity candidates of PRN24-4

基线	双差宽巷模糊度备选值		
BASE1-BASE2	-82(-2.2/117.8)	-80(0.09/50.4)	-78(2.3/119.9)
BASE2-BASE3	98(-2.1/116.2)	100(0.14/50.3)	102(2.4/121.6)
BASE3-BASE1	-23(-3.1/182.1)	-20(0.23/51.2)	-17(3.6/228.4)

双差宽巷模糊度的固定是以高度角最高的 PRN4 为基准卫星,各卫星高度角变化如图 3 所示。以基线 BASE1-BASE2 第 1 个历元为例,按照高度角不同重新选择基准卫星后双差卫星为: 17-4,24-17、2-24、23-2、13-23,双差非弥散误差残差值的计算结果比较如图 4。

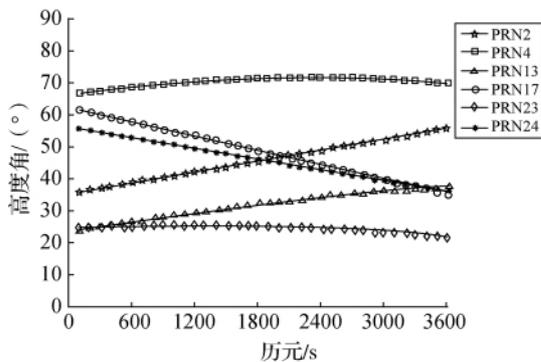


图 3 卫星高度角变化图

Fig.3 Changes of satellites elevation angle

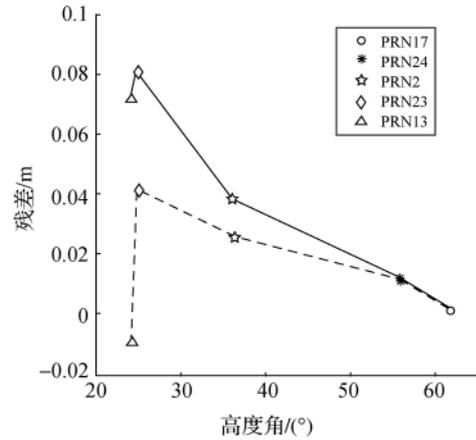


图 4 初始历元残差值

Fig.4 Residual at initial epoch

图 4 中上方黑色实线是以 PRN4 为基准卫星的双差非弥散误差残差值,下方的虚线为新双差卫星的非弥散误差残差值。从图中实线可以看出,非弥散误差的残差随着高度角的降低而增大。如果以高度角最接近的卫星为基准卫星,双差残差小于以 PRN4 为基准卫星的残差,特别是低高度角卫星,残差值明显减小。本文的方法确定载波相位模糊度受非弥散误差残差的影响较大,新的基准卫星选择思想可以减小残差的影响。利用式(16)、式(18)、式(19)可确定出载波相位模糊度,然后将其转化成以 PRN4 为基准卫星的双差模糊度,以便于进行基准站间的各种误差计算和流动站误差改正。以 PRN24 为例,基准卫星为 PRN4,模糊度固定以后计算出的双差非弥散误差残差值,及其与 PRN24 高度角的变化,如图 5、图 6、图 7 所示。

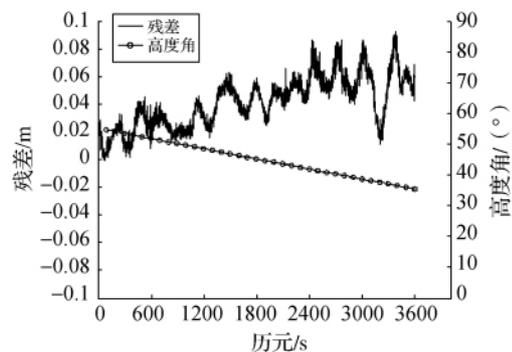


图 5 基线 BASE1-BASE2 PRN24-PRN4 的非弥散误差残差序列

Fig.5 Residual of non-dispersive error of PRN24-PRN4 on baseline BASE1-BASE2

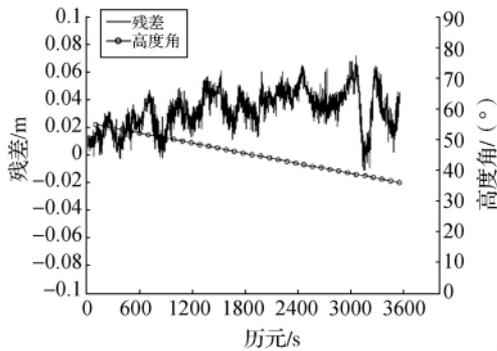


图6 基线 BASE3-BASE2 PRN24-PRN4 的非弥散误差残差序列

Fig. 6 Residual of non-dispersive error of PRN24-PRN4 on baseline BASE3-BASE2

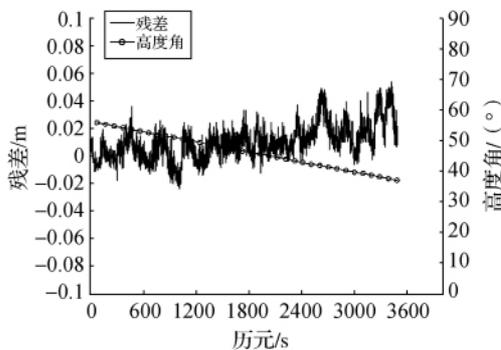


图7 基线 BASE1-BASE3 PRN24-PRN4 的非弥散误差残差序列

Fig. 7 Residual of non-dispersive error of PRN24-PRN4 on baseline BASE1-BASE3

5 结论

本文提出的方法充分利用基准站坐标已知且观测条件较好,载波相位模糊度间的多个线性约束关系,双差模糊度的整数特性等条件,实现了长距离网络 RTK 基准站间的整周模糊度单历元解算。利用载波相位模糊度间的线性关系能够有效地约束双差宽巷模糊度备选值,在此基础上,使用模糊度间的多个线性约束关系可以准确固定双差宽巷模糊度。根据高度角重新选择基准卫星,减小了非弥散误差残差对载波相位模糊度解算的影响。利用双差非弥散误差残差的计算结果对载波相位模糊度进行搜索,保证了载波相位模糊度解算的准确性。该方法不需要解方程组,各双差观测值之间相互独立,计算量小,模糊度的搜索速度快,大范围基准站网只需 1 个历元即可启动,并且实用性强,可靠性好。并能够对一定截止高度角

以上的低高度角卫星进行模糊度解算,新升起卫星的模糊度固定也只需要 1 个历元。随着观测时间的延长,还可以根据对流层延迟和电离层延迟的变化,对所确定的载波相位模糊度进行可靠性判断,进一步提高算法的稳定性。

参考文献:

- [1] LANDAU H, VOLLATH U, DEKING A, et al. Virtual Reference Station Networks-Recent Innovations by Trimble [C] // Proceedings of the Japan Institute of Navigation GPS Symposium. Tokyo: Japan Institute of Navigation, 2001: 39-52.
- [2] RIZOS C. Network RTK Research and Implementation: A Geodetic Perspective [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2002, 1(2): 144-150.
- [3] GAO Xingwei, LIU Jingnan, GE Maorong. An Ambiguity Searching Method for Network RTK Baselines between Base Stations at Single Epoch [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(4): 305-309. (高星伟, 刘经南, 葛茂荣. 网络 RTK 基准站间基线单历元模糊度搜索方法 [J]. 测绘学报, 2002, 31(4): 305-309.)
- [4] TANG Weiming, LIU Jingnan, SHI Chuang, et al. Three Steps Method to Determine Double Difference Ambiguities Resolution of Network RTK Reference Station [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(4): 305-308. (唐卫明, 刘经南, 施闯, 等. 三步法确定网络 RTK 基准站双差模糊度 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(4): 305-308.)
- [5] GAO Xingwei, CHEN Ruizhi, ZHAO Chunmei. A Network RTK Algorithm and Its Test [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(11): 1350-1353. (高星伟, 陈锐志, 赵春梅. 网络 RTK 算法研究与试验 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(11): 1350-1353.)
- [6] GAO Xingwei. The Algorithmic Research of GPS/GLO-NASS Network RTK and Its Program Realization [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002. (高星伟. GPS/GLO-NASS 网络 RTK 的算法研究与程序实现 [D]. 武汉: 武汉大学, 2002.)
- [7] TANG Weiming. Research on Techniques of Large Area and Long Range GNSS Network RTK and Developing Network Software [D]. Wuhan: Wuhan University, 2006. (唐卫明. 大范围长距离 GNSS 网络 RTK 技术研究及软件实现 [D]. 武汉: 武汉大学, 2006)
- [8] 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.
- [9] DONG D N, BOCK Y. Global Positioning System Network Analysis with Phase Ambiguity Resolution Applied to Crustal Deformation Studies in California [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(B4): 3949-3966.

- [10] BLEWITT G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(3): 199-202.
- [11] SUN H, CANNON M E, MILIGARD T. Real-time GPS Reference Network Carrier Phase Ambiguity Resolution [C] // ION NTM-99. San Diego: Institute of Navigation, 1999: 193-200.
- [12] HAN S W. Carrier Phase-based Long-range GPS Kinematic Positioning [D]. Sydney: The University of New South Wales, 1997.
- [13] CHEN H Y, RIZOS C, HAN S. An Instantaneous Ambiguity Resolution Procedure Suitable for Medium-scale GPS Reference Station Networks [J]. Survey Review, 2004, 37(291): 396-410.
- [14] DAI L, WANG J, RIZOS C, et al. Predicting Atmospheric Biases for Real-time Ambiguity Resolution in GPS/GLONASS Reference Station Networks [J]. Journal of Geodesy, 2003, 76(11-12): 617-628.
- [15] HU G, ABBEY D A, CASTLEDEM N. An Approach for Instantaneous Ambiguity Resolution for Medium-to Long-range Multiple Reference Station Networks [J]. GPS Solutions, 2005(9): 1-11.
- [16] GE Maorong, LIU Jingnan. The Estimation Methods for Tropospheric Delays in Global Positioning System [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1996, 25(4): 285-291. (葛茂荣, 刘经南. GPS 定位中对流层折射估计研究 [J]. 测绘学报, 1996, 25(4): 285-291.)
- [17] GAO Xingwei, CHEN Ruizhi, LI Xiyin. A Study of the Neutral Atmospheric Effects on Pseudorange Positioning with Non-difference Models [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(2): 134-140. (高星伟, 陈锐志, 李夕银. 中性大气对非差伪距定位的影响及其模型改正分析 [J]. 测绘学报, 2007, 36(2): 134-140.)
- [18] HOPFIELD H S. Two-quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data [J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(18): 4487-4499.
- [19] SAASTAMOINEN J. Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction [J]. Bulletin Géodésique, 1973, 107: 13-34.
- [20] BLACK H D. An Easily Implemented Algorithm for the Tropospheric Range Correction [J]. Journal of Geophysical Research, 1978, 83(B4): 1825-1828.

(责任编辑: 宋启凡)

收稿日期: 2011-07-18

修回日期: 2011-10-25

第一作者简介: 祝会忠(1983—), 男, 博士生, 主要从事 GNSS 高精度实时动态定位算法及应用研究。

First author: ZHU Huizhong(1983—), male, PhD candidate, majors in algorithm and application of GNSS for high-accuracy dynamic positioning.

E-mail: zhuhuizhong@whu.edu.cn

(上接第 352 页)

- Observation of Absolute Gravimeters in Walferdange [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(3): 77-79. (邢乐林, 申重阳, 李辉, 等. 欧洲 Walferdange 绝对重力仪比对观测 [J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(3): 77-79.)
- [21] WANG Linsong, CHEN Chao, WANG Tongqing, et al. Analysis of Measuring Accuracy in Field with A-10 Absolute Gravimeters [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(1): 60-63. (王林松, 陈超, 王同庆, 等. A-10 绝对重力仪野外测量精度分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(1): 60-63.)
- [22] NIEBAUER T M. The Effective Measurement Height of Free-fall Absolute Gravimeters [J]. Metrologia, 1989, 26(2): 115-118.
- [23] TIMMEN L. Precise Definition of the Effective Measurement Height of Free-fall Absolute Gravimeters [J]. Metrologia, 2003, 40(2): 62-65.
- [24] Micro-g LaCoste Inc. FG5 Absolute Gravimeter User's Manual [R]. Colorado: Micro-g LaCoste Inc, 2007
- [25] Micro-g LaCoste Inc. Absolute Gravimeters [EB/OL]. Colorado: Micro-g LaCoste Inc, [2011-10-12]. <http://www.microglacoste.com/absolutemeters.php>.

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2011-12-09

修回日期: 2012-02-23

第一作者简介: 王林松(1983—), 男, 博士生, 研究方向为重磁资料处理解释、时变重力及其应用。

First author: WANG Linsong(1983—), male, PhD candidate, majors in gravity and magnetic data processing and interpretation, time-varying gravity and its application.

E-mail: wanglinsong123@yahoo.cn