

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 一种北斗非差非组合长距离基准站模糊度解算方法
作者: 李博, 程鹏飞, 秘金钟, 徐彦田, 祝会忠, 高猛, 谷守周
DOI: 10.13203/j.whugis20200555
收稿日期: 2020-10-16
网络首发日期: 2021-05-07
引用格式: 李博, 程鹏飞, 秘金钟, 徐彦田, 祝会忠, 高猛, 谷守周. 一种北斗非差非组合长距离基准站模糊度解算方法. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20200555>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20200555

一种北斗非差非组合长距离基准站模糊度解算方法

李博^{1,2} 程鹏飞² 秘金钟² 徐彦田² 祝会忠¹ 高猛¹ 谷守周²

1 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁阜新, 123000

2 中国测绘科学研究院, 北京, 100830

摘要：提出了一种非差非组合的北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System, BDS）长距离基准站间整周模糊度解算方法。首先直接利用不同频率的观测值建立误差观测方程，并采用随机游走策略估计相对天顶对流层湿延迟误差和电离层延迟误差，增加历元间的约束。然后使用一种非差整周模糊度实时线性计算方法，依次得到基准站网当前历元所有卫星的非差整周模糊度，解决了在基准站变换时，模糊度需要承接或者重新进行法方程叠加的问题。由于充分利用了各频率观测值信息，避免了线性组合放大噪声对整周模糊度固定的影响，非组合方法的模糊度固定成功率与无电离层组合法相比有较大的提高。最后使用实测数据进行算法验证，结果表明，各基准站模糊度平均固定速度为20个历元，可快速实现基准站载波相位整周模糊度解算。

关键词：BDS；非差非组合；整周模糊度；对流层延迟误差；电离层延迟误差
中图分类号：P228 **文献标志码：**A

在北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System, BDS）高精度定位服务中，BDS网络RTK（Real-time Kinematic, RTK）方法扮演着重要角色^[1]。其基本方法是首先确定基准站的整周模糊度，得到高精度的误差改正数，然后利用改正数改正流动站的观测值误差，进而确定流动站的模糊度，最终获得流动站高精度的定位结果^[2]。因此，基准站载波相位整周模糊度的准确固定是BDS网络RTK高精度定位的核心问题^[3-5]。

近年来，国内外学者对网络RTK基准站间模糊度固定进行了大量研究，取得了丰硕成果^[4-17]。传统基准站间模糊度解算是先固定宽巷模糊度，然后求解窄巷浮点模糊度，通过LAMBDA（Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment）方法固定L1频率整周模糊度^[7-9]。为了快速固定宽巷模糊度和提高ratio值，在模糊度域内对原始模糊度进行整数变换，对转换后的模糊度分块序贯固定^[10]。对于单历元基准站间整周模糊度固定，采用一种网络RTK基准站间单历元模糊

收稿日期：2020-10-16

第一作者：李博，博士生，研究方向为高精度GNSS定位算法与研究。15841890320@163.com

基金项目：中国测绘科学研究院基本科研业务费（AR1903）；国家重点研发计划（2016YFB0501405）。

度搜索方法,避免对周跳进行探测和修复,可快速实现基准站间单历元模糊度固定^[5]。文献[11]利用伪距码偏差改正模型,分析了 BDS 伪距码偏差对不同长度基线解算的影响。BDS 和其它导航系统组合时,需要统一时空基准,且根据观测值精度不同,给予不同的权重。文献[12]采用无电离层模型对不同卫星系统组合的网络 RTK 定位精度进行了分析。对于多频观测值,经典的 TCAR (Three Carrier Ambiguity Resolution) 方法是按照模糊度固定的难度,依次固定超宽巷、宽巷和窄巷模糊度。为了综合利用所有卫星的观测值信息,基于有几何模型,使用 LAMBDA 方法进行逐级模糊度固定,依次对超宽巷、宽巷、窄巷模糊度进行固定^[4,13,14]。上述模糊度固定方法都是针对双差模型处理的,为了将区域网络 RTK 和全球 PPP (Precise Point Positioning) 无缝集成到定位服务中,提出的非差网络 RTK 可以为流动站用户提供堪比标准网络 RTK 的实时精确定位服务^[2,17]。相较于标准网络 RTK,基于非差观测模型的基准站间区域误差改正方法克服了基于不同子网的同一双差误差改正数不一致的问题;各基准站有独立的改正数,使得网络播发和接收更加方便。

以上文献表明,在高精度定位中,对于模糊度的求解,大部分学者多采用各频率之间的线性组合来获得组合观测值,用于削弱或消除一些误差的影响,例如无电离层组合消除了一阶电离层延迟误差的影响;或者采用逐级模糊度固定策略,先固定超宽项模糊度,再固定宽巷模糊度,最后固定窄巷模糊度。因此本文研究了一种非差非组合基准站间整周模糊度固定方法。直接利用各观测量信息组建观测方程,并对残余的误差当作参数进行历元间随机游走估计。同时,根据双差与非差整周模糊度线性关系,计算基准站当前历元所有卫星的非差整周模糊度。利用固定的基准站模糊度计算高精度的区域误差改正数,并建立区域误差改正模型,改正流动站观测误差,实现流动站整周模糊度和位置参数解算。最后使用实测 CORS 网数据进行实验分析。

1 BDS 非差非组合基准站间整周模糊度解算

1.1 基准站非差和双差模糊度间的转换关系

基准站网中由双差整周模糊度转化为非差整周模糊度一般利用转换矩阵进行,但当基准站数量增加时,导致矩阵维数急剧增长,使得转换矩阵出现秩亏的情况。基于此,本文使用一种基准站网间非差整周模糊度实时快速计算方法。该方法利用双差整周模糊度、基准站和基准星的非差模糊度,通过线性计算得到基准站网当前历元所有的非差模糊度。对于 BDS 网络 RTK 基准站整周模糊度解算,卫星 p , q 在基准站 A、B、C 上的 B1 频率双差载波相位整周模糊度为:

$$\begin{cases} \Delta \nabla N_{1,AB}^{pq} = N_{1,A}^p - N_{1,B}^p - (N_{1,A}^q - N_{1,B}^q) \\ \Delta \nabla N_{1,BC}^{pq} = N_{1,B}^p - N_{1,C}^p - (N_{1,B}^q - N_{1,C}^q) \\ \Delta \nabla N_{1,CA}^{pq} = N_{1,C}^p - N_{1,A}^p - (N_{1,C}^q - N_{1,A}^q) \end{cases} \quad (1)$$

值得注意的是：公式中只有两个线性独立的双差整周模糊度。

1.2 BDS 非差非组合定位观测方程

1.2.1 非组合双差模糊度解算

假设基准站 A、B、C 共同观测 n 颗卫星，以基准站 A、B 及卫星 p 、 q 为例，选择基准站 A 和卫星 p 为基准（为表述方便， p 为 1 号卫星）。对于误差处理，为了消除或削弱与卫星端和接收机端的误差影响，可以进行双差处理。双差消除了卫星钟差、接收机钟差，同时也削弱了电离层延迟、对流层延迟等误差。因此可组成 $(n-1)$ 个载波相位观测方程：

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{M}_{w,B}^i & \mathbf{E} & \mathbf{B}_1 & \mathbf{0} \\ \Delta \mathbf{M}_{w,B}^i & \mathbf{Q} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{RZTD}_{w,AB} \\ \Delta \nabla I_1^i \\ N_1^i \\ N_2^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \nabla L_1^i \\ \Delta \nabla L_2^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， $\Delta \mathbf{M}_{w,B}^i = [\Delta M_{w,B}^1 \quad \Delta M_{w,B}^2 \quad \dots \quad \Delta M_{w,B}^n]^T$ ， $\Delta \nabla I_1^i = [\Delta \nabla I_1^1 \quad \Delta \nabla I_1^2 \quad \dots \quad \Delta \nabla I_1^n]^T$ ，

$N_m^i = [N_m^1 \quad N_m^2 \quad \dots \quad N_m^n]^T$ ， $\Delta \nabla L_m^i = [\Delta \nabla L_m^1 \quad \Delta \nabla L_m^2 \quad \dots \quad \Delta \nabla L_m^n]^T$ ， $\Delta \nabla L_m^i = [\lambda \Delta \nabla \phi \quad -\Delta \nabla \rho \quad -\Delta \nabla T]^T$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{(n-1) \times (n-1)} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\lambda_m & \lambda_m & 0 & \dots & 0 \\ -\lambda_m & 0 & \lambda_m & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\lambda_m & 0 & 0 & 0 & \lambda_m \end{bmatrix}_{(n-1) \times n} \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} f_1^2/f_2^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & f_1^2/f_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & f_1^2/f_2^2 \end{bmatrix}_{(n-1) \times (n-1)}$$

式中， $\Delta \nabla$ 为双差操作符， m 为频率编号； $\Delta \mathbf{M}_{w,B}^i$ 为测站 B 的星间投影函数之差； \mathbf{E} 为单位矩阵； $\mathbf{RZTD}_{w,AB}$ 为两测站间的相对天顶对流层湿分量延迟误差； T_d 为干分量延迟误差； I_1 表示 B1 频率的电离层延迟误差； λ 为载波相位的波长； N 为整周模糊度； ρ 为站星间几何距离； ϕ 为载波相位观测值。

1.2.2 双差模糊度转换为非差模糊度

非差和双差模糊度的转换公式(1)中只有两个线性独立的双差整周模糊度，为了快速得到基准站网中所有的非差整周模糊度，可以定义非差基准模糊度。以基准站 A、B、C、流动站 U 及卫星 p 、 q 为例，同样选择基准站 A 和卫星 p 为基准。与基准站 A 和卫星 p 有关的非差基准模糊度如何怎么确定？

一方面假定基准站 A 的 p 卫星的真实非差模糊度为 $N_{A,1}^p$ ，一般真实非差模糊度不能确定，结合非差基准模糊度可表示为：

$$N_{A,1}^p = \bar{N}_{A,1}^p + a \quad (3)$$

同理，与基准星 p 有关的基准站 B、C 和基准站 A 的 q 卫星的真实非差模糊度可表示为：

$$\begin{cases} N_{A,1}^q = \bar{N}_{A,1}^q + b \\ N_{B,1}^p = \bar{N}_{B,1}^p + c \\ N_{C,1}^p = \bar{N}_{C,1}^p + d \end{cases} \quad (4)$$

式中， a 、 b 、 c 、 d 为非差基准模糊度， $\bar{N}_{r,1}^s$ 为根据伪距计算的初始非差模糊度， r 表示基准站 A、B、C； s 表示卫星 p 、 q 。由式 (3)、式 (4) 和式 (1) 可得 $N_{B,1}^q$ 、 $N_{C,1}^q$ 的非差模糊度：

$$\begin{cases} N_{B,1}^q = \bar{N}_{B,1}^q + (-a+b+c) \\ N_{C,1}^q = \bar{N}_{C,1}^q + (-a+b+d) \end{cases} \quad (5)$$

另一方面在非差模糊度确定的情况下，以米为单位的非差误差改正数为：

$$Cor_{A,1}^p = OMC_{A,1}^p + \lambda_1 \cdot N_{A,1}^p = I_{A,1}^p + T_A^p - c \cdot t^p + c \cdot t_A + \varepsilon_{A,1}^p \quad (6)$$

式中， $OMC_{A,1}^p = L_{A,1}^p - \rho_A^p$ ，为观测值与计算值之差。

同理，可得到基准站 A、B、C 上卫星 p 、 q 的 B1 载波相位观测值的非差误差改正数，并通过内插系数 h_A 、 h_B 、 h_C 拟合出流动站上卫星 p 、 q 的 B1 载波相位观测值的误差改正数：

$$\begin{bmatrix} Cor_{U,1}^p \\ Cor_{U,1}^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cor_{A,1}^p & Cor_{B,1}^p & Cor_{C,1}^p \\ Cor_{A,1}^q & Cor_{B,1}^q & Cor_{C,1}^q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_A \\ h_B \\ h_C \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式 (3)、式 (4) 和式 (7) 可得流动站卫星 p 的非差误差改正数：

$$\begin{aligned} Cor_{U,1}^p &= Cor_{A,1}^p \cdot h_A + Cor_{B,1}^p \cdot h_B + Cor_{C,1}^p \cdot h_C \\ &= (OMC_{A,1}^p + \lambda_1 \cdot \bar{N}_{A,1}^p + a\lambda_1) \cdot h_A + (OMC_{B,1}^p + \lambda_1 \cdot \bar{N}_{B,1}^p + c\lambda_1) \cdot h_B \\ &\quad + (OMC_{C,1}^p + \lambda_1 \cdot \bar{N}_{C,1}^p + d\lambda_1) \cdot h_C \end{aligned} \quad (8)$$

令： $\bar{Cor}_{r,1}^p = OMC_{r,1}^p + \lambda_1 \cdot \bar{N}_{r,1}^p$ ，则式 (8) 可简化为：

$$Cor_{U,1}^p = \bar{Cor}_{A,1}^p \cdot h_A + \bar{Cor}_{B,1}^p \cdot h_B + \bar{Cor}_{C,1}^p \cdot h_C + (ah_A + ch_B + dh_C)\lambda_1 \quad (9)$$

类似式 (9) 可得流动站卫星 q 的非差误差改正数：

$$Cor_{U,1}^q = \bar{Cor}_{A,1}^q \cdot h_A + \bar{Cor}_{B,1}^q \cdot h_B + \bar{Cor}_{C,1}^q \cdot h_C + [bh_A + (-a+b+c)h_B + (-a+b+d)h_C]\lambda_1 \quad (10)$$

流动站卫星 p 、 q 的星间单差误差改正数由式 (9) 与式 (10) 相减得:

$$\begin{aligned} Cor_{U,1}^p - Cor_{U,1}^q &= (\bar{Cor}_{A,1}^p - \bar{Cor}_{A,1}^q) \cdot h_A + (\bar{Cor}_{B,1}^p - \bar{Cor}_{B,1}^q) \cdot h_B + (\bar{Cor}_{C,1}^p - \bar{Cor}_{C,1}^q) \cdot h_C \\ &\quad + [(a-b)h_A + (a-b)h_B + (a-b)h_C] \lambda_1 \\ &= \bar{Cor}_{A,1}^{p,q} \cdot h_A + \bar{Cor}_{B,1}^{p,q} \cdot h_B + \bar{Cor}_{C,1}^{p,q} \cdot h_C + (a-b)(h_A + h_B + h_C) \lambda_1 \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $(h_A + h_B + h_C)$ 和为 1。可见, 当定义非差基准模糊度时, 对流动站星间单差误差的影响只有 $(a-b)$ 周, 该影响会被流动站星间单差的模糊度吸收掉, 即基准站非差基准模糊度产生的影响不会破坏流动站星间单差模糊度的整周特性。综上所述, 定义基准站 A 和卫星 p 为基准, 即与基准站 A 和卫星 p 有关的非差基准模糊度可以选取任意整数, 不会影响模型对构建结果的有效性, 本文取初始非差模糊度 $\bar{N}_{r,1}^s$ 的相反数, 即:

$$\begin{cases} a = -\bar{N}_{A,1}^p \\ b = -\bar{N}_{A,1}^q \\ c = -\bar{N}_{B,1}^p \\ d = -\bar{N}_{C,1}^p \end{cases} \quad (12)$$

则式 (1) 进一步表示为:

$$\begin{cases} N_{1,B}^q = \Delta \nabla N_{1,AB}^{pq} = \Delta N_{1,AB}^p - \Delta N_{1,AB}^q \\ N_{1,C}^q = \Delta \nabla N_{1,BC}^{pq} + N_{1,B}^q \\ \quad = -\Delta \nabla N_{1,CA}^{pq} = -(\Delta N_{1,CA}^p - \Delta N_{1,CA}^q) \end{cases} \quad (13)$$

结合与基准站 A 和基准星 p 有关的非差基准模糊度可知, 式 (2) 中的 N_m 实际上是基准站 B 的非差模糊度的相反数, 值得注意的是, 其中包含基准星 p 的非差模糊度, 因此式 (2) 变化为:

$$\begin{bmatrix} \Delta M_{w,B}^i & E & B_1 & 0 \\ \Delta M_{w,B}^i & Q & 0 & B_2 \\ 0 & 0 & e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} RZTD_{w,AB} \\ \Delta \nabla I_1^i \\ N_1^i \\ N_2^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \nabla L_1^i \\ \Delta \nabla L_2^i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, $e = [1 \ 0 \ \dots \ 0]_{n \times 1}^T$

式中符号同式 (2)。同理, 基准站 B、C 和基准站 C、A 的非差模糊度解算过程同上。对于任意 2 个以上的基准站所组成的闭合网, 相同卫星的非差载波相位整周模糊度的代数和应为零。

非差基准站模糊度解算模型实际上就是先定义一个非差基准, 即非差基准站和非差基准星, 其值可以选取任意整数, 在保证模糊度整周特性下, 将非差基准模糊度映射给其他基准站的非差模糊度, 使模型简单化, 可快速固定整周模糊度。

非组合在充分利用所有观测信息的情况下，避免了线性组合放大的噪声，也避免了分步解算的繁琐，对程序计算冗余度有很大的提高。

1.3 误差处理

随着基准站间距离增加，观测模型经过双差处理后仍有较大的残差，尤其以电离层延迟和对流层延迟误差为主的残差影响整周模糊度的固定。

1.3.1 对流层延迟误差

对流层延迟误差估计只引入一个相对天顶对流层延迟参数，减少了待估参数，解决了法方程的病态问题^[4]。为了更好的描述对流层延迟随时间的变化，该参数需要在每隔一定时间引入一次，使参数估计过程变的复杂。根据对水蒸气辐射仪观测的湿分量折射量的分析发现，一阶高斯马尔可夫随机游走过程可以很好地描述天顶方向的湿分量 d ，其离散形式为：

$$\begin{cases} d_{i+1} = e^{-\Delta t/\tau_d} d_i + \tilde{W}_i \\ \tilde{W}_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (e^{-\Delta t/\tau_d} \cdot W_\tau) d\tau \\ \sigma_{\tilde{W}_i}^2 = \tau_d \sigma_W^2 (1 - e^{-2\Delta t/\tau_d}) / 2 \end{cases} \quad (15)$$

式中， τ_d 为随机游走的相关时间，通常取 $\tau_d \rightarrow \infty$ 表示随机游走过程； W_i 是方差为 $\sigma_{W_i}^2$ 的零均值高斯白噪声， σ_W^2 是连续过程的方差，可以预先给定，一般取 $3\text{mm}^2/\text{h} \sim 5\text{mm}^2/\text{h}$ 。所以式（15）可简化为：

$$\begin{cases} d_{i+1} = d_i + \tilde{W}_i \\ \sigma_{\tilde{W}_i}^2 = \Delta t \cdot \sigma_W^2 \end{cases} \quad (16)$$

式中， Δt 为历元间间隔。在最小二乘估计器中，本文给出了随机游走过程的具体实现方式。历元间相关随机过程的观测方程由式（16）表示为：

$$v_d = d_{i+1} - d_i, P_d \quad (17)$$

式中， P_d 为随机过程约束。则式（17）的法方程为：

$$\begin{bmatrix} P_d & -P_d \\ -P_d & P_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_i \\ d_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

1.3.2 电离层延迟误差

由于网路 RTK 基准站间距较远，其电离层延迟误差的相关性降低，差分后的残余误差仍然很大，一般将其作为参数进行估计。为了不使法方程病态，通过伪距观测值计算出每颗新增卫星的双差电离层延迟误差的初

值，在估计过程中，电离层延迟误差参数不进行法方程的叠加。下一个历元保留的卫星电离层延迟误差初值使用上个历元由整周模糊度计算的电离层延迟误差。与对流层延迟误差处理一样，电离层延迟误差参数历元间采用随机游走过程进行约束， $\sigma_w^2(\Delta t)$ 根据经纬度与采样间隔进行调整，调整后的方差 $\sigma_w^2(\Delta t)$ 为：

$$\sigma_w^2(\Delta t) = \begin{cases} C_s - C_s \left\{ (3/2)(\Delta t / 7200) - (1/2)(\Delta t / 7200)^3 \right\} & \Delta t < 7200 \\ 0 & \Delta t \geq 7200 \end{cases} \quad (19)$$

式中， Δt 为采样间隔； C_s 为与经度 B 有关的参数，计算公式如下：

$$C_s(B) = \begin{cases} 0.042 & |B| < 5^\circ \\ 0.0055 + 0.07 \exp(-0.12|B|) & 5^\circ \leq |B| < 50^\circ \\ 0.0055 & 50^\circ \leq |B| \end{cases} \quad (20)$$

根据此公式确定的电离层历元间随机游走方差综合考虑了经纬度与采样间隔的影响，对不同历元之间的电离层进行约束，估计的电离层延迟精度也会更高。

1.4 模糊度可靠性检验

1) 在模糊度解算之后，为进一步证明模糊度固定的准确性，使用无电离层组合计算每颗卫星与频率无关的双差非色散延迟误差，其中主要指双差对流层延迟误差。仍以基准站 A、B 及卫星 p 、 q 为例，双差无电离层组合表示为：

$$\lambda_{LC} \cdot \Delta \nabla \phi_{LCAB}^{pq} = \Delta \nabla \rho_{AB}^{pq} - \left(\frac{cf_1}{f_1^2 - f_2^2} \Delta \nabla N_{1AB}^{pq} - \frac{cf_2}{f_1^2 - f_2^2} \Delta \nabla N_{2AB}^{pq} \right) + \Delta \nabla O_{AB}^{pq} + \Delta \nabla T_{AB}^{pq} + \Delta \nabla \varepsilon_{LC} \quad (21)$$

式中， $\lambda_{LC} = c/f_1$ 为无电离层组合波长。与频率无关的非色散性误差记为 $\Delta \nabla B_{AB}^{pq}$ ，则有：

$$\begin{aligned} \Delta \nabla B_{AB}^{pq} &= \Delta \nabla T_{AB}^{pq} + \Delta \nabla O_{AB}^{pq} \\ &= \lambda_{LC} \cdot \Delta \nabla \phi_{LCAB}^{pq} - \Delta \nabla \rho_{AB}^{pq} + \left(\frac{cf_1}{f_1^2 - f_2^2} \Delta \nabla N_{1AB}^{pq} - \frac{cf_2}{f_1^2 - f_2^2} \Delta \nabla N_{2AB}^{pq} \right) - \Delta \nabla \varepsilon_{LC} \end{aligned} \quad (22)$$

2) 同对流层一样，在模糊度解算之后，计算每颗卫星的双差电离层延迟误差可进一步证明模糊度固定的准确性。双差载波相位观测方程可表示为：

$$\lambda_1 \cdot \Delta \nabla \phi_{1AB}^{pq} = \Delta \nabla \rho_{AB}^{pq} - \lambda_1 \cdot \Delta \nabla N_{1AB}^{pq} + q_1 \cdot \Delta \nabla I_{1AB}^{pq} + \Delta \nabla O_{AB}^{pq} + \Delta \nabla T_{AB}^{pq} + \Delta \nabla \varepsilon_{\phi_1} \quad (23)$$

$$\lambda_2 \cdot \Delta \nabla \phi_{2AB}^{pq} = \Delta \nabla \rho_{AB}^{pq} - \lambda_2 \cdot \Delta \nabla N_{2AB}^{pq} + q_2 \cdot \Delta \nabla I_{1AB}^{pq} + \Delta \nabla O_{AB}^{pq} + \Delta \nabla T_{AB}^{pq} + \Delta \nabla \varepsilon_{\phi_2} \quad (24)$$

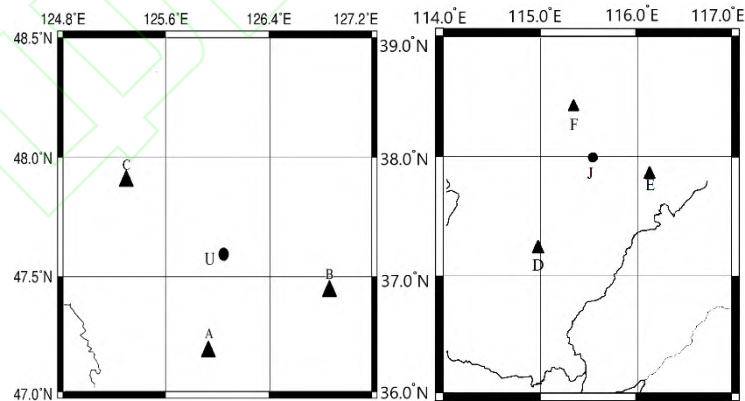
式 (23) 与式 (24) 相减可消除非色散性延迟误差的影响, 可得双差电离层延迟误差:

$$\Delta \nabla I_{1AB}^{pq} = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} (\lambda_1 \cdot \Delta \nabla \phi_{1AB}^{pq} - \lambda_2 \cdot \Delta \nabla \phi_{2AB}^{pq} + \lambda_1 \cdot \Delta \nabla N_{1AB}^{pq} - \lambda_2 \cdot \Delta \nabla N_{2AB}^{pq} + \Delta \nabla \varepsilon_\phi) \quad (25)$$

由式 (22) 和式 (25) 可知, 当整周模糊度固定正确, 且没有发生剧烈电离层突变时, 计算的基准站间单历元双差非色散性误差和电离层延迟误差会在合理的范围内进行有规律的变化, 相邻历元间的值不会出现突然的增大或减小, 所以对比分析单历元的双差非色散性误差和电离层延迟误差, 可对整周模糊度固定的正确性和可靠性进行判断。

2 实验分析

本文使用两组不同地区实测数据进行算法实验。实验一为东北地区的观测数据, 观测时段为 2019 年 4 月 1 日 UTC 时 0:00—24:00, 采样间隔为 1s。共有 3 个基准站和 1 个流动站, 测站分布如图 1 所示, StationA 到 StationB 距离 77km, StationB 到 StationC 距离 130km, StationC 到 StationA 距离 92km。实验二为华北地区的观测数据, 观测时段为 2018 年 8 月 27 日 UTC 时 0:00-24:00, 采样间隔为 1 s。测站分布如图 1 所示, StationD 到 StationE 距离 125 km, StationE 到 StationF 距离 95 km, StationF 到 StationD 距离 134 km。卫星截止高度角都为 15° , 首先对所观测数据进行数据预处理, 得到一组干净的数据, 然后进行基准站非差非组合模糊度解算。



实验 1 实验 2

图 1 测站分布

Fig.1 Stations distribution

2.1 非差整周模糊度计算

本节分析了基准站的非差整周模糊度计算, 以东北地区实验数据为例, 由于 24h 的观测时间较长, 所选择的基准星变化频繁, 限于篇幅, 只给出

BDS 基准星较长的观测弧段，即观测时长 5.6 h 的连续弧段，其非差基准星为 C07。连续弧段内三个基准站的非组合整周模糊度如表 1 所示。

表 1 基准站的非组合整周模糊度

Tab.1 Uncombined integer ambiguity of reference stations

| PRN | StationA_StationB | | StationB_StationC | | StationC_StationA | | 同一频率整周模糊度代数和 |
|-----|-------------------|-----|-------------------|----|-------------------|----|--------------|
| | B1 | B2 | B1 | B2 | B1 | B2 | |
| C07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C01 | -150 | -42 | 46 | 35 | 104 | 7 | 0 |
| C03 | -32 | -34 | 152 | 29 | -120 | 5 | 0 |
| C04 | -61 | -30 | 7 | 13 | 54 | 17 | 0 |
| C06 | 0 | -12 | -6 | 16 | 6 | -4 | 0 |
| C09 | -10 | -17 | 7 | 19 | 3 | -2 | 0 |
| C10 | -13 | -15 | 16 | 16 | -3 | -1 | 0 |

从表 1 可以得出，三个闭合基准站的相同卫星的整周模糊度代数和为零。如前所述，与定义的基准站和基准星相关的非差模糊度为 0，该弧段的基准站为测站 A，基准星为 C07。以卫星 C01 为例，根据式 (13) 可得各基准站的非差模糊度。StationB 和 StationC 基准站上 C01 卫星的 B1 频率的非差整周模糊度分别为： $N_{l,B}^1 = 0 - (-150)$ 和 $N_{l,C}^1 = -(0 - 104)$ 。其余卫星的非差整周模糊度计算过程同上，结果如表 2 所示。

表 2 基准站的非差非组合整周模糊度

Tab.2 Undifferenced and Uncombined integer ambiguity of reference stations

| PRN | StationA | | StationB | | StationC | |
|-----|----------|----|----------|----|----------|----|
| | B1 | B2 | B1 | B2 | B1 | B2 |
| C07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C01 | 0 | 0 | 150 | 42 | 104 | 7 |
| C03 | 0 | 0 | 32 | 34 | -120 | 5 |
| C04 | 0 | 0 | 61 | 30 | 54 | 17 |
| C06 | 0 | 0 | 0 | 12 | 6 | -4 |
| C09 | 0 | 0 | 10 | 17 | 3 | -2 |
| C10 | 0 | 0 | 13 | 15 | -3 | -1 |

2.2 整周模糊度固定的正确性和可靠性判断

为了对整周模糊度固定的正确性和可靠性进行判断，仍以东北地区实验数据为例。图 2 至图 7 分别给出了观测时长 5.6 h 连续弧段的 BDSGEO、IGSO、MEO 三类卫星，B1 频率各基准站间单历元的双差电离层延迟误差、卫星高度角和电离层穿刺点经纬度差值。

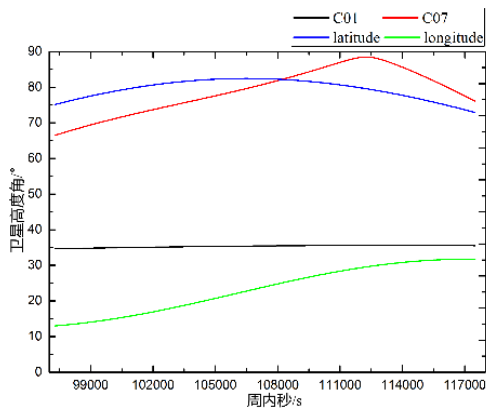


图 2 C01-C07 高度角和穿刺点的经纬度差值

Fig.2 The elevations and IPP longitude and latitude difference of C01-C07

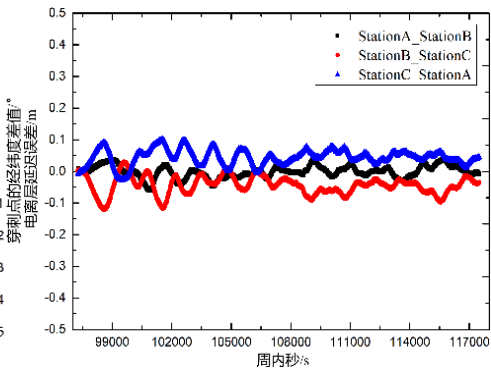


图 3 C01-C07 双差电离层延迟误差

Fig.3 Double difference ionospheric delay error of C01-C07

由于 C01 是 GEO 卫星，属于高轨道卫星，其相对于基准站运行角速度几乎为零，所以 C01 卫星的高度角变化较平缓，电离层穿刺点变化较小；C07 卫星是 IGSO 卫星，相对于 C01 卫星，其高度角变化稍大，所以 C01-C07 卫星的电离层穿刺点经纬度差值变化取决于 C07 卫星。双差电离层延迟误差与卫星高度角、以及卫星的电离层穿刺点的空间位置有关，即双差电离层延迟误差与卫星高度角成反比，与卫星电离层穿刺点经纬度差值的绝对值成正比。该弧段为凌晨 3 点到上午 9 点，卫星的电离层穿刺点经纬度差值变化范围不超过 3° ，其高度角平均相差 43° ，所以高度角较电离层穿刺点经纬度差值对双差电离层延迟误差的影响要大。

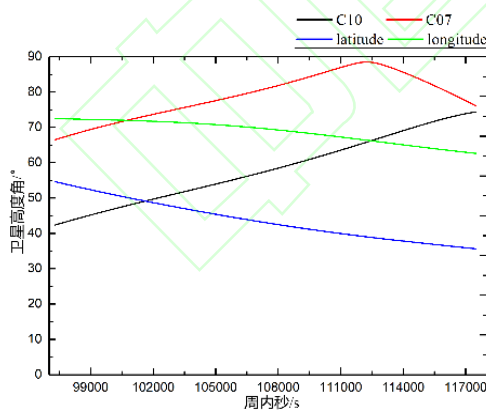


图 4 C10-C07 高度角和穿刺点的经纬度差值

Fig.4 The elevations and IPP longitude and latitude difference of C10-C07

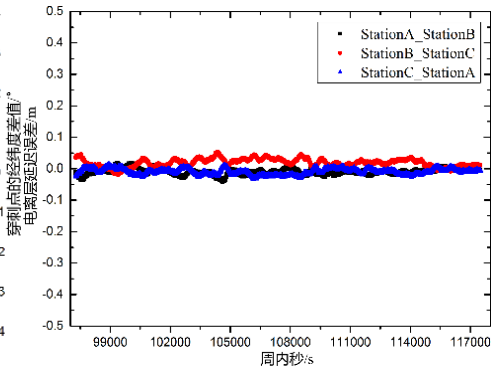


图 5 C10-C07 双差电离层延迟误差

Fig.5 Double difference ionospheric delay error of C10-C07

由于 C10 和 C07 都是 IGSO 卫星，不管是高度角，还是电离层穿刺点经纬度差值变化率相似。卫星的电离层穿刺点经纬度差值变化范围不超过 2° ，其高度角平均相差 20° ，较 C01-C07 卫星的高度角缩小了一倍，所以

其双差电离层延迟误差较 C01-C07 卫星的要趋于平稳。

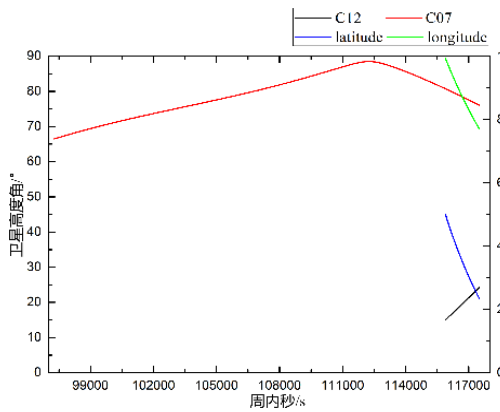


图 6 C12-C07 高度角和穿刺点的经纬度差值

Fig.6 The elevations and IPP longitude and latitude difference of C12-C07

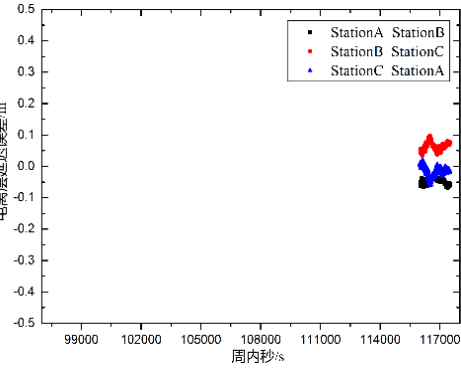


图 7 C12-C07 双差电离层延迟误差

Fig.7 Double difference ionospheric delay error of C12-C07

由于 C12 是 MEO 卫星，属于中圆地球轨道卫星，其相对于基准站运行角速度比其他两类卫星快，所以在该弧段内截止高度角一定的情况下，观测到该卫星的时间较短；C12 和 C07 卫星的高度角相差较大，电离层穿刺点经纬度差值变化率相似，且其变化率比 C10-C07 卫星的大。卫星的电离层穿刺点经纬度差值变化范围不超过 3° ，其高度角平均相差 49° 。值得说明的是，闭合基准站的同一卫星对的双差电离层延迟误差之和等于零，其双差对流层延迟误差之和也等于零。

以东北地区实验数据为例。基准卫星选择截止高度角最高的卫星，其在 24 h 的变换如图 8 所示。为了进一步证明本文方法解算的模糊度正确性和可靠性，图 9 至图 14 给出了 BDS 三类卫星 B1 频率各基准站间 24 h 的双差非色散性延迟误差和双差电离层延迟误差。

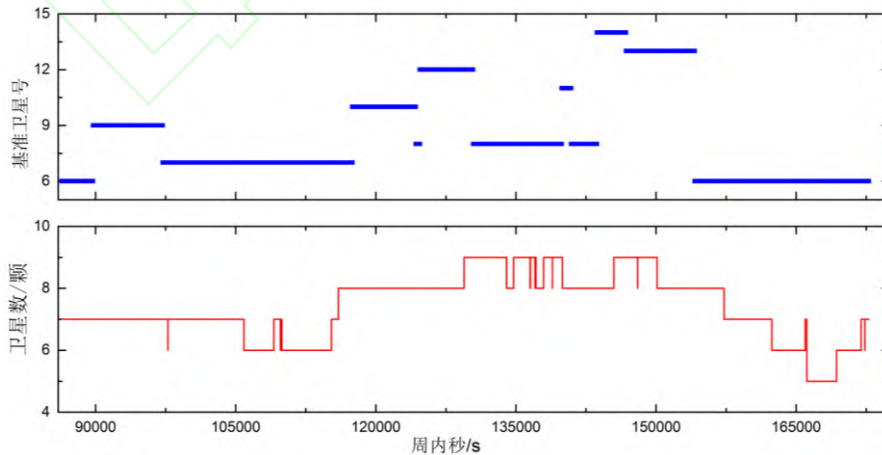


图 8 基准卫星和卫星数的变化

Fig.8 Changes in reference satellites and the number of satellites

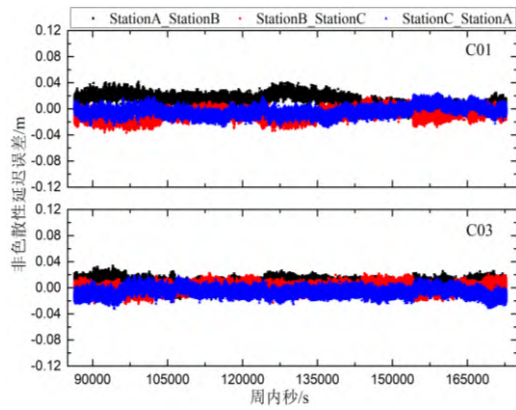


图 9 基准站间 C01 和 C03 双差非色散性延迟误差
Fig.9 The double difference nondispersive delay error of C01 and C03 between reference stations

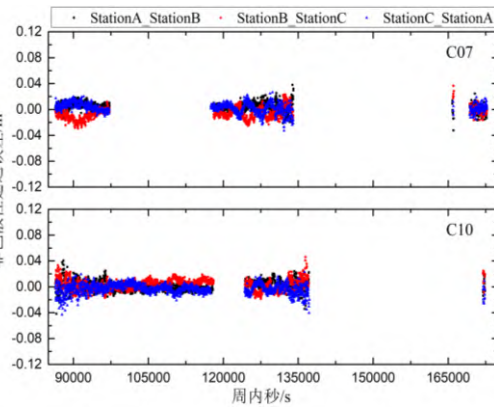


图 10 基准站间 C07 和 C10 双差非色散性延迟误差
Fig.10 The double difference nondispersive delay error of C07 and C10 between reference stations

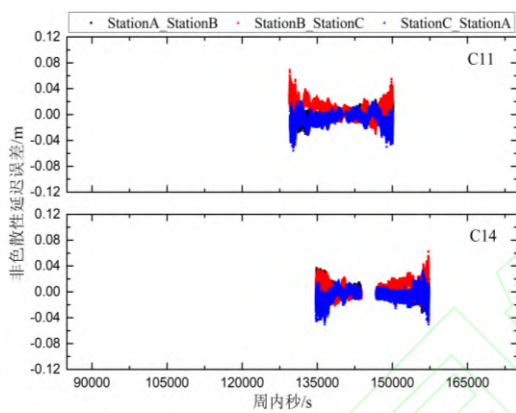


图 11 基准站间 C11 和 C14 双差非色散性延迟误差
Fig.11 The double difference nondispersive delay error of C11 and C14 between reference stations

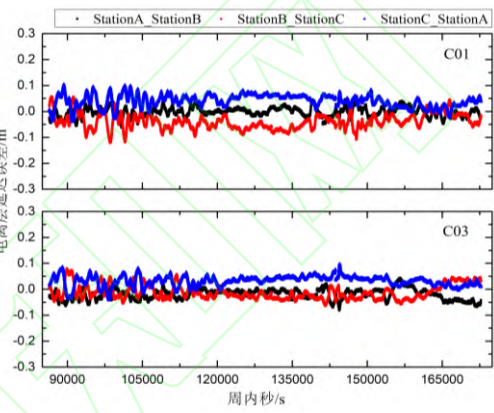


图 12 基准站间 C01 和 C03 双差电离层延迟误差
Fig.12 The double difference ionospheric delay errors of C01 and C03 between reference stations

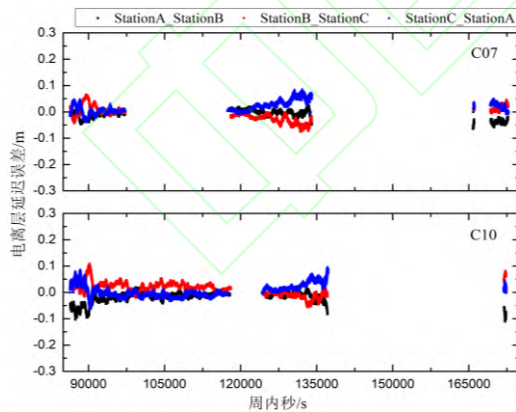


图 13 基准站间 C07 和 C10 双差电离层延迟误差
Fig.13 The double difference ionospheric delay errors of C07 and C10 between reference stations

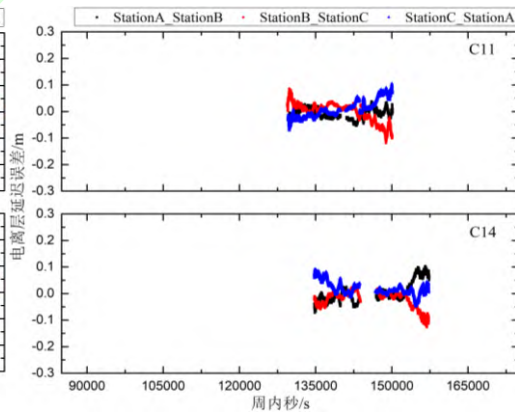


图 14 基准站间 C11 和 C14 双差电离层延迟误差
Fig.14 The double difference ionospheric delay errors of C11 and C14 between reference stations

为了定量分析，根据式 (22) 和式 (25) 可知，各频率模糊度有 1 周误差对双差非色散性延迟和电离层延迟的影响，两组数据结果如表 3 所示：

表 3 各频率模糊度有 1 周误差对双差非色散性和电离层延迟的影响

Tab.3 The effect of one week error of each frequency ambiguity

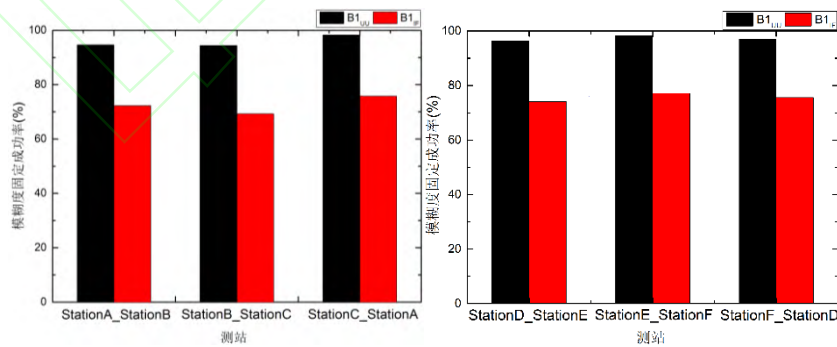
on double difference nondispersive and ionospheric delay

| 误差 | N1 有 1 周 误差影响 | N2 有 1 周 误差影响 | N1、N2 同时有 1 周误差影响 | 实验采集地 | 基准站间绝对 值最大的误差 |
|----------------|---------------------|---------------------|----------------------|-------|------------------|
| 双差非色散 性延迟误差 | $\pm 0.478\text{m}$ | $\pm 0.369\text{m}$ | $\pm 0.108\text{m}$ | 东北地区 | 0.071m |
| | | | | 华北地区 | 0.078m |
| 双差电离层 延迟误差 | $\pm 0.286\text{m}$ | $\pm 0.369\text{m}$ | $\pm 0.084\text{m}$ | 东北地区 | 0.127m |
| | | | | 华北地区 | 0.158m |

由表 3 可知,两组实验的双差非色散性延迟误差最大值分别为 0.071m 和 0.078m, 小于 N1 和 N2 双差模糊度同时有 1 周误差造成的非色散性误差; 虽然两组实验的双差电离层延迟误差最大值大于 N1 和 N2 双差模糊度同时有 1 周误差造成的电离层延迟误差, 但大部分历元的双差电离层延迟误差还是在误差范围内, 同时结合双差非色散性误差仍能证明本文的模糊度解算是正确的、可靠的。从表中还可知, 测站纬度越低, 受到的电离层延迟误差影响越大。

从图 9 至图 14 还可以看出, 在基准星变换时, 各基准站间的双差大气延迟误差无明显的跳跃, 即基准星不同的弧段双差大气延迟误差是平稳过渡的。进一步证明了本文提出的非差解算模糊度方法克服了双差解算模糊度在基准星变换时需要重新进行法方程叠加, 或者是克服了双差解算模糊度在基准星变换时需要顾及前后弧段基准星模糊度的承接问题, 简化了程序设计。

各基准站间 24h 观测数据的 B1 频率整周模糊度的固定成功率如图 15 所示。B1_{UU} 表示本文方法 B1 频率模糊度固定的成功率, B1_{IF} 表示无电离层组合方法 B1 频率模糊度固定的成功率。



实验 1 实验 2

图 15 基准站间模糊度固定成功率

Fig.15 The success rate of ambiguity fixing between reference stations

图 15 可以看出, 本文方法的模糊度固定成功率与无电离层组合法相比有较大的提高。本文方法充分利用了各频率观测值的信息, 避免了线性

组合放大噪声对整周模糊度固定的影响，充分考虑了各项误差，并进行了合理的误差处理策略，各基准站模糊度平均固定速度为 20 个历元。由于频繁的卫星变化，使得每新增卫星时，ratio 都要从 1 开始，为了确保模糊度固定的准确性，上述只统计了 ratio>3 的模糊度固定率。实验一模糊度成功率分别为 94.67%、94.43%和 98.29%。利用无电离层组合法进行 B1 频率的模糊度固定成功率偏低，各基准站的模糊度固定成功率分别为 72.3%、69.3%和 75.8%。实验二模糊度成功率分别为 96.43%、98.27%和 97.08%；无电离层模糊度成功率分别为 74.2%、77.2%和 75.6%。

基准站间模糊度正确固定之后，可以得到高精度的区域误差改正数，并建立区域误差改正模型，然后改正流动站载波相位观测值误差，进而确定流动站的模糊度，实现高精度定位。图 16 给出了流动站在 E、N、U3 个方向上的定位结果和坐标准确值的差值。实验一和实验二 3 个方向上的均方根值如表 4 所示。

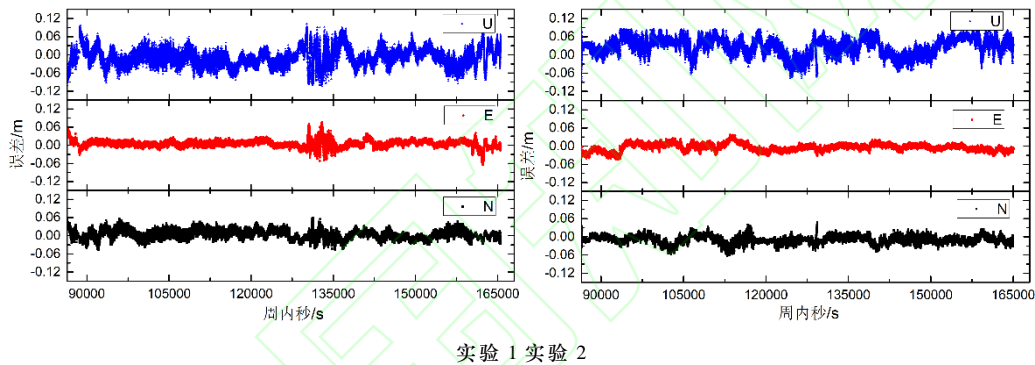


图 16 流动站定位偏差

Fig.16 Positioning biases at rover station

表 4 流动站定位结果差值的 RMS (/m)

Tab.4 The RMS of result bias of rover(/m)

| | E | N | U |
|-----|--------|--------|--------|
| 实验一 | 0.013m | 0.015m | 0.031m |
| 实验二 | 0.012m | 0.017m | 0.038m |

综上，本文所提出的非差非组合的 BDS 长距离基准站整周模糊度解算方法在基准站间距为 150km 以内时，模糊度初始化时间均在 20 个历元之内（采样间隔为 1 s），建立的误差改正模型可使流动站定位精度达到厘米级。

3 结论

本文研究了一种基于非差非组合的 BDS 长距离基准站整周模糊度解算方法。该方法利用基准站间非差模糊度实时快速计算方法，基于双差与非差整周模糊度线性组合关系，计算基准站网当前历元所有卫星的非差整

周模糊度，避免了在基准星变换时，模糊度需要承接或者重新进行法方程叠加的问题。同时，为了充分利用所有观测量信息，且为避免线性组合放大噪声，以及分步解算繁琐，采用非组合进行整周模糊度解算。在误差处理时，采用随机游走策略增加历元间的约束，可快速获得正确固定的整周模糊度。通过实测 CORS 网的 BDS 观测数据进行实验验证，该算法可快速实现 BDS 网络 RTK 基准站整周模糊度固定，并通过固定的整周模糊度计算单历元的双差电离层延迟误差和双差非色散性延迟误差，分析了卫星高度角和电离层穿刺点的经纬度差值与双差电离层延迟误差之间的关系，进一步证明了整周模糊度固定的正确性和可靠性。

参考文献

- [1] Cheng Pengfei, Wen Hanjiang, Liu Huanling, et al. Research Situation and Future Development of Satellite Geodesy[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(1):51-57(程鹏飞, 文汉江, 刘焕玲, 等. 卫星大地测量学的研究现状及发展趋势[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(1):51-57)
- [2] ZHU Huizhong. The Study of GNSS Network RTK Algorithm between Long Range at Single Epoch Using Un-difference Error Corrections[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012(祝会忠. 基于非差误差改正数的长距离单历元 GNSS 网络 RTK 算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012)
- [3] Deng C, Tang W, Liu J, et al. Reliable single-epoch ambiguity resolution for short baselines using combined GPS/BeiDou system[J]. GPS Solutions, 2014, 18(3):375-386.
- [4] GAO Meng, XU Aigong, ZHU Huizhong, et al. The Algorithm of Triple-frequency Ambiguity Resolution Between BDS Network RTK Reference Stations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017(4):45-55(高猛, 徐爱功, 祝会忠, 等. BDS 网络 RTK 参考站三频整周模糊度解算方法[J]. 测绘学报, 2017(4):45-55)
- [5] ZHU Huizhong, XU Aigong, GAO Meng, et al. The Algorithm of Single-epoch Integer Ambiguity Resolution Between Middle-range BDS Network RTK Reference Stations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016(1):50-57(祝会忠, 徐爱功, 高猛, 等. BDS 网络 RTK 中距离参考站整周模糊度单历元解算方法[J]. 测绘学报, 2016(1):50-57)
- [6] LIU Wenjian, XU Rongpan, LI Min, et al. Establishment and Accuracy Analysis for Guangdong Coordinate Frame Based on BDS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(6): 874-878(刘文建, 徐荣攀, 李敏, 等. 基于 BDS 的广东省坐标框架建立及精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(6):874-878)
- [7] ZHU Huizhong, LU Yangyang, XU Aigong, et al. A Network Real-Time Kinematic Method for GPS and BDS Double Systems Between Long Range[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(2): 252-261(祝会忠, 路阳阳, 徐爱功, 等. 长距离 GPS/北斗卫星导航定位系统网络 RTK 方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(2): 252-261)
- [8] Gao W, Gao C, Pan S, et al. Fast Ambiguity Resolution Between GPS/GLONASS/BDS

- Combined Long-range Base Stations Based on Partial-fixing Strategy[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(4):558-562(高旺, 高成发, 潘树国,等. 基于部分固定策略的多系统长距离基准站间模糊度快速解算[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(4):558-562)
- [9] Zhu Huizhong, Li Chenhui, Wang Chuyang, et al. The Real Time Rapid Integer Ambiguity Resolution Between Reference Stations of GPS Network RTK[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(11):5-11(祝会忠, 李晨辉, 王楚扬, 等. GPS 网络 RTK 参考站间整周模糊度的实时快速解算[J]. 测绘科学, 2018, 43(11):5-11)
- [10] Yan Z , Ding L , Huang E , et al. A new method of ambiguity resolution in network RTK between reference stations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(3):295-298+323(鄢子平, 丁乐乐, 黄恩兴,等. 网络 RTK 参考站间模糊度固定新方法 [J]. 武汉大学学报 信息科学版,2013, 38(3):295-298+323)
- [11] TANG Weiming, LIU Qian, GAO Kefu, et al. Influence of BDS Pseudorange Code Biases on Baseline Resolution. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(8): 1199-1206(唐卫明, 刘前, 高柯夫, 等. 北斗伪距码偏差对基线解算的影响分析. 武汉大学学报 信息科学版, 2018, 43(8): 1199-1206)
- [12] YAO Yibin , HU Mingxian, XU Chaoqian. Positioning Accuracy Analysis of GPS/BDS/GLONASS Network RTK Based on DREAMNET[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(9):1009-1018(姚宜斌, 胡明贤, 许超钤. 基于 DREAMNET 的 GPS/BDS/GLONASS 多系统网络 RTK 定位性能分析 [J]. 测绘学报, 2016, 45(9):1009-1018)
- [13] LYU Weicai, GAO Jingxiang, WANG Jian, et al. The Single Epoch Algorithm for Short Baseline Ambiguity Based on BeiDou Three Frequency Constraint[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015(6):1090-1096(吕伟才, 高井祥, 王坚, 等. 北斗三频约束的短基线模糊度单历元算法[J]. 中国矿业大学学报, 2015(6):1090-1096)
- [14] Liu Yanyan, Ye Shirong, Jiang Peng, et al. Instantaneous Ambiguity Resolution of Short Baselines Using BeiDou Triple Frequency Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015,40(2):209-213(刘炎炎, 叶世榕, 江鹏, 等. 基于北斗三频的短基线单历元模糊度固定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015,40(2): 209-213)
- [15] Jia Chun, Zhao Lin, Li Liang, et al. Ionosphere-free Multi-carrier Ambiguity Resolution Method Based on Ambiguity Linear Constraints[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(7):42-51(贾春, 赵琳, 李亮, 等. 模糊度线性约束的消电离层多频模糊度解算 [J]. 测绘学报, 2018, 47(7):42-51)
- [16] An Xiangdong, Chen Hua, Jiang Weiping, et al. GLONASS Ambiguity Resolution Method Based on Long Baselines and Experimental Analysis[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(5):690-698(安向东, 陈华, 姜卫平, 等. 长基线 GLONASS 模糊度固定方法及实验分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(5): 690-698)
- [17] ZOU Xuan, Wang Yawei, Deng Chenlong, et al. Instantaneous BDS + GPS undifferenced NRTK positioning with dynamic atmospheric constraints[J]. Gps Solutions,2018, 22(1):17-28.

An Algorithm for Ambiguity Resolution of BDS Undifferenced and Uncombined Long-range Reference Stations

LI Bo^{1,2} CHENG Pengfei² BI Jinzhong² XU Yantian² ZHU Huizhong¹

GAO Meng¹ GU Shouzhou²

¹ School of Geomatics Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

² Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

Abstract: An undifferenced and uncombined integer ambiguity resolution method between BDS long-range reference stations is proposed. Firstly, the error observation equation is established directly by using the observations of different frequencies, and the relative zenith tropospheric wet delay error and ionospheric delay error are estimated by random walk strategy to increase the constraint between epochs. Then a linear calculation method of undifferenced integer ambiguity real-time is used to obtain the undifferenced integer ambiguity of all satellites in the current epoch of the reference network. It solves the problem that Ambiguity needs to be inherited or re-superimposed on normal equations in the reference star transformation. Because the information of each frequency observation is fully utilized, the influence of linear combination amplification noise on integer ambiguity fixing is avoided, and the ambiguity fixing success rate of uncombined method is much higher than that of ionosphere-free combination method. The results show that the average fixed speed of ambiguity of each reference station is 20 epochs. The integer ambiguity resolution of the carrier phase of the reference station can be realized quickly.

Keywords: BDS; undifferenced and uncombined; integer ambiguity; tropospheric delay error; ionospheric delay error

First author : LI Bo, PhD candidate, majors in the algorithm and application of GNSS for high-accuracy dynamic positioning.

Foundation support: Fees for basic scientific research of Chinese Academy of surveying and Mapping(AR1903);The National Key Research and Development Program of China (2016YFB0501405).