

DOI:10.13203/j.whugis20150675



文章编号:1671-8860(2017)10-1438-08

北斗三频电离层延迟及码硬件延迟解算方法

王华润^{1,2} 柴洪洲² 王 敏² 潘宗鹏²

1 太原卫星发射中心测量控制站,山西 岢岚,036301

2 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

摘 要:准确固定非差模糊度是利用相位观测量获取高精度电离层延迟的关键。三频观测条件下常规的处理策略需依次固定超宽巷、宽巷以及窄巷模糊度,通常利用 MW(melbourne-wubben)组合解算宽巷模糊度时易受到码硬件延迟和观测噪声的影响而固定错误。利用北斗三频数据和 GIM(grid ionospheric map)产品,通过固定的超宽巷模糊度以及构造相位无几何组合解算宽巷模糊度,进而重构得到高精度电离层延迟,并且分离了码硬件延迟总量。结果表明,GIM 模型辅助条件下宽巷模糊度固定成功率能达到 100%,且消除了系统性偏差;电离层重构值与 GIM 模型改正值存在约 1 m 的差异,等效精度约 6TECU;分离的码硬件延迟变化平稳,标准偏差不超过 0.3 m。

关键词:三频非差;模糊度解算;GIM;电离层延迟重构;码硬件延迟分离

中图法分类号:P228

文献标志码:A

电离层延迟是影响 GNSS 定位、导航的重要因素^[1-3],通常对电离层延迟的处理方法主要包括模型改正法和组合消除法。组合消除法主要是通过构成无电离层组合,该方法一方面放大了观测噪声,另一方面舍弃了电离层信息,不利于利用 GNSS 研究电离层的活动和变化规律。模型改正法主要通过电离层模型来计算电离层延迟,其中应用较广泛的 Kloubchar 模型通过导航星历发布电离层参数供全球用户改正计算,由于该模型是经验模型,改正精度约 60%,一般适合导航用户。对于精密用户,利用全球或区域监测网络的双频观测数据,通过电离层建模也可以获取高精度电离层延迟,如 IGS (international GNSS service) 分析中心发布的 GIM (grid ionospheric map) 格网电离层产品,其全球平均改正精度约为 2~8TECU(1TECU 引起的北斗 B1 频率观测值电离层延迟量为 0.165 m),用户根据事后 ionex 文件通过插值计算获得穿刺点处的垂向电离层改正延迟量^[4,5]。近年来 GNSS 多频观测技术得到快速发展,北斗系统全星座发播的三频信号为 GNSS 研究领域开辟了广阔的途径,尤其是在模糊度固定等方面具有明显的优势。邓健提出了根据 GPS 双差超宽巷模糊度解算双差电离层延迟

的方法^[6];李博峰提出了中长基线三频模糊度的快速解算方法^[7];本文参考了三频模糊度固定的策略^[8],提出了利用 GIM 产品辅助固定宽巷模糊度的方法,并重构了电离层,进而分离了码硬件延迟总量。

1 原理与方法

1.1 模糊度固定及电离层重构

三频伪距、载波相位观测方程表达式为(单位:m):

$$\begin{cases} P_1 = \rho + \frac{I}{f_1^2} + d_{P1} + \epsilon_{P1} \\ P_2 = \rho + \frac{I}{f_2^2} + d_{P2} + \epsilon_{P2} \\ P_3 = \rho + \frac{I}{f_3^2} + d_{P3} + \epsilon_{P3} \\ L_1 = \rho - \frac{I}{f_1^2} + d_{L1} + \lambda_1 N_1 + \epsilon_{L1} \\ L_2 = \rho - \frac{I}{f_2^2} + d_{L2} + \lambda_2 N_2 + \epsilon_{L2} \\ L_3 = \rho - \frac{I}{f_3^2} + d_{L3} + \lambda_3 N_3 + \epsilon_{L3} \end{cases} \quad (1)$$

式中, f 为频率; ρ 表示与频率无关的几何项; I 为

收稿日期:2017-05-03

项目资助:国家自然科学基金(41574041,41604013);地理信息工程国家重点实验室开放基金(SKLGIE2015-Z-1-1)

第一作者:王华润,硕士,助理工程师,主要从事 GNSS 测量数据处理。593855433@qq.com

电离层参数; λ 为波长; N 表示原始相位模糊度; d_p 为码硬件延迟总量; d_L 为相位硬件延迟总量; ϵ 为观测噪声。其中相位缠绕、潮汐影响等可进行模型化改正,由于未使用精密星历产品,故不会考虑其对天线相位中心偏差的影响。

解算模糊度一般会选择波长较长、观测噪声较小的宽巷组合。表 1 给出了满足上述特性要求的北斗三频相位观测组合^[9, 10]。

表 1 北斗三频相位组合观测量特性

Tab. 1 The Character of BDS Triple-frequency Phase Observation Combinations

组合系数		波长	电离层	电离层	噪声	噪声	
i	j	k	/m	系数/周	系数/m	系数/周	
波长较长组合							
0	-2	2	2.442	-0.652	-1.591	2.828	6.907
0	-1	1	4.884	-0.326	-1.591	1.414	6.907
1	-1	0	0.847	-1.527	-1.293	1.414	1.198
1	0	-1	1.025	-1.201	-1.231	1.414	1.449
1	1	-2	1.297	-0.875	-1.135	2.449	3.176

本文选择(0, 1, -1)和(1, 0, -1)组合进行模糊度解算,其分别对应的相位超宽巷、宽巷组合(单位:周)表示为:

$$\begin{cases} \Phi_{ewl} = \frac{f_2 L_2 - f_3 L_3}{f_2 - f_3} = \rho + \frac{I}{f_2 f_3} + \lambda_{ewl} N_{ewl} \\ \Phi_{wl} = \frac{f_1 L_1 - f_3 L_3}{f_1 - f_3} = \rho + \frac{I}{f_1 f_3} + \lambda_{wl} N_{wl} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\lambda_{ewl} = c/(f_2 - f_3)$; $N_{ewl} = N_2 - N_3$; $\lambda_{wl} = c/(f_1 - f_3)$; $N_{wl} = N_1 - N_3$ 。对式(2)中的两个式子作差可得到相位宽巷无几何组合。

$$\begin{aligned} \Phi_{GF} &= \Phi_{ewl} - \Phi_{wl} \\ &= \left(\frac{1}{f_2 f_3} - \frac{1}{f_1 f_3} \right) I + (\lambda_{ewl} N_{ewl} - \lambda_{wl} N_{wl}) \end{aligned} \quad (3)$$

则对应于 B1 频点上的电离层延迟可表示为:

$$sTEC = \frac{I}{f_1^2} = \frac{\Phi_{GF} - (\lambda_{ewl} N_{ewl} - \lambda_{wl} N_{wl})}{f_1 (f_1 - f_2)} f_2 f_3 \quad (4)$$

一般利用原始相位观测量构成的无几何组合并通过固定原始模糊度以获取高精度电离层延迟,该过程需要依次固定超宽巷、宽巷以及窄巷模糊度^[11],式(4)只需固定超宽巷、宽巷模糊度就能解算电离层延迟。宽巷模糊度一般利用 MW (melbourne-wubben)组合进行解算,但容易受到码硬件延迟和观测噪声的影响而固定失败,进一步会影响窄巷模糊度的固定,因此正确固定宽巷模糊度成为获取高精度电离层延迟的关键。MW 组合表示为:

$$\begin{aligned} \hat{N}_{wl,km} &= \left(\frac{f_k}{c} L_k - \frac{f_m}{c} L_m \right) - f_{km} \left(\frac{f_k}{c} P_k + \frac{f_m}{c} P_m \right) \\ &= N_{wl,km} + \frac{f_k}{c} (d_{L,k} + \epsilon_{L,k}) - \frac{f_m}{c} (d_{L,m} + \epsilon_{L,m}) \\ &\quad - f_{km} \frac{f_k}{c} (d_{P,k} + \epsilon_{P,k}) - f_{km} \frac{f_m}{c} (d_{P,m} + \epsilon_{P,m}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, k, m 代表不同频点,且 $f_{km} = (f_k - f_m)/(f_k + f_m)$ 。虽然利用原始相位观测量获取的宽巷模糊度与相位硬件延迟和初始相位偏差有关,但对 MW 宽巷模糊度来说,相位硬件延迟和码硬件延迟以及码观测噪声量级相比可忽略不计,影响宽巷模糊度的主要因素是码硬件延迟和观测噪声^[12]。因此 MW 组合超宽巷、宽巷模糊度可分别表示为:

$$\begin{cases} \hat{N}_{ewl} = \left(\frac{f_2}{c} L_2 - \frac{f_3}{c} L_3 \right) - f_{23} \left(\frac{f_2}{c} P_2 + \frac{f_3}{c} P_3 \right) \\ = N_{ewl} - f_{23} \frac{f_2}{c} (d_{P2} + \epsilon_{P2}) - f_{23} \frac{f_3}{c} (d_{P3} + \epsilon_{P3}) \\ \hat{N}_{wl} = \left(\frac{f_1}{c} L_1 - \frac{f_3}{c} L_3 \right) - f_{13} \left(\frac{f_1}{c} P_1 + \frac{f_3}{c} P_3 \right) \\ = N_{wl} - f_{13} \frac{f_1}{c} (d_{P1} + \epsilon_{P1}) - f_{13} \frac{f_3}{c} (d_{P3} + \epsilon_{P3}) \end{cases} \quad (6)$$

根据白噪声的随机特性,通过对浮点模糊度进行平滑可以有效减弱观测噪声的影响。由于(0, 1, -1)组合波长达到了 4.884 m,根据超宽巷模糊度和码硬件延迟的关系,即使码硬件延迟达到米级超宽巷模糊度受到的影响量也较小。(1, 0, -1)组合的波长为 1.025 m,宽巷模糊度更容易受到码硬件延迟和观测噪声等因素的影响。为了避免码硬件延迟和伪距观测噪声的影响,在超宽巷模糊度已固定的条件下,利用下式解算宽巷模糊度。

$$\begin{aligned} \hat{N}_{Dwl} &= \varphi_{wl} - (\varphi_{ewl} - N_{ewl}) \frac{\lambda_{ewl}}{\lambda_{wl}} \\ &= N_{wl} + \frac{f_2 - f_1}{f_1 f_2 f_3 \lambda_{wl}} I \end{aligned} \quad (7)$$

式中, \hat{N}_{Dwl} 是包含宽巷模糊度和电离层影响的相位宽巷无几何组合; $\varphi_{ewl}, \varphi_{wl}$ 分别表示以周为单位的相位超宽巷、宽巷组合; N_{ewl} 为固定到整数的超宽巷模糊度。由式(7)看出,宽巷模糊度主要受到电离层延迟的影响,假定电离层对宽巷模糊度的影响表示为:

$$\frac{f_2 - f_1}{f_1 f_2 f_3 \lambda_{wl}} I = \Delta N_{wl,lon} + \delta N_{wl,lon} \quad (8)$$

式中, $\Delta N_{wl,lon}, \delta N_{wl,lon}$ 分别表示电离层延迟对宽巷模糊度的整数周和小数周影响,则有:

$$\hat{N}_{Dwl} = N_{wl} + \Delta N_{wl,lon} + \delta N_{wl,lon} \quad (9)$$

平滑浮点宽巷模糊度并就近取整,即 $\bar{N}_{wl} = [\hat{N}_{wl}]$,则有:

$$\bar{N}_{wl} = N_{wl} + \Delta N_{wl,lon} \quad (10)$$

本文引入了 GIM 产品来辅助确定电离层延迟对宽巷模糊度的整数周影响,由于 GIM 模型改正精度全球分布不均匀,设 GIM 的改正误差造成宽巷模糊度整周数为 $\Delta N_{wl,error}$,根据式(4)则有:

$$sTEC_{GIM} = \frac{\Phi_{GF} - [\lambda_{ewl} N_{ewl} - \lambda_{wl} (N_{wl} + \Delta N_{wl,error})]}{f_1 (f_1 - f_2)} f_2 f_3 \quad (11)$$

而根据浮点宽巷模糊度解算的电离层延迟可表示为:

$$sTEC = \frac{\Phi_{GF} - [\lambda_{ewl} N_{ewl} - \lambda_{wl} (N_{wl} + \Delta N_{wl,lon} + \delta N_{wl,lon})]}{f_1 (f_1 - f_2)} f_2 f_3 \quad (12)$$

对式(11)、式(12)作差可得:

$$\begin{aligned} \Delta sTEC &= sTEC - sTEC_{GIM} \\ &= \frac{\lambda_{wl} (\Delta N_{wl,lon} - \Delta N_{wl,error} + \delta N_{wl,lon})}{f_1 (f_1 - f_2)} f_2 f_3 \end{aligned} \quad (13)$$

则电离层延迟对宽巷模糊度的影响大小为:

$$\begin{aligned} \Delta \hat{N}_{wl,lon,error} &= \Delta \hat{N}_{wl,lon} - \Delta \hat{N}_{wl,error} \\ &= \frac{f_1 (f_1 - f_2) \cdot \Delta sTEC}{\lambda_{wl} f_2 f_3} \end{aligned} \quad (14)$$

根据式(14),GIM 改正误差将被直接引入到电离层延迟造成的宽巷模糊度整数周偏差当中。平滑 $\Delta \hat{N}_{wl,lon,error}$ 并就近取整可得到电离层延迟对宽巷模糊度的整周数影响 $\Delta \bar{N}_{wl,lon,error} = [\Delta \hat{N}_{wl,lon,error}]$,根据式(10)可以得到宽巷模糊度的固定解 $N_{wl} = \bar{N}_{wl} - \Delta \bar{N}_{wl,lon,error}$,利用固定的超宽巷、宽巷模糊度重构电离层延迟。

$$sTEC_{Triple_frequency} = \frac{\Phi_{GF} - [\lambda_{ewl} N_{ewl} - \lambda_{wl} (\bar{N}_{wl} - \Delta \bar{N}_{wl,lon,error})]}{f_1 (f_1 - f_2)} f_2 f_3 \quad (15)$$

将重构的电离层延迟与 GIM 模型改正值作差得到:

$$\begin{aligned} \Delta sTEC_{lon,error} &= sTEC_{Triple_frequency} - sTEC_{GIM} \\ &= \frac{\lambda_{wl} (\Delta N_{wl,lon} - \Delta \bar{N}_{wl,lon,error} - \Delta N_{wl,error})}{f_1 (f_1 - f_2)} f_2 f_3 \end{aligned} \quad (16)$$

假定第一步超宽巷模糊度固定到整数存在 1 周的误差,则 $\Delta sTEC_{lon,error}$ 至少引入 $\frac{\lambda_{ewl} f_2 f_3}{f_1 (f_1 - f_2)} =$

13.54 m 的变化;若 GIM 改正误差导致宽巷模糊度 1 周的变化,则 $\Delta sTEC_{lon,error}$ 至少引入 $\frac{\lambda_{wl} f_2 f_3}{f_1 (f_1 - f_2)} = 2.84$ m 的变化,因此可以根据电离层重构值与 GIM 改正值差异的大小来判断超宽巷、宽巷模糊度是否固定准确,若固定失败则可根据 $\Delta sTEC_{lon,error}$ 对超宽巷、宽巷模糊度进行修正。

1.2 码硬件延迟分离

利用重构的电离层延迟和超宽巷、宽巷模糊度分离原始频点的码硬件延迟总量为:

$$\begin{cases} \hat{N}_{ewl} = N_{ewl} - \frac{f_{23} f_2}{c} d_{P2} - \frac{f_{23} f_3}{c} d_{P3} \\ \hat{N}_{wl} = N_{wl} - \frac{f_{13} f_1}{c} d_{P1} - \frac{f_{13} f_3}{c} d_{P3} \\ P_1 - P_3 = \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_3^2} \right) I + d_{P1} - d_{P3} \end{cases} \quad (17)$$

式(17)可进一步表示为:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{L} \quad (18)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{f_{23} f_2}{c} & -\frac{f_{23} f_3}{c} \\ -\frac{f_{13} f_1}{c} & 0 & -\frac{f_{13} f_3}{c} \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} d_{P1} \\ d_{P2} \\ d_{P3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} \hat{N}_{ewl} - N_{ewl} \\ \hat{N}_{wl} - N_{wl} \\ P_1 - P_3 - \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_3^2} \right) I \end{bmatrix}$$

在模糊度固定的第二步过程中需要 GIM 产品辅助求解宽巷模糊度,目前 GIM 格网产品精度能满足应用需求。值得注意的是,在解算 MW 宽巷模糊度过程中忽略了相位硬件延迟的影响,实际上该影响量会被吸收到最终分离的码硬件延迟当中。硬件延迟在短周期内能保持较高的平稳性,利用其先前估计值进行临短预报辅助 MW 宽巷模糊度固定过程中,相位硬件延迟不会影响模糊度的固定。根据电离层重构值可以确定更加精确的码硬件延迟,避免了对 GIM 产品的依赖。

2 试验与分析

本文选取了 2013 年 MGEX 监测站中 CUT0、REUN、KIR8 观测站年积日第 239~243 共 5 d 的北斗三频观测数据,数据采样率为 30 s,测站分布位置如图 1 所示。

3 个测站分别位于中低纬度和高纬度地区,电离层活跃程度和 GIM 改正精度具有一定的差异。为了便于分析和讨论,这里首先选取了

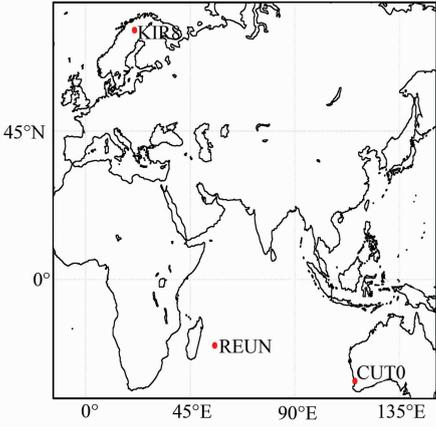


图 1 测站分布图

Fig. 1 The Distribution Of the Test Stations

CUT0 监测站年积日为第 240 天分别对应 GEO、IGSO、MEO 中的 C04、C07、C14 卫星的观测数据进行模糊度解算。

2.1 超宽巷、宽巷模糊度解算

MW 宽巷模糊度主要受到码硬件延迟和观测噪声的影响,浮点模糊度就近取整后的残差分布在一定程度上能反映出影响因素的特性和大小。图 2 分别给出了 C04、C07、C14 卫星观测值超宽巷模糊度就近取整后残差分布的直方图和 Q-Q 分位数图。

根据直方图可以看出,超宽巷模糊度取整残差基本满足了正态分布的特点,反映出高斯白噪声的随机特性。码硬件延迟和相位小数偏差对模糊度的影响短周期内保持稳定,从而导致残差分布中心均值不为零。Q-Q 分位数图以标准正态分布的分位数为横坐标,样本值为纵坐标,样本值越吻合于中间斜线表示越近似正态分布。图中模糊度取整后残差整体上与斜线吻合,尤其在斜线中间位置一致性表现得更好,在斜线两端相差较大。斜线在纵坐标轴上的截距不为零反映出残差是一个非零均值的正态分布,与直方图反映的结果一致。总体来看,模糊度取整后平均残差不超过 0.15 周,最大残差不超过 0.5 周。图 3 给出了 3 颗卫星 MW 组合超宽巷模糊度浮点值、平滑值以及固定值。

由图 3 可以看出,得益于超宽巷较长的波长,模糊度浮动较小。C04 卫星浮点模糊度呈现出明显的周期性波动,其原因很可能是受到 GEO 卫星多路径效应的影响,而 C07 和 C14 卫星浮点模糊度呈现出较明显的白噪声特点。在一段连续无周跳的弧段内若模糊度取整后的数值保持不变则认为模糊度固定成功。可以看出,模糊度平滑后

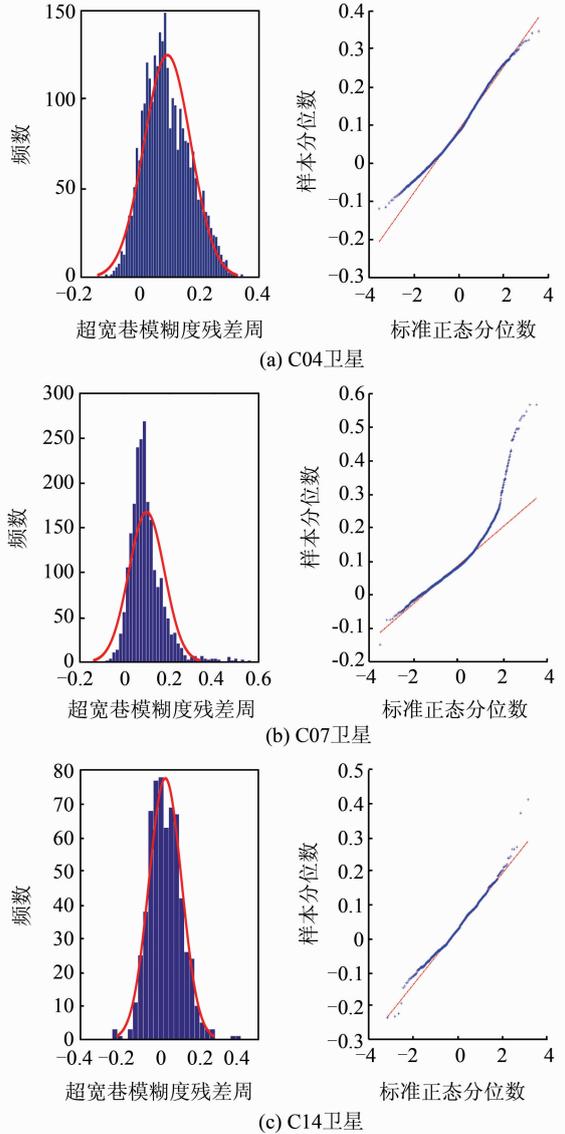


图 2 超宽巷模糊度残差分布直方图和分位数图
Fig. 2 Histogram Density and Q-Q Plot of the EWL Ambiguity Residual

平稳性得到很大提高,能实现单历元的实时固定。

相位宽巷组合相对于超宽巷组合具有更短的波长,更易受到码硬件延迟和观测噪声的影响。图 4~6 给出了分别用 MW 组合和相位宽巷无几何组合解算的宽巷模糊度。

从 MW 组合方法解算的宽巷模糊度可以看出,GEO 卫星多路径效应使得 C04 模糊度产生周期性波动,IGSO 和 MEO 卫星模糊度呈现明显的白噪声特性,变化幅度较超宽巷模糊度更大,一般达到了 2 周,即使平滑后可能出现固定失败的情况,如 C07 卫星在前 100 个历元时段。相比而言,相位宽巷无几何组合具有更小的观测噪声,在超宽巷模糊度固定条件下并且利用 GIM 产品进行电离层改正后宽巷模糊度变化幅度一般不超过

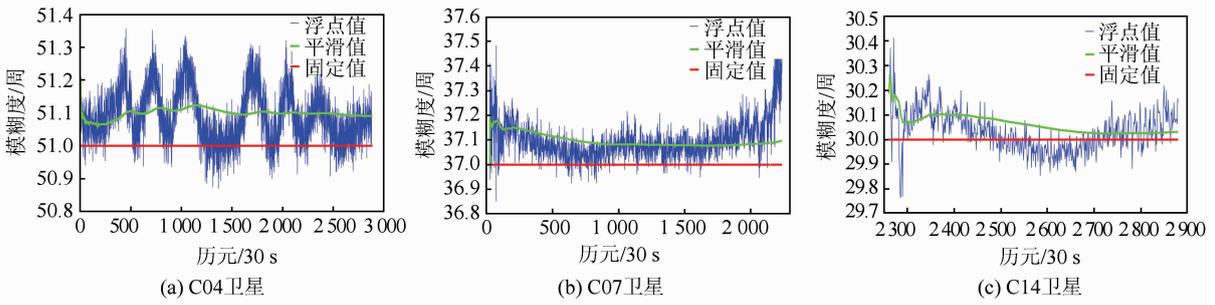


图3 MW组合超宽巷模糊度时间序列图

Fig. 3 The Time Series of EWL Ambiguity

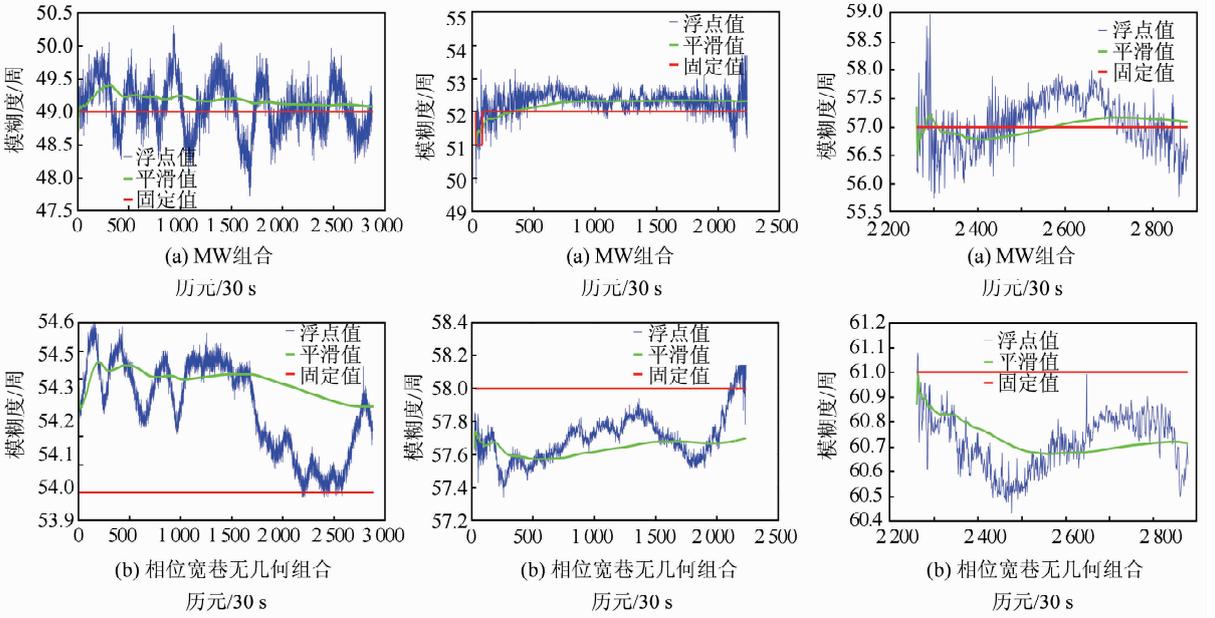


图4 C04宽巷模糊度时间序列

Fig. 4 Time Series of C04 WL Ambiguity

图5 C07宽巷模糊度时间序列

Fig. 5 Time Series of C07 WL Ambiguity

图6 C14宽巷模糊度时间序列

Fig. 6 Time Series of C14 WL Ambiguity

0.5周,且平滑后模糊度平稳性得到很大提升,能实现单历元模糊度固定。上述两种方法固定的宽巷模糊度存在整周数的差异,其原因是由MW组合解算的模糊度中包含了码硬件延迟的影响。由于GIM模型改正精度较高,根据相位宽巷无几何组合解算的模糊度扣除电离层影响后很容易获得固定解。

2.2 电离层延迟重构及精度分析

根据固定的超宽巷、宽巷模糊度重构电离层延迟,图7给出了CUT0站第239~243天斜向电离层延迟时间序列。

同一测站多天电离层延迟重构值的变化趋势达到很好的一致性。地方时12时左右电离层内部最活跃,因此该时段内电离层延迟多天间的差异最大,凌晨4~8时期间电离层活跃程度较弱,电离层延迟差异极小。

为了分析重构的电离层延迟精度,图8~10

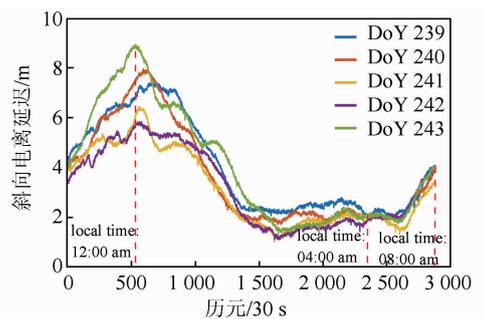


图7 C04多天电离层延迟时间序列

Fig. 7 Time Series of C04 Ionospheric Delay in Different Days

给出3颗卫星电离层延迟重构值以及与GIM改正值的差异。

综合以上分析可知,若超宽巷、宽巷模糊度存在固定误差则会很明显反映到电离层延迟重构值与GIM模型改正值之间的偏差中。而图8~10

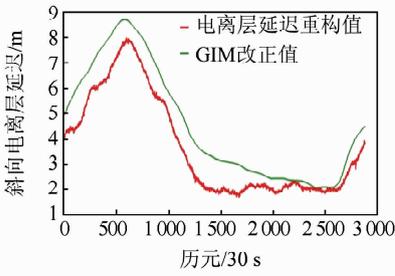
中 C04、C14 卫星电离层延迟重构值与 GIM 改正值的差异不超过 1.5 m, C07 卫星两者间差值不超过 2 m, 从这个角度可以说明以上固定的超宽巷、宽巷模糊度不存在系统偏差。综合分析, 电离层延迟重构值与 GIM 模型改正值间存在约 1 m 的平均系统偏差, 等效改正精度约 6TECU。

2.3 码硬件延迟分离

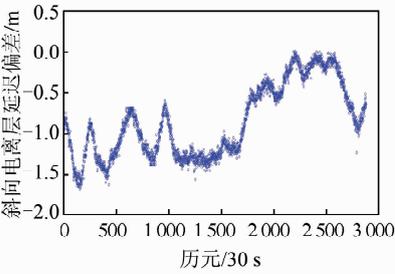
利用电离层延迟重构值和超宽巷、宽巷模糊度取整后残差进一步分离原始频点上的码硬件延迟总量。图 11 统计了 CUT0、REUN、KIR8 这 3 个监测站 2013 年第 239~243 天模糊度取整后残

差和扣除电离层延迟后的码伪距无几何组合均值。

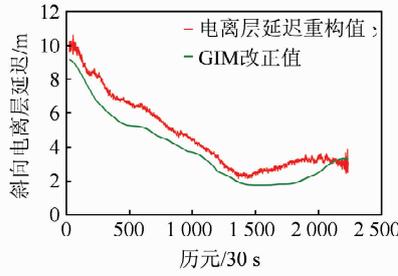
根据模糊度残差均值可以看出, 得益于超宽巷组合较长的波长, 码硬件延迟对超宽巷模糊度影响大小一般不超过 0.22 周, 对宽巷模糊度的影响量却能达到数周, 这也是利用 MW 组合直接取整固定宽巷模糊度成功率较低的原因之一, 而且存在系统性偏差。扣除电离层延迟后的码伪距无几何组合多天内的最大差异达到了 1 m, 这主要与码伪距的观测噪声有关。根据式(18)给出了 3 个监测站对应卫星各频点上码硬件延迟总量的周日变化情况, 如图 12 所示。



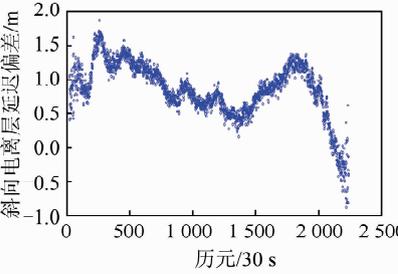
(a) 斜向电离层延迟



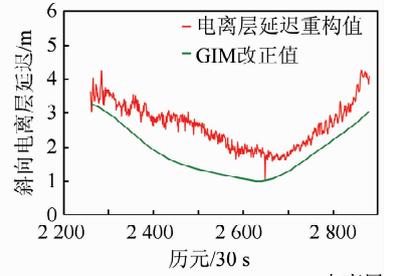
(b) 电离层延迟量偏差



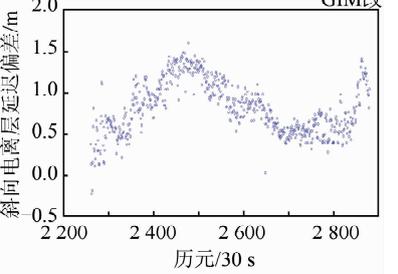
(a) 斜向电离层延迟



(b) 电离层延迟量偏差



(a) 斜向电离层延迟



(b) 电离层延迟量偏差

图 8 C04 电离层延迟解算值与 GIM 改正值的对比

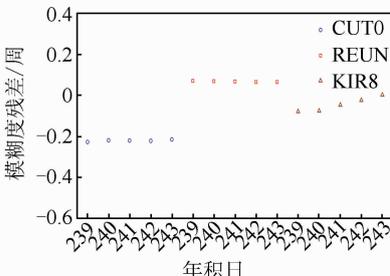
Fig. 8 Difference Between C04 Ionospheric Delay Resolution and GIM Correction

图 9 C07 电离层延迟解算值与 GIM 改正值的对比

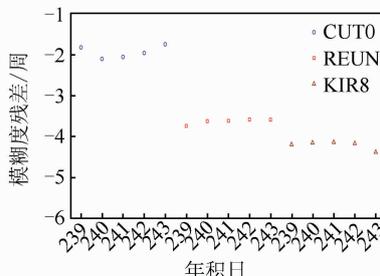
Fig. 9 Difference Between C07 Ionospheric Delay Resolution and GIM Correction

图 10 C14 电离层延迟解算值与 GIM 改正值的对比

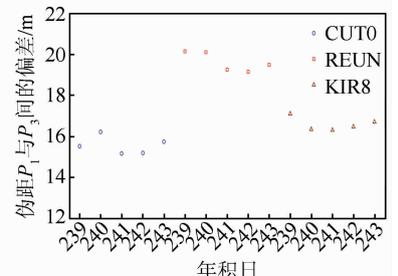
Fig. 10 Difference Between C14 Ionospheric Delay Resolution and GIM Correction



(a) 超宽巷模糊度残差



(b) 宽巷模糊度残差



(c) 码伪距无几何组合偏差

图 11 超宽巷、宽巷模糊度残差及码伪距无几何组合均值

Fig. 11 Mean Value of EWL/WL Ambiguity Residual And code Pseudo-range GF Combination

卫星端和接收机端码硬件延迟总量短周期内变化总体比较平稳, 周日变化标准偏差不超过

0.3 m。虽然其在数量级上可达到 10 m, 但在定位解算过程中由于其平稳性可被接收机钟差等参

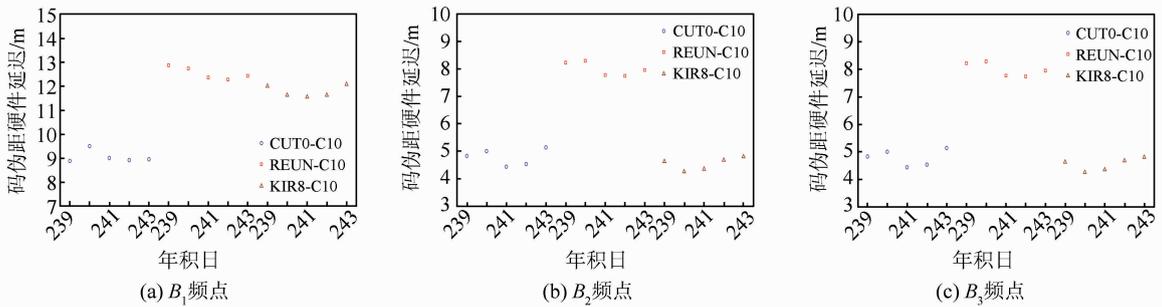


图 12 3 个监测站卫星端和接收机端各频点伪距码硬件延迟总量

Fig. 12 Sum of Satellite and Receiver Code Hardware Delay on Different Frequency

数吸收。利用已分离的高精度、稳定的码硬件延迟信息进行临短预报,可以辅助 MW 组合模糊度的固定,提高无几何模式下三频模糊度固定的准确性和效率。

3 结 语

由于超宽巷组合的波长较长, MW 组合超宽巷模糊度受到码硬件延迟的影响大小一般不超过 0.22 周,平滑后能实现单历元固定。MW 组合宽巷模糊度易受到码硬件延迟和观测噪声的影响,其变化幅度达到了 2~3 周。在超宽巷模糊度固定条件下利用 GIM 产品对相位宽巷无几何组合进行电离层延迟改正以辅助解算宽巷模糊度,同 MW 组合宽巷模糊度相比具有更小的观测噪声,能实现单历元固定,且避免了 MW 组合模糊度的系统性偏差。

模糊度固定条件下电离层延迟重构值相较 GIM 模型改正值存在约 1 m 的系统性偏差,等效改正精度约为 6TECU。

利用电离层延迟重构值和 MW 组合模糊度固定残差分离的码硬件延迟总量在数量级上能达到 10 m,但其变化标准偏差不超过 0.3 m。利用其短周期内的平稳性进行预报可辅助 MW 组合模糊度的固定,提高无几何模式下三频模糊度固定的准确性和效率。

参 考 文 献

[1] He Haibo. Precise Kinematic GPS Surveying and Quality Control[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2002(何海波.高精度 GPS 动态测量及质量控制[D]. 郑州:信息工程大学, 2002)

[2] Yuan Yunbin. Study on Theories and Method of Correcting Ionospheric Delay and Monitoring Ionosphere Based on GPS[D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics Chinese Academy of Sciences,

2002(袁运斌.基于 GPS 的电离层监测及延迟改正的理论与方法的研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院, 2002)

- [3] Zhang Hongping. Study on Method of Correcting Ionospheric Delay and Ionosphere Monitoring in Chinese Region Based on GPS[D]. Shanghai: Shanghai Observatory Chinese Academy of Sciences, 2006(章红平.基于地基 GPS 的中国区域电离层监测与延迟改正研究[D]. 上海:中国科学院上海天文台, 2006)
- [4] H-Pajares M, Juan J M, Sanz J. The IGS VTEC Maps A Reliable Source of Ionospheric Information Since 1998[J]. *J Geod*, 2009, 83(11):263-275
- [5] Ruan Rengui, Wu Xianbing, Feng Laiping, et al. Single-Frequency Precise Point Positioning with Simultaneous Ionospheric Delay Estimation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(4):490-495(阮仁桂, 吴显兵, 冯来平等.同时估计电离层延迟的单频精密单点定位方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(4):490-495)
- [6] Deng Jian, Pan Shuguo, Hong Zhuozhong. A Resolution Method for Ionospheric Delay with Optimal Combination of Three-frequency Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(5):600-604(邓健, 潘树国, 洪卓众.利用三频数据最优组合求解电离层延迟的方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(5):600-604)
- [7] Li Bofeng, Shen Yunzhong, Zhou Zebo. A New Method for Medium and Long Rang 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] Li Jinglong. BDS/GPS Multi-frequency Real-time Kinematic Positioning Theory and Algorithms[D]. Zhengzhou: 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)
- [9] Wang Huarun, Chai Hongzhou, Xie Kai. Study of

- Cycle-Slip Detection Using BDS Triple-frequency Geometry-Free and Ionosphere-Free Combination [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(3):406-411(王华润, 柴洪洲, 谢恺. 北斗三频无几何、消电离层组合周跳探测方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(3):406-411)
- [10] Xie Kai. Research on Ambiguity Resolution Based on BDS Triple-frequency[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2014(谢恺. 基于北斗三频的模糊度解算方法研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2014)
- [11] Yanming F. GNSS Three Carrier Ambiguity Resolution Using Ionosphere-reduced Virtual Signals[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82:847-862
- [12] Spits J, Warnant R. Total Electron Content Monitoring Using Triple Frequency GNSS: Results with Giove-A/-B data [J]. *Adv Space Res.*, 2011, 47: 296-303

BDS Triple-frequency Ionospheric Delay and Code Hardware Delay Estimation Method

WANG Huarun^{1,2} CHAI Hongzhou² WANG Min² PAN Zongpeng²

¹ Measurement Control Station of Taiyuan Satellite Launch Centre, Kelan 036301, China

² Institute of Geographic Space Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Getting precise undifferenced ambiguity resolution is the key issue when obtaining high-precise ionospheric delay with phase observations. Generally, extreme wide-lane (EWL), wide-lane (WL) and narrow-lane ambiguities are needed in the process under triple-frequency conditions. The MW combination wide-lane ambiguity may be fixed into a wrong integer because of the influence of code hardware delay and observation noise. In this paper BDS triple-frequency observation and GIM production are applied to resolve wide-lane ambiguity with a fixed EWL ambiguity and phase geometry-free (GF) combination. In addition, high-precise ionospheric delay is reconstructed and code hardware delay is separated. Test results show that the wide-lane ambiguity fixing success rate rises to 100% when assisted with GIM information, while the ambiguity is free of systemic bias. There is a difference of about 1.0m between the reconstructed ionospheric delay and GIM corrections, meaning an equivalent precision of 6 TECU. The standard deviation of the separated code hardware delay is less than 0.3 m.

Key words: triple-frequency & undifferenced; ambiguity resolution; GIM; ionosphere delay reconstruction; code hardware separation

First author: WANG Huarun, master, assistant engineer, specializes in GNSS measurement data processing, E-mail: 593855433@qq.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41574041, 41604013; the Open Fund of Geographic Information Engineering State Key Laboratory, No. SKLGIE2015-Z-1-1.