

文章编号:1001-1595(2009)04-0296-06

## 中长基线三频 GNSS 模糊度的快速算法

李博峰<sup>1</sup>, 沈云中<sup>1, 2</sup>, 周泽波<sup>1</sup>

1. 同济大学 测量与国土信息工程系, 上海 200092; 2. 国家测绘局 现代工程测量重点实验室, 上海 200092

## A New Method for Medium and Long Range Three Frequency GNSS Rapid Ambiguity Resolution

LI Bofeng<sup>1</sup>, SHEN Yunzhong<sup>1, 2</sup>, ZHOU Zebo<sup>1</sup>

1. Department of Surveying and Geo-informatics Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Advanced Surveying Engineering of State Bureau of Surveying and Mapping, Shanghai 200092, China

**Abstract :** Future three frequency GNSS does bring some benefits to higher success rate and reliability of rapid ambiguity resolution. Nevertheless, the existent three carrier ambiguity resolution methods cannot be competent to ambiguity resolution in the long-range scenario. In this contribution, the key to restricting ambiguity resolution is investigated by analysing the optimal combinations of three frequencies for long-range baselines and the result shows that residual tropospheric delay is the key factor. Based on the understanding for each type of errors in long-range baselines, a new method is developed to perform long-range three frequency GNSS ambiguity resolution. In new method, two ultra-widelane combinations are real-time implemented and their integer ambiguities can be achieved with high success rate, and then a new geometry-free and ionosphere-free combination is formed by two former ultra-widelane combinations with fixed ambiguities and one arbitrary narrowlane combination. In principle, the new combination is distance-independent and free of any systematic errors except random noise and, therefore combined ambiguity can be successfully fixed by rounding off the average float ambiguity over several epochs. Finally, the third frequency GPS signals are generated based on the real dual-frequency GPS data sets from US CORS to demonstrate the correctness of the proposed concepts and the efficiency of the new method.

**Key words :** GNSS; Three Carrier Ambiguity Resolution (TCAR); optimal combination; tropospheric delay; Ionospheric delay

**摘 要:** 通过研究三频最优组合观测值, 分析制约中长基线三频模糊度快速解算的主要因素是残留对流层延迟。在此基础上, 提出一种中长基线三频模糊度快速解算新方法, 该方法先以较高成功率快速固定两个超宽巷模糊度, 然后用这两个模糊度固定的超宽巷组合与任一窄巷组合构成无几何误差和无电离层延迟的新组合。由于该组合只受随机噪声的影响, 通过对多历元浮点模糊度平均值舍入取整即可准确地固定中长基线的窄巷模糊度。最后基于 GPS 双频观测数据生成的三频数据, 验证了本文观点的正确性和新算法的有效性。

**关键词:** 全球导航卫星系统; 三频模糊度解; 最优组合; 对流层延迟; 电离层延迟

中图分类号: P228.4 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40674003, 40874016); 现代工程测量国家测绘局重点实验室开放基金(TJES0809)

## 1 引 言

未来全球导航卫星系统(GNSS)将发射3个或者3个以上频率的载波信号。现代化的GPS将开通L5载波信号, GALILEO系统将发射4个频率的载波信号。研究表明采用多频载波观测值可提高快速模糊度解的成功率和可靠性, 提高局部的、区域的、乃至全球性的GNSS实时定位精度。

模糊度解算是实现快速、高精度定位的关键, 一直是GNSS研究的热点。传统的单频和双频GPS模糊度解算方法都是以加权最小二乘残差

平方和最小为准则, 通过大量搜索模糊度备选组合来实现<sup>[1-8]</sup>。然而, 多频GNSS模糊度解算可避开传统搜索方法的复杂计算, 根据不同组合观测值的波长及其误差特点, 采用简单的舍入取整法逐级地固定各组合模糊度, 目前以TCAR(Three Carrier Ambiguity Resolution)和CAR(Cascading Ambiguity Resolution)方法为代表<sup>[9-11]</sup>, 其实这两种方法的实质是等价的, 都是消除几何误差影响的bootstrapping算法<sup>[12]</sup>。文献<sup>[13]</sup>给定不同长度基线对应的电离层延迟、对流层延迟、轨道误差、多路径和观测噪声的量级, 通过综合分析这些误差的影响, 得出了不同多频GNSS系统的

最优组合并推荐了一种 TCAR 算法。文献[14]分析得出单历元短基线三频模糊度解算成功率低的主要原因是 TCAR 算法中第二步的宽巷模糊度很难确定,并采用不同频率模糊度之间的约束条件改进了 TCAR 方法。文献[15]利用模糊度固定的超宽巷和宽巷组合反求电离层延迟,用解得的电离层延迟改正窄巷观测值从而提高单历元窄巷模糊度解的成功率。事实上,采用模糊度固定的超宽巷和宽巷组合求得的电离层延迟严重地受到放大的载波观测噪声的影响,用其对窄巷观测值改正往往会恶化单历元窄巷模糊度的求解[13]。此外,也有大量文献研究了 GALILEO 四个频率载波观测值的最优组合,有的根据给定的目标函数和约束条件求解最优组合[16],有的则根据不同组合解算模糊度的成功率得出最优组合[17]。尽管采用不同的方法,但得到的最优组合基本相同。

现有的 TCAR 算法都是依次固定超宽巷、宽巷和窄巷模糊度,对短基线快速模糊度解的成功率较高,而对于中长基线由于残留系统误差的影响,依然无能为力[13,18-19]。本文首先通过研究三频最优组合观测值,分析了制约中长基线三频模糊度快速解算的主要因素是残留对流层延迟,且随着距离的增长,影响更为严重。在此基础上,提出了一种中长基线三频模糊度快速解算方法。该算法先以较高成功率快速固定两个超宽巷模糊度,然后用这两个模糊度固定的超宽巷组合与任一窄巷组合构成 Geometry-free 和 Ionosphere-free 的新组合。该组合只受随机噪声的影响,通过对多历元浮点模糊度平均值四舍五入取整即可准确地固定中长基线的窄巷模糊度。最后采用文献[19]提出的方法,生成较接近实际观测环境的三频数据,验证了本文观点的正确性和新方法的有效性。

## 2 三频 GNSS 组合理论与制约中长基线 TCAR 因素分析

### 2.1 三频 GNSS 组合理论

不失一般性,假设三个载波频率依次为  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_5$ , 满足  $f_1 > f_2 > f_5$  且  $f_1 - f_2 > f_2 - f_5$ 。顾及长基线双差残留对流层、电离层和轨道误差的影响,则双差相位组合观测方程为[19]

$$\Delta\Phi_{(i,j,k)} = \Delta\rho + \Delta\delta_{\text{orb}} + \Delta\delta_{\text{tro}} - \beta_{(i,j,k)} \frac{\Delta K}{f_1^2} - \lambda_{(i,j,k)} \Delta N_{(i,j,k)} + \Delta\epsilon_{\Phi_{(i,j,k)}} \quad (1)$$

其中,相位组合观测值为

$$\Delta\Phi_{(i,j,k)} = \frac{i \cdot f_1 \cdot \Delta\Phi_1 + j \cdot f_2 \cdot \Delta\Phi_2 + k \cdot f_5 \cdot \Delta\Phi_5}{i \cdot f_1 + j \cdot f_2 + k \cdot f_5} \quad (2)$$

组合系数  $i, j, k$  为任意整数,  $\Delta\Phi_i$  ( $i=1,2,5$ ) 为频率  $i$  上的双差相位观测值,  $\Delta\rho$  为双差卫地距,  $\Delta\delta_{\text{tro}}$ ,  $\Delta\delta_{\text{orb}}$  和  $\Delta K$  依次为双差对流层延迟、轨道误差和电离层延迟参数。组合模糊度、频率和波长依次为

$$\Delta N_{(i,j,k)} = i \cdot \Delta N_1 + j \cdot \Delta N_2 + k \cdot \Delta N_5 \quad (3)$$

$$f_{(i,j,k)} = i \cdot f_1 + j \cdot f_2 + k \cdot f_5 \quad (4)$$

$$\lambda_{(i,j,k)} = \frac{c}{f_{(i,j,k)}} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_5}{i \cdot \lambda_2 \lambda_5 + j \cdot \lambda_1 \lambda_5 + k \cdot \lambda_1 \lambda_2} \quad (5)$$

$c$  为光速,  $\lambda_i$  为频率  $i$  上的载波波长。组合电离层延迟因子为

$$\beta_{(i,j,k)} = \frac{f_1^2(i/f_1 + j/f_2 + k/f_5)}{f_{(i,j,k)}} \quad (6)$$

组合双差观测值噪声为

$$\Delta\epsilon_{\Phi_{(i,j,k)}} = \frac{i \cdot f_1 \Delta\epsilon_{\Phi_1} + j \cdot f_2 \Delta\epsilon_{\Phi_2} + k \cdot f_5 \Delta\epsilon_{\Phi_5}}{f_{(i,j,k)}} \quad (7)$$

其中,双差观测值噪声  $\Delta\epsilon_{\Phi_i}$  包含了残留多路径和高阶电离层延迟的影响[21]。假设三个频率观测值等精度,即  $\sigma_{\Delta\Phi_1} = \sigma_{\Delta\Phi_2} = \sigma_{\Delta\Phi_5} = \sigma_{\Delta\Phi}$ , 则组合观测值精度为

$$\sigma_{\Delta\Phi_{(i,j,k)}} = \frac{\sqrt{(i \cdot f_1)^2 + (j \cdot f_2)^2 + (k \cdot f_5)^2}}{f_{(i,j,k)}} \sigma_{\Delta\Phi} = u_{(i,j,k)} \sigma_{\Delta\Phi} \quad (8)$$

称  $u_{(i,j,k)}$  为噪声因子。此外,伪距三频组合观测值及其相关组合参数可类似导出。

### 2.2 制约长基线 TCAR 的因素分析

三频最优组合理论已被许多学者采用不同的方法进行了大量的研究,且得到的最优组合基本相同[9-11,13,18],本文以下研究以三频 GPS 为例,研究成果可类似地推广到其他三频 GNSS 系统。表 1 直接给出几组常用的最优组合观测值,其中 No. 1 和 No. 2 为超宽巷组合, No. 3 和 No. 4 为宽巷组合,其余称为窄巷组合。便于直观理解各组合在中长基线情况下的特点,参照文献[13],给定对应基线长度在 100 km 到 500 km 之间的两种不同的双差电离层和对流层精度  $\Delta I = \Delta K/f_1^2$  和  $\Delta\delta_{\text{tro}}$ , 且假定双差轨道精度  $\Delta\delta_{\text{orb}} = 2$  cm, 双差相位观测精度  $\sigma_{\Delta\Phi} = 1$  cm, 按照式(9)计算各组合观测值的精度为

$$\sigma_{TE} = \frac{1}{\lambda_{(i,j,k)}} \cdot \sqrt{\beta_{(i,j,k)}^2 \Delta I^2 + \mu_{(i,j,k)}^2 \sigma_{\Delta\Phi}^2 + (\Delta\delta_{\text{tro}})^2 + (\Delta\delta_{\text{orb}})^2} \quad (9)$$

计算不同精度的系统误差对应的各组合观测值精度  $\sigma_{TE}$  列于表 1 的最后两列。

表 1 GPS 三频最优组合观测值  
Tab. 1 Optimal combinations for three frequency GPS observables

No.	i	j	k	$\lambda_{(i,j,k)}/m$	$\beta_{(i,j,k)}$	$\mu_{(i,j,k)}$	$\sigma_{TE}/周$	
							$\Delta I = 80\text{ cm}$	$\Delta I = 100\text{ cm}$
							$\Delta\delta_{\text{tro}} = 10\text{ cm}$	$\Delta\delta_{\text{tro}} = 15\text{ cm}$
1	0	1	-1	5.861 0	-1.718 6	33.241 5	0.242 0	0.299 8
2	1	-6	5	3.256 1	-0.074 4	103.800 7	0.320 8	0.323 0
3	1	-1	0	0.861 9	-1.283 3	5.742 2	1.198 9	1.500 7
4	1	0	-1	0.751 4	-1.339 1	4.928 2	1.433 7	1.794 7
5	1	0	0	0.190 3	1.000 0	1.000 0	4.238 2	5.314 9
6	0	1	0	0.244 2	1.646 9	1.000 0	5.411 5	6.772 6
7	0	0	1	0.254 8	1.793 3	1.000 0	5.644 8	7.063 2
8	4	-1	-2	0.110 2	0.022 2	2.512 8	0.966 6	1.406 5
9	4	0	-3	0.108 1	-0.009 9	2.605 3	0.976 4	1.423 4

分析表 1 得出:① 不同精度的系统误差对超宽巷模糊度的影响小于 0.33 周,可以高成功率快速固定超宽巷模糊度;② 不同精度的系统误差对宽巷组合的影响超过 1 周,当  $\Delta I = 100\text{ cm}$ ,  $\Delta\delta_{\text{tro}} = 15\text{ cm}$  时,影响超过 1.5 周,显然,如果不减小或消除这些系统误差的影响,宽巷模糊度难以固定;③ 所有的窄巷模糊度都难以求解,但组合 No. 8 和 No. 9 明显较原始观测值更具优越性。事实上,所有的超宽巷和宽巷组合观测值中,只有两个是独立的,一旦固定两个组合模糊度,其余组合模糊度都可简单变换得到,例如,  $\Delta N_{(1,-1,0)} = 5\Delta N_{(0,1,-1)} + \Delta N_{(1,-6,5)}$ , 因此,根本没有必要直接求解宽巷模糊度。其次,窄巷组合 No. 8 和 No. 9 可将电离层误差减小近百倍,因此,对流层误差是制约窄巷模糊度解从而制约中长基线三频模糊度解的主要因素。

### 3 中长基线三频模糊度解算新方法

由于现有 TCAR 方法无法胜任中长基线快速模糊度解算<sup>[13,18-19]</sup>, 本文提出一种适用于中长基线三频模糊度的快速解算方法。先求解两个超宽巷模糊度,采用式(10)求解超宽巷模糊度  $\Delta N_{(0,1,-1)}$

$$\Delta N_{(0,1,-1)} = \left[ \frac{\Delta P_{(0,1,1)} - \Delta\Phi_{(0,1,-1)}}{\lambda_{(0,1,-1)}} \right] \quad (10)$$

其中,  $[ \cdot ]$  代表四舍五入算子。同样假定双差伪距观测值等精度,即  $\sigma_{\Delta P_1} = \sigma_{\Delta P_2} = \sigma_{\Delta P_3} \equiv \sigma_{\Delta P}$ , 则解算的浮点模糊度精度为

$$\sigma_{\Delta N_{(0,1,-1)}} = \frac{1}{\lambda_{(0,1,-1)}} \sqrt{\frac{f_2^2 + f_5^2}{f_{(0,1,1)}^2} \sigma_{\Delta P}^2 + \frac{f_2^2 + f_5^2}{f_{(0,1,-1)}^2} \sigma_{\Delta\Phi}^2} \quad (11)$$

考虑  $\sigma_{\Delta P} = 0.5\text{ m}$ ,  $\sigma_{\Delta\Phi} = 1\text{ cm}$ , 则  $\sigma_{\Delta N_{(0,1,-1)}} \approx 0.083$ 。因此,单历元能可靠地固定中长基线超宽巷模糊度  $\Delta N_{(0,1,-1)}$ 。超宽巷模糊度  $\Delta N_{(1,-6,5)}$  的

求解方法有两种,方法一采用 Geometry-free 组合式(12)计算

$$\Delta N_{(1,-6,5)} = \left[ \frac{\Delta P_{(1,1,0)} - \Delta\Phi_{(1,-6,5)}}{\lambda_{(1,-6,5)}} \right] \quad (12)$$

考虑残留电离层误差的影响,则由上式可以导出求解的浮点模糊度精度为

$$\sigma_{\Delta N_{(1,-6,5)}} = \frac{1}{\lambda_{(1,-6,5)}} \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{f_{(1,1,0)}^2} \sigma_{\Delta P}^2 + \frac{f_1^2 + 36f_2^2 + 25f_5^2}{f_{(1,-6,5)}^2} \sigma_{\Delta\Phi}^2 + (1.209 \cdot \Delta I)^2} \quad (13)$$

取与上文相同的伪距和相位观测精度并假定  $\Delta I = 100\text{ cm}$ , 则  $\sigma_{\Delta N_{(1,-6,5)}} \approx 0.502$ , 对几个历元浮点解平均值四舍五入取整可固定模糊度  $\Delta N_{(1,-6,5)}$ 。方法一计算简单,但成功率偏低,第二种方法基于最小二乘平差原理,观测方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{(1,1,0)} - \Delta\rho_0 \\ \Delta\Phi_{(1,-6,5)} - \Delta\rho_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ \mathbf{A} & \lambda_{(1,-6,5)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta\mathbf{X} \\ \Delta N_{(1,-6,5)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{\Delta P_{(1,1,0)}} \\ \epsilon_{\Delta\Phi_{(1,-6,5)}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中,  $\mathbf{A}$  为设计矩阵,  $\delta\mathbf{X}$  为基线未知参数。按照传统求解模糊度的方法,单历元统一形成误差方程求解模糊度<sup>[5]</sup>。

由于对流层误差是制约中长基线窄巷模糊度求解的关键因素,为了提高窄巷模糊度求解成功率,必须消除对流层的影响,因此,本文采用前面两个模糊度固定的超宽巷组合与一个窄巷组合构成 Geometry-free 和 Ionosphere-free 的新组合式(15)求解窄巷模糊度

$$\Delta N_{(i,j,k)} = \left[ \frac{a_1 \cdot \Delta\tilde{\Phi}_{(0,1,-1)} + a_2 \cdot \Delta\tilde{\Phi}_{(1,-6,5)} - \Delta\Phi_{(i,j,k)}}{\lambda_{(i,j,k)}} \right] \quad (15)$$

其中,  $\tilde{\Delta\Phi}_{(i,j,k)} = \Delta\Phi_{(i,j,k)} + \lambda_{(i,j,k)} \Delta N_{(i,j,k)}$ 。合并不同组合之间相同频率上的观测噪声,则解得浮点

$$\sigma_{\Delta N_{(i,j,k)}} = \frac{\sigma_{\Delta\Phi}}{\lambda_{(i,j,k)}} \sqrt{\left(\frac{a_2 f_1}{f_{(1,-6,5)}} + \frac{i \cdot f_1}{f_{(i,j,k)}}\right)^2 + \left(\frac{a_1 f_2}{f_{(0,1,-1)}} - \frac{6a_2 f_2}{f_{(1,-6,5)}} + \frac{j \cdot f_2}{f_{(i,j,k)}}\right)^2 + \left(\frac{5a_2 f_5}{f_{(1,-6,5)}} - \frac{a_1 f_5}{f_{(0,1,-1)}} + \frac{k \cdot f_5}{f_{(i,j,k)}}\right)^2} \quad (16)$$

在满足 Geometry-free 和 Ionosphere-free 的条件下求解系数  $a_1$  和  $a_2$ ,并计算浮点模糊度精度,结果见表 2。由于宽巷模糊度可从超宽巷求解,所以也计算了两个宽巷和一个窄巷的组合结果。显然,选择任一窄巷组合得到的精度相同,都为

模糊度精度(STD)为

10.135 2周。值得注意的是,该组合只受随机观测噪声的影响,不随基线长度的变化而变化,因此通过对多历元浮点模糊度平均值四舍五入取整即可准确地固定中长基线的窄巷模糊度。

表 2 无几何误差和无电离层影响的组合观测值  
Tab. 2 Geometry-free and ionosphere-free combinations

被选组合			$a_1$	$a_2$	STD/m	STD/周
No. 1	No. 2	No. 5	-0.653 5	1.653 5	1.928 7	10.135 2
No. 1	No. 2	No. 6	-1.046 9	2.046 9	2.475 1	10.135 2
No. 1	No. 2	No. 7	-1.135 9	2.135 9	2.582 7	10.135 2
No. 1	No. 2	No. 8	-0.058 8	1.058 8	1.116 6	10.135 2
No. 1	No. 2	No. 9	-0.039 2	1.039 2	1.096 0	10.135 2
No. 3	No. 4	No. 5	41.922 1	-40.922 1	1.928 7	10.135 2
No. 3	No. 4	No. 6	53.516 7	-52.516 7	2.475 1	10.135 2
No. 3	No. 4	No. 7	56.139 1	-55.139 1	2.582 7	10.135 2
No. 3	No. 4	No. 8	24.398 5	-23.398 5	1.116 6	10.135 2
No. 3	No. 4	No. 9	23.822 9	-22.822 9	1.096 0	10.135 2

### 4 算例分析

数据来源于美国密歇根州南部的 CORS 站,采样率为 1 s,所有计算采用 24 h 观测数据,截止高度角为  $15^\circ$ ,计算前采用对流层经验模型改正了原始观测数据。采用文献[19]提出的方法,生成较为接近实际观测环境的三频数据,用于试验分析。首先分别计算三条不同长度基线的双差对流层延迟,如图 1 所示,不同灰度对应不同的双差卫星。随着基线增长,对流层误差迅速增大,53 km,78 km 和 155 km 对应的对流层延迟变化范围分别为 10 cm,18 cm 和 25 cm;同时由于大范围空间大气分布差异较大,对流层延迟受参考卫星的影响非常明显,图 1 中对流层延迟的跳跃正是因参考卫星的更换所致。结合表 1 和上文分析,表明对流层延迟的确是影响窄巷模糊度解的主要因素。

为了验证超宽巷模糊度求解具有高成功率,单历元求解长度不等的 5 条基线的超宽巷模糊度  $\Delta N_{(0,1,-1)}$  和  $\Delta N_{(1,-6,5)}$ ,基线长度和求解采用的公式见表 3。定义模糊度成功率为模糊度全部成功固定的历元数与总历元数之比。显然,所有基线的  $\Delta N_{(0,1,-1)}$  单历元成功率为 100%;尽管采用式

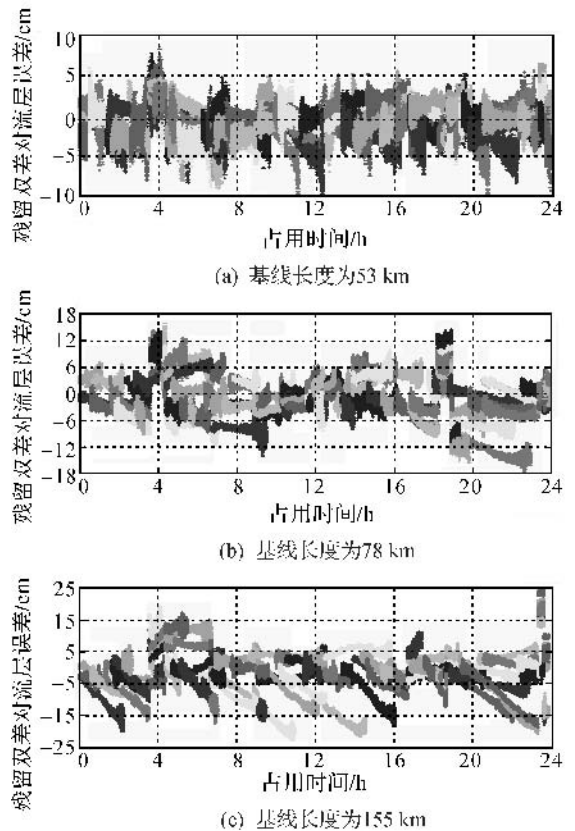


图 1 残留双差对流层误差

Fig. 1 Residual double differenced tropospheric errors

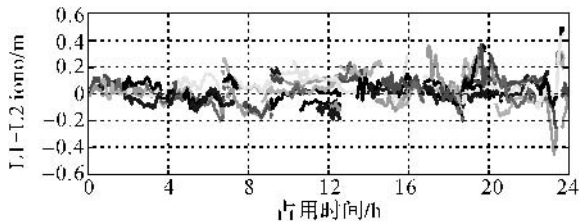
表3 不同长度基线单历元超宽巷模糊度成功率

Tab.3 Epochwise success rate of ultra-widelane combinations for different long baselines

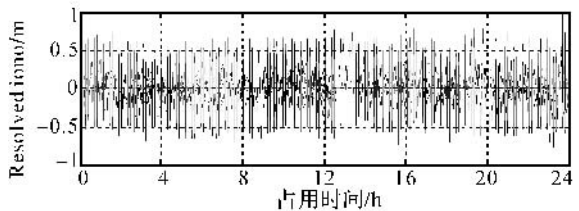
求解公式	单历元成功率/(%)				
	78 km	98 km	120 km	155 km	200 km
$\Delta N_{(0,1,-1)}$ 式(10)	100	100	100	100	100
$\Delta N_{(1,-6,5)}$ 式(12)	100	100	99.99	99.98	99.91
$\Delta N_{(1,-6,5)}$ 式(14)	100	100	100	100	100

$$\sigma_{\Delta I} = \frac{\sigma_{\Delta\Phi}}{\beta_{(0,1,-1)} - \beta_{(1,-6,5)}} \sqrt{\frac{f_1^2}{f_{(1,-6,5)}^2} + \left(\frac{f_2}{f_{(0,1,-1)}} + \frac{6f_2}{f_{(1,-6,5)}}\right)^2 + \left(\frac{f_5}{f_{(0,1,-1)}} + \frac{5f_5}{f_{(1,-6,5)}}\right)^2} \quad (18)$$

同样取  $\sigma_{\Delta\Phi} = 1$  cm, 则  $\sigma_{\Delta I} = 83.08$  cm。显然, 求得的双差电离层延迟精度非常差, 用其对窄巷组合改正并不能达到预期效果。图 2 给出了 155 km 基线的双差电离层延迟结果比较, 不同灰度对应不同的双差卫星, 图 2(a) 表示用模糊度固定的 L1 和 L2 观测值反求的双差电离层延迟, 理论上该结果的精度约为双差相位观测值精度的 2.78 倍, 因此可准确地反映双差电离层延迟信息; 图 2(b) 是用两个超宽巷组合反求的双差电离层延迟, 显然, 电离层延迟信息已被噪声淹没。



(a) 模糊度固定的双差L1和L2观测值反求的双差电离层延迟



(b) 模糊度固定的超宽巷组合观测值反求的双差电离层延迟

图2 155 km 基线的双差电离层延迟比较

Fig. 2 Comparison of DD ionospheric delay for 155 km baseline

最后, 验证新方法的核心部分, 即解算中长基线窄巷模糊度的有效性。从表 2 可以看出, 选择任一窄巷组合与两个超宽巷或宽巷组合构成的新组合观测值等精度(以周为单位), 因此, 本文选择表 2 中的第一个组合 No. 1, No. 2 和 No. 5 构成

(12) 计算  $\Delta N_{(1,-6,5)}$  的成功率略低于采用式(14), 但总体而言, 所有基线  $\Delta N_{(1,-6,5)}$  单历元成功率几乎达到 100%, 如果采用几个历元观测数据联合求解, 则能可靠地固定更长基线的  $\Delta N_{(1,-6,5)}$ 。

如上文所述, 一旦两个超宽巷模糊度固定, 则可反求双差电离层延迟

$$\frac{\Delta K}{f_1^2} = \frac{\Delta\tilde{\Phi}_{(0,1,-1)} - \Delta\tilde{\Phi}_{(1,-6,5)}}{\beta_{(1,-6,5)} - \beta_{(0,1,-1)}} \quad (17)$$

得到的双差电离层延迟精度为

新组合试验, 统计窄巷模糊度解的成功率与时间的关系。由于新组合只受随机噪声的影响, 通过多历元窄巷浮点模糊度取平均, 然后四舍五入取整即可固定。如图 3 所示, 经过 3 min 处理, 成功率即可大于 99%, 6 min 的成功率即可达到 100%。值得注意的是, 新组合不受任何系统误差的影响, 理论上可适用于任意中长度基线。

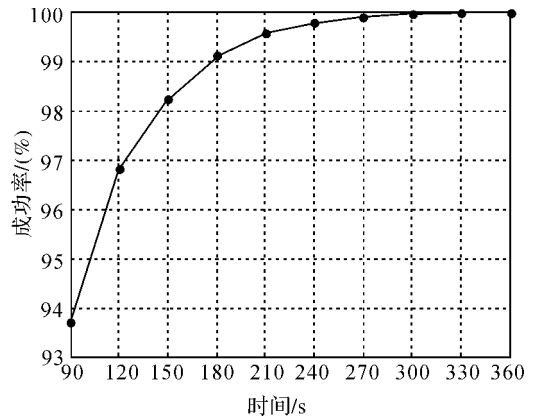


图3 窄巷模糊度成功率与时间的关系

Fig. 3 Success rate of narrowlane ambiguities versus the used time

### 5 结论

本文通过研究三频最优组合观测值, 分析了制约中长基线三频模糊度快速解算的主要因素, 在此基础上, 提出了中长基线三频模糊度解算新方法, 并采用现有的双频观测数据生成了三频数据, 计算验证了本文提出的观点的正确性和新方法的有效性, 得出以下结论:

1. 对流层误差是制约中长基线三频模糊度解算的主要因素, 也是现有 TCAR 算法不能胜任长基线解算的主要原因。
2. 三频超宽巷模糊度求解模型简单, 且单历

元解算成功率较高。

3. 用两个模糊度固定的超宽巷组合反求的双差电离层延迟精度非常差,用其对窄巷组合改正并不能达到快速求解窄巷模糊度的效果。

4. 一旦两个超宽巷模糊度固定,新方法约 6 min 可固定中长基线的窄巷模糊度,该方法可类似地应用于其他多频 GNSS 系统中长基线模糊度解算。

## 参考文献:

[1] FREI E, BEULTER G. Rapid Static Positioning Based on the Fast Ambiguity Resolution Approach 'FARA': Theory and First Results[J]. Manuscript Geodesy, 1990, 15: 326-356.

[2] HATHCH R. Instantaneous Ambiguity Resolution[C]//Proc of KIS'90. Banff:[s. n.],1990:99-308.

[3] EULER H, LANDAU H. Fast Ambiguity Resolution on-the-fly for Real-time Applications[C]//Proc 6th Int Geodetic Symp. Columbus:[s. n.], 1992: 650-659.

[4] CHEN D. Fast Ambiguity Search Filtering (FASF): A Novel Concept for GPS Ambiguity Resolution[C]//Proc ION GPS-93, 6th Int Tech Meeting of the Satellite Division of the U. S. Institute of Navigation. Salt Lake City:[s. n.],1993: 781-787.

[5] TEUNISSEN P. A New Method for Fast Carrier Phase Ambiguity Estimation[C]//Proc IEEE PLANS' 94. Las Vegas;IEEE,1995: 562-573.

[6] PARK C, KIM I, LEE J G, et al. Efficient Ambiguity Resolution Using Constraint Equation [C]//Proc IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium. [s. l.];IEEE,1996: 277-284.

[7] SHEN Yunzhong, LI Bofeng. Regularized Solution to Fast GPS Ambiguity Resolution[J]. Journal of Surveying Engineering, 2007,133(4):168-172.

[8] LI Bofeng, SHEN Yunzhong. Prior Baseline Information Based Fast GPS Ambiguity Resolution[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2008,37(4):423-427. (李博峰,沈云中.基于基线先验信息的GPS模糊度快速解算[J].测绘学报,2008,37(4):423-427.)

[9] FORSSELL B, HARRIS R A, MARTIN-NEIRA M, et al. Carrier Phase Ambiguity Resolution in GNSS-2 [C]//Proc of ION GPS-97. Kansas City:[s. n.],1997: 1727-1736.

[10] VOLLATH U, BIRNBACH S, LANDAU H, et al. Analysis of Three Carrier Ambiguity Resolution(TCAR) Technique for Precise Relative Positioning in GNSS-2 [C]//Proc of ION GPS-98. Toulouse:[s. n.],1998: 417-426.

[11] HATCH R, JUNG J, ENGE P, et al. Civilian GPS: the Benefits of Three Frequencies[J]. GPS Solution, 2000, 3(4):1-9.

[12] TEUNISSEN P, JOOSTEN P, CHRISTIAN T, et al. A Comparison of TCAR,CIR and LAMBDA GNSS Ambiguity Resolution[C]//Proc of ION GPS. Portland:[s. n.], 2002: 2799-2808.

[13] FENG Yanming. GNSS Three Carrier Ambiguity Resolution Using Ionosphere-reduced Virtual Signals[J]. Journal of Geodesy, 2008, 82(12): 847-862.

[14] FAN Jianjun, WANG Feixue. A Method for GNSS Three Frequency Ambiguity Resolution Based on Short Baselines [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(1): 43-49. (范建军,王飞雪.一种短基线GNSS的三频模糊度解算(TCAR)方法[J].测绘学报,2007,36(1):43-49.)

[15] WU Yue, FU Xiaolin, LI Haijun, et al. Application of TCAR/MCAR Method in Different Baseline Ambiguity Resolution[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan Univ., 2007, 32(2): 172-175. (伍岳,付小林,李海军,等. TCAR/MCAR方法在不同距离基线模糊度求解中的应用[J].武汉大学学报:信息科学版,2007,32(2):172-175.)

[16] LI Bofeng, SHEN Yunzhong. Optimal Combination of Galileo Inter-frequencies[C]//Proc of VI Hotine-Marussi Symp. on Theoretical and Computational Geodesy. Berlin;Springer,2008:195-199.

[17] JI S, CHEN W, ZHAO C, et al. Single Epoch Ambiguity Resolution for Galileo with the CAR and LAMBDA Methods[J]. GPS Solution, 2007, 11:259-268.

[18] RICHERT T, EI-SHEIMY N. Optimal Linear Combinations of Triple Frequency Carrier Phase Data from Future Global Navigation Systems[J]. GPS Solution, 2007, 11: 11-19.

[19] LI Bofeng. Generation of Third Code and Phase Signals Based on Dual-frequency GPS Measurements [C]//ION-GNSS 2008. Savannah:[s. n.],2008:2820-2830.

[20] HOFMANN-WELLENHOF B, LICHTENEGGER H, COLLINS J, et al. Global Positioning System: Theory and Practice [M]. 5th ed. New York: Springer Verlag, 2001.

[21] KIM D, LANGLEY R. Estimation of Stochastic Model for Long-baseline Kinematic GPS Applications[C]//Presented at the ION National Technical Meeting. Long Beach:[s. n.],2001:22-24.

(责任编辑:郭新新)

收稿日期:2008-05-04

修回日期:2009-04-16

第一作者简介:李博峰(1983—),男,博士生,研究方向为数据处理,GNSS理论与应用。

First author: LI Bofeng (1983—), male, PhD candidate, majors in theory of surveying data processing, GPS theory and application.