

# 利用改进的相位平滑伪距公式求解网络 RTK 宽巷模糊度方法研究

王伟亮<sup>1</sup>, 高成发<sup>1</sup>, 潘树国<sup>2</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 仪器科学学院, 江苏 南京 210096)

## Wide-lane Ambiguity Resolution of Network RTK Based on Improved Carrier Phase Smoothed Pseudorange

WANG Weiliang, GAO Chengfa, PAN Shuguo

**摘要:** 针对目前宽巷模糊度求解常用方法中双频 P 码与相位观测值线性组合法受伪距观测值噪声影响较大、宽巷组合定义法无法削弱双差电离层影响而使基线距离受限的不足, 提出一种利用改进的相位平滑伪距公式求解网络 RTK 宽巷模糊度方法。试验结果表明, 该平滑方法可以准确地求解出宽巷模糊度浮点解, 尤其适用于电离层差异较大的长基线宽巷模糊度的求解, 为基础载波模糊度的求解奠定了基础。

**关键词:** 相位平滑伪距; 网络 RTK; 宽巷模糊度

为准确地估计空间相关误差, 网络 RTK 解算的前提是参考站间双差模糊度的正确固定, 一旦正确确定模糊度, 则相当于得到了厘米级甚至毫米级精度的伪距观测值。目前网络 RTK 模糊度求解常用“三步法”, 即先利用宽巷组合的长波特特性确定宽巷模糊度, 然后估计对流层延迟干湿分量, 利用电离层无关组合分离出 L1 模糊度并通过卡尔曼滤波进行参数估计<sup>[1-3]</sup>, 而宽巷模糊度的正确求解是整个算法的前提。

目前宽巷模糊度求解的常用方法有双频 P 码与相位观测值线性组合法和宽巷组合定义法, 但观测值线性组合法受伪距观测值噪声影响较大, 宽巷组合定义法无法削弱双差电离层影响而使基线距离受限。本文针对上述不足, 提出一种利用改进的相位平滑伪距公式求解网络 RTK 宽巷模糊度的方法, 首先对相位平滑伪距公式进行改进, 加入电离层的影响, 然后将平滑后的伪距代入观测值线性组合法中求解宽巷模糊度, 并利用天津 CORS 数据在中长基线与长基线上分别进行了试验与分析。

### 一、宽巷模糊度的求解

宽项模糊度的固定主要有两种方法: 一种是宽项组合定义求解法, 解算结果主要受大气误差(双差电离层)的影响; 另一种是双频 P 码和相位观测值线性组合法, 解算结果主要受伪距精度的影响。

由于宽巷波长较长, 在宽巷浮点解求得之后直接四舍五入求宽巷的固定解。

#### 1. 宽项组合定义求解法

根据双频宽巷组合观测值的定义, 可以把宽巷模糊度表示为式(1)<sup>[1]</sup>

$$\Delta \nabla N_w = \Delta \nabla \varphi_1 - \Delta \nabla \varphi_2 - \frac{1}{\lambda_w} \left( \Delta \nabla \rho - \Delta \nabla O - \Delta \nabla T - \Delta \nabla M - \frac{f_1}{f_2} \Delta \nabla I - \Delta \nabla \varepsilon \right) \quad (1)$$

式中,  $\Delta \nabla(\cdot)$  为双差算子;  $N_w$  为宽巷模糊度;  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为 L1、L2 波段载波相位观测值;  $f_1$ 、 $f_2$  为 L1、L2 波段的频率;  $\lambda_w = c/(f_1 - f_2)$  为宽巷观测值的波长;  $\rho$ 、 $O$ 、 $T$ 、 $I$ 、 $M$ 、 $\varepsilon$  分别为卫地距、轨道误差、对流层延迟、电离层延迟、多路径效应及观测噪声。

在 CORS 系统参考站网络中, 卫星轨道误差和多路径效应影响可忽略不计, 卫地距可以精确计算得到, 故在上式中  $\Delta \nabla N_w$  主要受电离层与对流层的双差残差影响。双差对流层延迟可以通过模型予以削弱, 但双差电离层影响却难以削弱, 因此, 上述模型对基线长度有严格的限制, 对超过一定长度的基线不适用。另外, 在中长基线中, 当基线两端双差电离层影响较大时, 该方法也不适用。

#### 2. 双频 P 码和相位观测值线性组合法

采用双频 P 码和相位观测值的线性组合法求

收稿日期: 2011-06-30; 修回日期: 2011-12-23

作者简介: 王伟亮(1988—), 男, 江苏高邮人, 硕士, 主要从事网络 RTK 关键算法及软件研制工作。

解宽巷模糊度

$$\Delta \nabla N_w = \Delta \nabla \varphi_1 - \Delta \nabla \varphi_2 - \frac{1}{\lambda_w} \frac{f_1 \Delta \nabla P_1 + f_2 \Delta \nabla P_2}{(f_1 + f_2)} \quad (2)$$

式中  $P_1$ 、 $P_2$  分别为 L1、L2 波段 P 码伪距值。可以看出,上式消除了电离层、对流层以及几何卫地距影响,忽略多路径效应,上式仅受残余双差观测噪声的影响,因此该法不受基线距离的限制,在长基线上依然适用。但该法求解中伪距噪声影响很大,因此为准确求解宽巷模糊度,必须对该法中的伪距观测噪声进行削弱,而相位平滑伪距方法是较为理想的方法。

## 二、相位平滑伪距

一般而言,相位的观测精度比较稳定,而伪距的精度随接收机和观测环境的不同差异很大。相位平滑伪距即利用高精度的相位观测值来对伪距观测值的噪声进行削弱,该方法具有原理简单、可以有效抑制多路径和噪声的影响、易于实现的特点,应用越来越广泛。

### 1. 传统的相位平滑伪距公式

传统的相位平滑伪距公式为<sup>[4]</sup>

$$\bar{P}(t_k) = wP(t_k) + (1-w) [\bar{P}(t_{k-1}) + \lambda\varphi(t_k) - \lambda\varphi(t_{k-1})] \quad (3)$$

式中  $\bar{P}(t_k)$ 、 $\bar{P}(t_{k-1})$  分别为  $t_k$ 、 $t_{k-1}$  时刻的伪距平滑值;  $w$  为权值;  $\lambda$  为波长;  $\varphi(t_k)$ 、 $\varphi(t_{k-1})$  分别为  $t_k$ 、 $t_{k-1}$  时刻的载波观测值。

对于权值的确定,主要有逐步递减法、Hatch 滤波法<sup>[5]</sup>。上述平滑公式由于忽略了第  $k$  个历元的电离层折射误差相对于前  $k$  个历元平均值的差异,在电离层变化剧烈时,平滑的效果不佳。笔者利用该平滑公式求解的宽巷模糊度依然有较大偏差,主要是该平滑公式中未考虑电离层的影响。因此,为顾及电离层的影响,笔者对相位平滑伪距公式进行了重新推导,加入了电离层的影响。

### 2. 改进的相位平滑伪距公式

GPS 载波相位和伪距观测方程可表示为

$$P = \rho + C \cdot \Delta t + I + T + M_p + \varepsilon_p \quad (4)$$

$$\Phi = \lambda\varphi = \rho + C \cdot \Delta t - I + T + M_\varphi + \varepsilon_\varphi + \lambda N$$

式中  $P$  为伪距观测值;  $\rho$  为卫星与接收机天线之间的几何距离;  $C$  为光速;  $\Delta t$  为钟差;  $I$  为电离层延迟;  $T$  为对流层延迟;  $M_p$  为伪距多路径效应;  $\varepsilon_p$  为伪距噪声;  $\lambda$  为载波波长;  $\varphi$  为伪距观测值;  $M_\varphi$  为载波多路径效应;  $\varepsilon_\varphi$  为载波噪声;  $N$  为整周模糊度。

在保持对 GPS 卫星连续跟踪且没有周跳发生

的情况下,在相邻两个历元  $t_{k-1}$ 、 $t_k$  之间对相位观测值求差,可以消除整周模糊度的影响

$$\Delta\Phi(t_k, t_{k-1}) = \Delta\rho(t_k, t_{k-1}) - \Delta I(t_k, t_{k-1}) + \Delta\varepsilon_\varphi(t_k, t_{k-1}) \quad (5)$$

在相邻两个历元  $t_{k-1}$ 、 $t_k$  之间对伪距观测值求差,可以得到

$$\Delta P(t_k, t_{k-1}) = \Delta\rho(t_k, t_{k-1}) + \Delta I(t_k, t_{k-1}) + \Delta\varepsilon_p(t_k, t_{k-1}) \quad (6)$$

将式(4)代入式(5)可得相位平滑伪距的公式为

$$\bar{P}(t_k) = P(t_{k-1}) + \Delta\Phi(t_k, t_{k-1}) + 2\Delta I(t_k, t_{k-1}) \quad (7)$$

$\Delta I(t_k, t_{k-1})$  可以利用双频相位观测值计算出来<sup>[6-7]</sup>

$$\Delta I(t_k, t_{k-1}) = \frac{\Phi_2(k) - \Phi_1(k) - [\Phi_2(k-1) - \Phi_1(k-1)]}{\frac{f_1^2}{f_2^2} - 1} \quad (8)$$

因此,改进后的相位平滑伪距公式为

$$\bar{P}(t_k) = wP(t_k) + (1-w) [\bar{P}(t_{k-1}) + \lambda\varphi(t_k) - \lambda\varphi(t_{k-1}) - 2 \cdot \frac{\Phi_2(k) - \Phi_1(k) - [\Phi_2(k-1) - \Phi_1(k-1)]}{\frac{f_1^2}{f_2^2} - 1}] \quad (9)$$

## 三、改进的相位平滑伪距求解宽巷模糊度

宽项组合定义求解法求得的宽巷模糊度  $\Delta \nabla N_w$  主要受双差电离层的影响,因此,当基线两端双差电离层影响较大时,该方法不适用。

采用双频 P 码和相位观测值的线性组合法求解宽巷模糊度,消除了电离层、对流层以及几何卫地距影响,忽略了多路径效应,上式仅受残余双差观测噪声的影响(主要是伪距噪声比载波相位影响)。因此,可以利用改进的相位平滑伪距公式求出的伪距代入观测值线性组合法中求解宽巷模糊度,这样求解出的宽巷模糊度考虑了电离层的影响,且直接单历元即可求出宽巷模糊度。

## 四、试验与分析

为了验证本文提出的利用改进的相位平滑伪距公式求解网络 RTK 宽巷模糊度方法的效果,笔者进行了如下试验。

### 1. $w$ 权值的选取

如前所述,对于权值的确定,主要有逐步递减法、Hatch 滤波法,为了确定合理的权值,本文对这

两种权值的效果进行了比较,比较结果如图1所示。笔者选取了天津 CORS 中 TJJX、TJSZ 两个站 1 h 数据,基线距离 45 km,采样率 1 s。

从图1可以看出,利用逐次递减定权法平滑伪距求宽巷模糊度,其结果相对于未平滑的结果有一些改善,但是宽巷模糊度波动较大;而 Hatch 滤波定权法平滑伪距求宽巷模糊度,其结果相对未平滑有很大的改善,宽巷模糊度也较为平滑,因此可以认为 Hatch 滤波定权法是较优的定权方法。

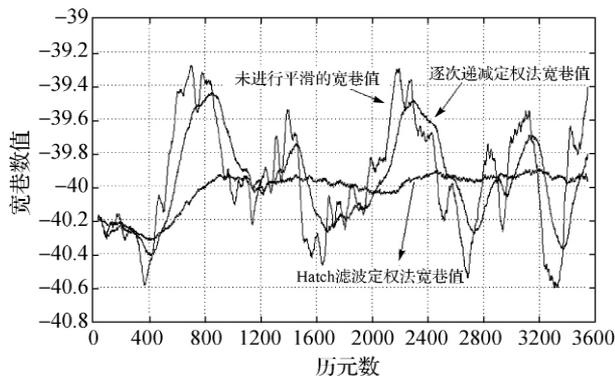


图1 定权方法比较

## 2. 中长基线试验

笔者选取了天津 CORS 中 TJJX、TJSZ 两个站 1 h 数据,基线距离 45 km,采样率 1 s,利用 Hatch 滤波定权法平滑伪距求宽巷模糊度,试验结果如图2所示。

从图2可以看出,在中长基线上,组合定义法求解的宽巷模糊度较为平滑,宽巷模糊度浮点解精度较高;双频 P 码和相位观测值的线性组合法求解的宽巷模糊度偏差很大,很多历元四舍五入求得的宽巷模糊度出现错误;而利用本文提出的平滑方法求得的宽巷模糊度在后面的历元上非常平滑,几乎为一条直线,这样求得的宽巷模糊度是非常准确的。

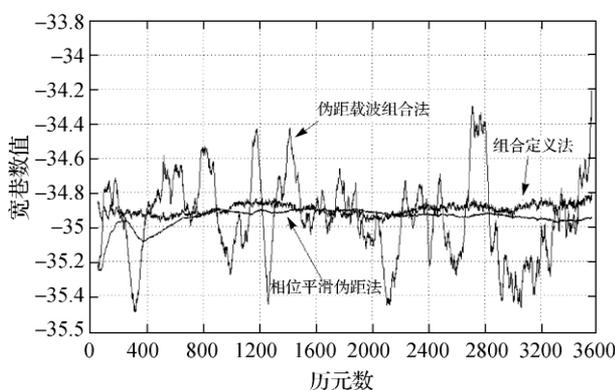


图2 短基线试验结果

试验结果表明,在中长基线上,双频 P 码和相位观测值的线性组合法伪距噪声很大,不能用于求解宽巷模糊度;而由于两个基站双差模糊度相差不大,所以组合定义法与改进的相位平滑伪距法都可以用来求解宽巷模糊度。

## 3. 长基线试验

笔者选取了天津 CORS 中 TJBD、TJDC 两个站 1 h 数据,基线距离 100 km,采样率 1 s,利用 Hatch 滤波定权法平滑伪距求宽巷模糊度,试验结果如图3所示。

从图3可以看出,在长基线上,组合定义法求解的宽巷模糊度在后面的历元上出现了明显的下滑,在后面几个历元上四舍五入后出现了错误的宽巷模糊度固定解;双频 P 码和相位观测值的线性组合法求解的宽巷模糊度偏差很大,最大偏差为 2 周;而利用本文提出的平滑方法求得的宽巷模糊度非常平滑,这样求得的宽巷模糊度是非常准确的。

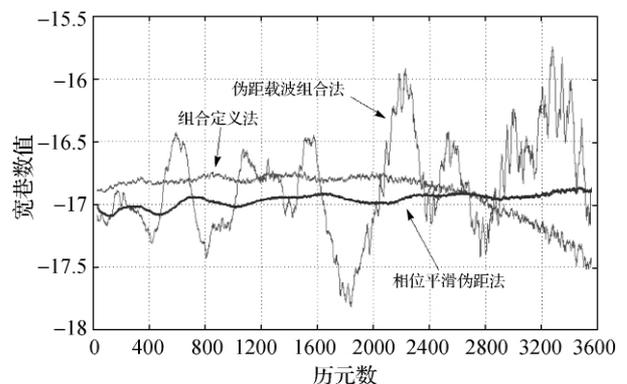


图3 长基线试验结果

试验结果表明,在长基线上,双频 P 码和相位观测值的线性组合法伪距噪声很大,不能用于求解宽巷模糊度;由于基线两端双差模糊度相差较大,组合定义法由于未考虑双差电离层的影响,已经不适用于宽巷模糊度的求解;而改进的相位平滑伪距法可以用来求解宽巷模糊度,且浮点解精度较高。

## 五、结束语

宽巷模糊度的正确求解是网络 RTK 的模糊度求解的前提,目前宽巷模糊度求解常用方法中双频 P 码与相位观测值线性组合法受伪距观测值噪声影响较大,宽巷组合定义法未考虑双差电离层影响、基线距离受限。针对上述不足,本文提出了一种利用改进的相位平滑伪距公式求解网络 RTK 宽巷模糊度的方法,该方法首先对相位平滑伪距公式进行 (下转第 46 页)

续表 1

点号	距离 /km	大地 高差 /m	高程 异常差 /m	正常 高差 /m	正常高差 的平差值 /m	已知 高差 /m	高差 较差[1] /m	高差 较差[2] /m	正常高 平差值 /m	已知 高程 /m	高程 较差 /m	平差值 中误差 /m
GS28	2.1	-33.492	0.056	-33.548	-33.550	-33.562	0.014	0.012	546.283	546.298	-0.015	±0.031
GS29	1.9	-53.506	0.055	-53.561	-53.563	-53.578	0.017	0.015	492.720	492.720	0	±0.031
GS30	1.6	-22.453	0.044	-22.497	-22.498	-22.518	0.021	0.020	470.222	470.202	0.020	±0.030
GS31	2.4	-3.218	0.080	-3.298	-3.300	-3.303	0.005	0.003	466.922	466.899	0.023	±0.029
GS32	2.1	-1.300	0.070	-1.370	-1.372	-1.347	-0.023	-0.025	465.551	465.552	-0.002	±0.028
GS33	2.6	-15.926	0.072	-15.998	-16.000	-15.989	-0.009	-0.011	449.551	449.563	-0.012	±0.027
GS34	1.5	-1.822	0.059	-1.881	-1.882	-1.893	0.012	0.011	447.668	447.670	-0.002	±0.026
GS35	2.4	-0.784	0.088	-0.872	-0.874	-0.872	0	-0.002	446.794	446.798	-0.004	±0.025
GS36	2.3	-2.464	0.097	-2.561	-2.563	-2.579	0.018	0.016	444.232	444.219	0.013	±0.023
GS37	1.8	24.253	0.076	24.177	24.176	24.177	0	-0.001	468.407	468.396	0.011	±0.022
GS38	2.1	37.166	0.068	37.098	37.096	37.091	0.007	0.005	505.504	505.487	0.017	±0.020
GS39	2.2	29.407	0.087	29.320	29.318	29.312	0.008	0.006	534.822	534.799	0.023	±0.017
GS40	2.0	-2.353	0.084	-2.437	-2.439	-2.448	0.011	0.009	532.383	532.351	0.032	±0.014
GS41	1.8	-16.308	0.075	-16.383	-16.384	-16.375	-0.008	-0.009	515.999	515.976	0.023	±0.011
GS42	2.4	-4.978	0.093	-5.071	-5.073	-5.050	-0.021	-0.023		510.926		

## 参考文献:

- [1] 章传银,郭春喜,陈俊勇,等. EGM2008 地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 283-289.
- [2] 张兴福,刘成,刘红新. 利用 GPS/水准数据检核 EGM2008 重力场模型的精度[J]. 测绘通报 2009(2): 7-9.

- [3] 冯林刚,张锁祥,蒙奎文. 基于 EGM2008 模型的重力观测点 GPS 高程转换[J]. 物探与化探, 2010, 34(4): 549-552.
- [4] 冯林刚,杨润甫,李胜. 基于 EGM96 的 GPS 高程转换方法[J]. 测绘通报 2006(3): 22-23.
- [5] 冯林刚,赵军,赵锁志. EGM2008 模型在 GPS 高程转换中的应用研究[J]. 测绘信息与工程, 2009, 34(5): 6-8.

(上接第 43 页)

改进,加入了电离层的影响,然后将平滑后的伪距代入观测值线性组合法中求解宽巷模糊度。试验结果表明,本文提出的方法可以准确地求解出宽巷模糊度解,尤其适用于电离层差异较大的长基线宽巷模糊度的求解,为基础载波模糊度的求解奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 周乐韬. 连续运行参考站网络实时动态定位理论、算法和系统实现[D]. 成都:西南交通大学, 2007.
- [2] 柯福阳,王庆,潘树国,等. GNSS 网络 RTK 算法模型及测试分析[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2009, 39(4): 763-768.
- [3] 黄丁发,周乐韬,刘经南,等. 基于 Internet 的 VRS/

RTK 定位算法模型及实验研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2007, 32(3): 220-224.

- [4] 黄丁发,熊永良,袁林果. 全球定位系统(GPS)——理论与实践[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2006.
- [5] Hatch R R. The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements[C]//Proceedings of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning. New Mexico [s. n.], 1982: 1213-1232.
- [6] 郭建锋,欧吉坤,袁运斌,等. 双频 GPS 数据的最优相位平滑伪距算法研究[J]. 自然科学进展, 2008(2): 221-224.
- [7] 范士杰,孔祥元. 基于 Hatch 滤波的 GPS 伪距相位平滑及其在单点定位中的应用[J]. 勘察科学技术, 2007(4): 40-42.