

Studies on the Integration and Data Processing Technologies of Network RTK Based Low-Cost High Precision Terminal

Weiming Tang^{1,2}, Xiaolin Meng³, Chuang Shi^{1,2}, Fanghua Sun⁴

¹GNSS Research Center, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China

²State key laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, China

³IESSG, University of Nottingham, Nottingham, NG7 2RD, UK

⁴Shanghai GPS Co., Ltd, Shanghai, China

Email: wmtang@whu.edu.cn

Abstract: It is of great significance and commercial potentials in many fields such as precise navigation and precise agriculture to develop hand-held positioning terminals based on the existing network RTK systems and low-cost single frequency GPS receivers. However, there are many difficulties such as fast ambiguity resolution, reliable cycle slip detecting and repairing in the development of such a terminal. The first section of this paper is a brief introduction to the structure of the terminal. Then the second section covers several approaches for fast ambiguity resolution of single frequency receivers and the position computation by three-differenced GPS observables. The results of several tests show that it's difficult to realize fast initialization only carrier phase measurements used. The pseudo-range must be used to assist the initialization and the weight of pseudo-range is very important to fast and precise initialization.

Key words: Network RTK; Low-cost; Single Frequency

网络 RTK 低成本高精度终端集成和数据处理技术研究

唐卫明^{1,2}, 孟晓林³, 施闯^{1,2}, 孙方华⁴

¹⁰武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉, 中国, 430079

²⁰武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉, 中国, 430079

³⁰英国诺丁汉大学 IESSG, NG7 2RD, 英国

⁴⁰上海全球卫星导航有限公司, 上海, 中国, 200092

Email: wmtang@whu.edu.cn

摘要: 网络 RTK 低成本高精度的移动终端在导航、工程测量和精密农业等方面都具有巨大的潜力。开发低成本终端的关键技术是 GPS 单频数据处理问题, 其中快速单频模糊度确定、可靠的单频周跳检测和修复是技术难点。本文首先介绍了低成本终端的组成和结构, 然后对仅用载波相位的单频动态坐标参数消元的模糊度确定算法、单频单历元模糊度搜索方法、伪距辅助的单频动态坐标参数消元算法和三差位置递推方法进行了研究和算例分析。算例结果表明要实现快速的初始化, 需要伪距的辅助, 而伪距的定权又是是否能够实现精确收敛的关键。

关键词: 网络 RTK; 低成本; 单频; 模糊度

1 引言

GPS 定位是一种目前其它技术尚无法替代的重要定位技术。但是, 当前 GPS 手机定位都是采用单点定位模式, 一般只能提供十米左右的定位精度, 仅限于个人娱乐和粗略导航应用。网络 RTK 定位技术是近年来 GPS 定位技术发展的最新成果之一。网络 RTK 系统的数据中心利用在一定区域内建立的少量

GPS 参考站, 通过 GSM/GPRS 无线通讯方式, 为移动用户提供实时高精度的误差改正信息, 以提高用户定位的可靠性、连续性、效率、精度和动态性能。目前世界上许多国家和地区都已建立了自己的网络 RTK 系统, 但是目前用户绝大多数使用的是双频高精度定位终端, 并且用户的数量相对非常有限。同时, 成本高、体积大、重量大是限制了网络 RTK 双频接收机广泛使用。网络 RTK 低成本高精度的移动终端在导航、工程测量和精密农业等方面都具有巨大的潜

^{*}国家高科技 863 计划项目(2006AA12Z326), 武汉市科技局攻关计划(20063003109-06)资助

力。低成本的手持 GPS 接收机只能采用单点定位技术和伪距差分定位技术，无法提供所需要的定位精度。因此研究和开发基于网络 RTK 系统和单频 GPS 接收机具有非常大的应用意义和市场潜力。

目前单频 RTK 接收机主要类型有 Magellan 公司的 ProMark3 RTK 和 DG14, Sokkia 公司的 GSR1700 以及 Ashtech 的 G12E-RTK。由于单频数据处理复杂等原因，目前的单频产品模糊度固定的时间比较长，并且均使用的是价格比较高的测量型的单频 GPS OEM 板。在单频数据处理算法方面，人们常常利用某种约束条件或其他外部的观测量来辅助确定整周模糊度。一些学者对实时动态监测的单历元数据处理方法进行了研究（陈永奇，1998）。也有一些学者基于形变监测变形量小这一特点，研究了特殊的模糊度搜索方案（徐绍铨，2001，李征航，2002）。喻国荣（2004）在动态定位中引入了双空间搜索算法，孙红星（2004）根据双频数据的内在关系和统计特性提出了一种单历元双频数据相关模糊度解算方法。但这些算法仅可以处理双频数据的模糊度确定问题。刘根友（2004）研究了水库形变监测中的形变监测点近似坐标的概略精度指标为 GPS 单历元定位提供了有利条件的 GPS 单历元阻尼 LAMBDA 算法。张小红（2001）提出了利用在变形监测点和基准点上实测的载波相位观测值组成双差观测值(含双差整周模糊度),用变形监测点和基准点较精确的先验位置及卫星位置来计算另一个双差值,从基准点和变形监测点的双差观测值的变异中直接提取出变形矢量。俞文伯（2002）对各历元的法方程进行解耦处理后，综合逼近、搜索两种解法各自的局部优势,构成了逼近搜索的联合解法。

本文在研究低成本终端的结构和组成基础上，着重研究了单频快速模糊度确定、快速初始化和三差位置递推的问题,并进行了相关的算例分析。

2 低成本终端的结构和组成

终端用户系统主要包括 5 个部分，结构如图 1 所示。网络差分数据接收单元，获取系统管理中心提供的网络误差改正数据的入口，一般可以通过公共无线网络、GEO 卫星等获取数据。流动站数据采集单元，采集本地 GNSS 观测数据，由天线单元、GNSS OEM 板、电源、数据输出端口组成。数据解码单元，把数据通讯模块获取的 GNSS 观测数据、改正信息等各种二进制的数，按照指定的格式解译成需要

的观测值和改正数。数据处理单元是终端系统的核心部分，其主要功能是单频数据处理，提供高精度的定位结果。结果的实时输出包括文件保存和端口输出两种方式。

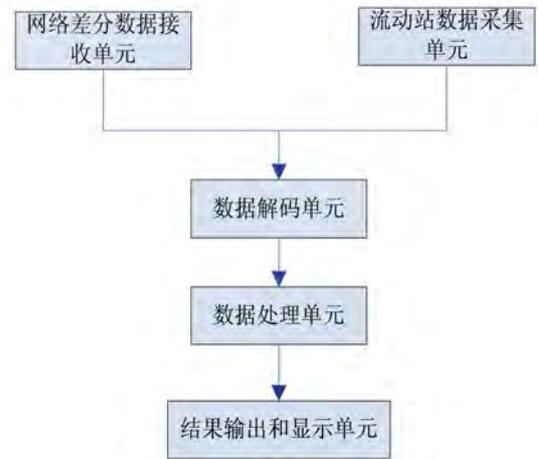


图 1. 终端用户系统组成

根据以上的设计和功，图 2 显示的终端用户原型系统：



图 2. 终端用户系统示意图

其中，PSION 手持终端是参数设置、数据处理和结果显示平台，操作系统为 Embedded Windows，数据处理软件安装其中。PSION 手持终端与“索爱 K510C”通讯模块，通过蓝牙连接，然后再通过“索爱 K510C”通讯模块连接上 GPRS 无线网络后，获取管理中心提供的网络误差改正数。另一方面，PSION 手持终端通过蓝牙连接如 GNSS 主机（Novatel 主板），获取 GNSS 观测值。观测值和改正数都得到以后，PDARover 软件就进行精密单点定位或者是实时相位差分解算。

集成的定位终端集成到一起，另外一种把GNSS主板，网络通讯和数据处理终端集成为手持式的终端，为了能够获取更高精度的观测值数据，可以把GPS天线进行外置。另外为了保证接收信号强度和观测值的质量，最好使用外接天线，如图3所示。分体式设计主要是把定位终端和GPS接收模块分开，之间可以通过有线或者无线的方式进行连接，如图4所示。



图3 集成式定位终端



图4 分体式定位终端

3 单频数据处理算法研究

低成本终端的数据处理算法主要包括三个方面：一是快速初始化，二是周跳探测和修复，三是在数据中断后能够快速的恢复高精度定位。本文主要研究单频数据的快速模糊度确定问题和初始化后的高精度位置保持的问题。

3.1 模糊度的快速确定

在单频快速模糊度确定方面主要分为两类一是一用伪距辅助求解模糊度，前提是具有高质量的伪距观测值。另外一类是直接用车波相位进行求解模糊度，静态最有效的方法是用三差的方法进行初始化，如果是动态的话消元算法进行模糊度确定。

3.1.1 消元算法模糊度确定

1) 消元算法

设在双差模式有如下的观测方程：

$$AX + BY = L + V, P \tag{1}$$

其中 X 是坐标参数矢量， Y 是模糊度参数矢量， P 为权阵， A 坐标参数的系数矩阵， B 为模糊度参数的系数矩阵， L 载波相位观测值， V 为观测值改正数。在动态定位中，每个历元坐标参数矢量 X 是不同的，即随着历元数的增加坐标参数将不断增加。在不发生周跳的情况下，模糊度参数 Y 是不变的。因此可以通过消除 X ，简化观测方程。Wu Chen (2004) 详细地介绍了该消元算法。把方程 (1) 中的 X 消除后可以得到新的观测方程：

$$\bar{B}Y = L + U, P \tag{2}$$

其中 \bar{B} 坐标参数消元变换后的模糊度系数矩阵， U 坐标参数消元后的观测值改正数

2) 算例分析

为了分析和验证单频数据处理方法，文中用到的算例信息如表1所示。

表1 算例数据信息

基线	基线长 (m)	观测时间	接收机类型	采样间隔	历元数
201-205	6.1	2002	Leica 500	10	372
207-213	8.4	2002	Leica 500	10	201
Jy	7.7	2001	Trimble 4700	15	177
1015	6.6	2002	Jawad	1	3671
Ash	10.0	1999	Ashtech Z-X	1	4112
Shi2	16.2	2002	Jawad	1	3242
20090511	1159.8	2009	Leica1200	10	8690
Ublox	1159.8m	2009	Ublox	0.1	6850

按照上面介绍的消元算法动态求解方法，对8个算例进行计算，其收敛和精度时间如表2所示。

表2. 动态坐标消元法收敛精度和时间

序号	基线名称	卫星数	收敛时间及精度 (秒)		
			50cm	20cm	10cm
1	201-205	5	1950	2290	2610
2	207-213	7	1440	1550	1880
3	JY	7	240	510	825
4	1015	6	437	449	627
5	Ash	9	269	435	634
6	Shi2	9	435	492	541
7	20090511	8	607	618	801
8	Ublox	9	750	777	800

从算例的结果可以看出，仅用载波相位单频数据进行初始化，其收敛时间与接收机类型关系不大，另外收敛时间比较长，均需要 5 到 20 分钟左右。因此，仅用载波相位观测数据，难以满足实时运用的需要。

3.1.2 伪距辅助载波相位模糊度确定

1) 伪距辅助载波相位模糊度确定方法

从 3.1.1 中分析可知，仅用载波相位坐标消元算法难以在短时间内（3 分钟）完成动态初始化。因此，充分利用伪距观测值来辅助求解模糊度。设伪距和 L_1 载波相位观测值的双差联合观测方程为：

$$\begin{cases} AX + BY = L_{L1} \\ AX = L_{CA} \end{cases} \quad (3)$$

其中， A 坐标参数的系数矩阵， B 为模糊度参数的系数矩阵， L_{L1} 载波相位观测值， L_{CA} 为伪距观测值。基于方程（3），有两种求解方式，一是不进行消元，使用单历元进行模糊度确定。另外一种如同 3.1.1 中进行模糊度消元方法处理，为了能够运用 CA 码观测值，该中方法是，一是可以首先利用单历元的观测数据解求出基线向量，利用这个基线向量反算出概略模糊度，在把概略模糊度作为观测值加入到方程中。

2) 算例分析

单历元模糊度确定的过程是单历元伪距和单频 $L1$ 载波相位联合求解模糊度浮点解，再用 Lambda 方法搜索模糊度，当 Ratio 值大于等于 3 的情况下，认为固定。同时把解算结果与基线的参考值进行比较，判断模糊度是否固定错误。其中统计结果如下：

表 3. 单历元伪距辅助模糊度求解结果

序号	基线名称	固定率	错误率
1	201-205	28%	8%
2	207-213	7%	29%
3	JY	25%	12%
4	1015	50%	19%
5	Ash	77%	1%
6	Shi2	32%	1%
7	20090511	7%	1%
8	Ublox	2%	50%

从表 3 中可以看出，对于高端的单频接收机，由于伪距质量比较高，单频单历元的模糊度确定成功率在 30%左右。但是对于低成本的 Ublox 接收机，单历元模糊度确定成功率太低，且不可靠，无法实用。

为了能够加快初始化，利用伪距观测值进行辅助，以实现快速初始化，结果如表 4 所示。

表 4. 伪距辅助的消元模糊度确定方法统计结果

序号	基线名称	卫星数	收敛时间及精度（秒）		
			50cm	20cm	10cm
1	201-205	5	10	60	350
2	207-213	7	60	780	1860
3	JY	7	1	570	1095
4	1015	6	2	25	1220
5	Ash	9	15	37	238
6	Shi2	9	216	375	495
7	20090511	8	11	620	781
8	Ublox	9	1113	1264	1312

从表 4 中可以看出，加入伪距方程后，但是测量型接收机收敛到 50cm 的速度为加快，大多在几十秒内就能完成。伪距的权是否给得恰当对于收敛有很大的关系。但是对于收敛到 10cm 精度，加入伪距后改善很小。

3.2 三差位置递推算法研究

3.2.1 三差观测方程

设历元 i 和 $i+1$ 双差观测方程为：

$$\begin{cases} B_i X_i + AY = L_i \\ B_{i+1} X_{i+1} + AY = L_{i+1} \end{cases} \quad (4)$$

其中 B 为基线向量未知数的系数矩阵， A 为模糊度向量的系数矩阵， X 为坐标未知数向量， L 为观测值。设前后历元基线分量的变化值为 ΔX ，则有：

$$X_{i+1} = X_i + \Delta X \quad (5)$$

把式（5）代入到方程（4）中则有：

$$\begin{cases} B_i X_i = L_i \\ B_{i+1} (X_i + \Delta X) = L_{i+1} \end{cases} \quad (6)$$

当是静态的情况下前后历元测站的变化 $\Delta X = \mathbf{0}$ ，因此方程变为：

$$(B_{i+1} - B_i)\Delta X = L_{i+1} - L_i \quad (7)$$

方程（7）就是一般的静态情况下的三差观测方程。

在高采样率的情况下，系数矩阵前后历元变化很小，如果是认为一致的情况下， $B_i = B_{i+1} = B$ ，前后历元的双差方程相减得到高采样率下的三差观测方程：

$$B\Delta X = L_{i+1} - L_i \quad (8)$$

3.2.2 算例分析

2009 年 5 月 11 日在英国诺丁汉用 1 台 Ublox 接收机和两台 Leica 1200 采集数据的 10Hz 的数据，先静止采集了约 15 分钟数据，然后以 30km/h 的速度进行动态数据采集。Leica 1200 采集数据的定位结果用作精度比较的参考。测试设备和动态轨迹如图 5，6

所示:

数据处理的过程为先用静态三差算得比较精确的初始位置，然后动态过程用动态三差的位置递推算法求解。在静态的情况下，观测值数据质量比较好，15分钟左右递推精度在 2cm 左右。在动态情况下，在运动过程中，用三差递推的效果如图 8, 9, 10 所示。



图 5. GPS 天线安装图



图 6. 测试实验车

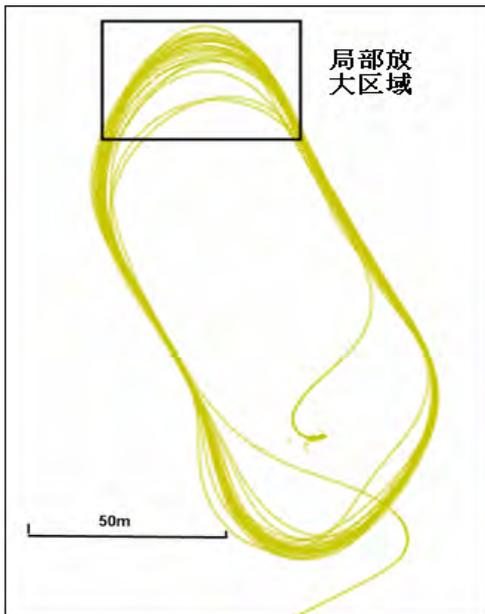


图 7. 测试线路

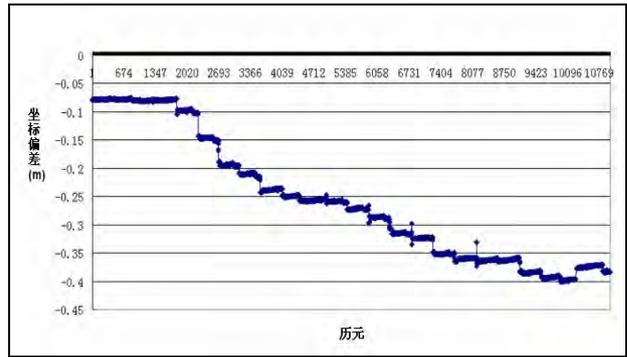


图 8. 三差位置递推平面 x 方向误差图

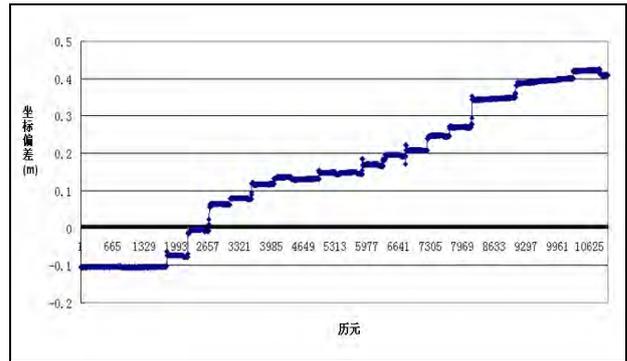


图 9. 三差位置递推平面 y 方向误差图

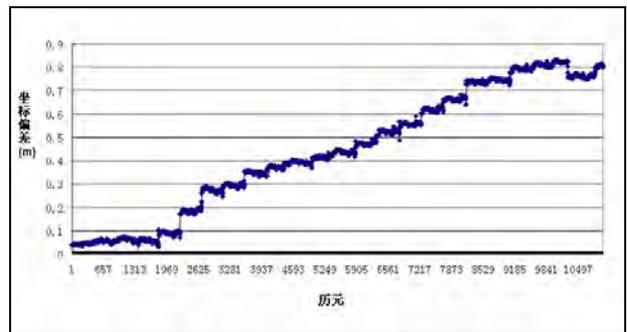


图 10. 三差位置递推高程方向误差图

从图 8, 9, 10 可以看出，三差递位置推出现了一定的跳变，在 15 分钟的运动时间中，平面位置偏差了近 0.6m，在高程方向偏差了近 0.8m。跳变出现一定的周期性现象，分析数据后发现，本次测试的轨迹是一个围绕一个停车场做圆周运动，在右下角一侧有树木遮挡，汽车经过此处时卫星减少到 4 颗左右，因此递推精度受到严重影响。从图中还可以看出，除了跳变处，误差增加比较明显外，其他时段的精度比较稳定，说明在观测数据较好的情况下，三差位置递推的精度不会有较大的衰减。

4 总结

通过本文对低成本终端组成和数据处理方法的研究，可以得到以下结论：

- 1) 低成本终端在精密导航、精密农业等应用领

域具有非常大的应用潜力。

2) 单频单历元模糊度确定的成功率低, 而且不可靠, 通过算例分析来看, 成功率一般低于 30%。

3) 在动态单频数据快速初始化方面, 仅用载波相位观测值初始化时间通常会在 6 分钟到 20 分钟, 难以实用。如果在初始化的过程中加入伪距观测值进行辅助, 对于伪距精度比较高的测量型单频接收机, 可以在 3 分钟之内收敛到 50cm 以内。但是要收敛到 10cm 以内加入伪距后改善并不明显, 同时有可能伪距的不准确初值为影响到最后的收敛精度。因此在给伪距观测值的权应该与其精度相当, 才会有最好的效果。

4) 三差位置递推方法进行导航, 误差有积累的现象, 并且当卫星信号质量不好的历元会带来较大的误差积累。

5) 本文对动态模糊度初始化、单历元模糊度确定和三差位置递推方法进行了研究和算例分析, 如何实现快速而准确的单频动态初始化还需要进一步的研究。

References (参考文献)

- [1] Collierpa. Kinematics GPS for Deformation on Monitoring. Geomatic, 1997, 51(2):157-168.
- [2] Corbett, Crossa. GPS Single Epoch Ambiguity Resolution. Survey Review, 1995, 257(33): 149-160.
- [3] Joosten P., Tiberius C. LAMBDA: FAQs. GPS Solution, 2002,6: 109-114.
- [4] Han, Rizos C. Single-epoch Ambiguity Resolution for Real-time GPS Attitude Determination With The Aid of One-dimensional Optical Fiber Gyro. GPS Solution, 2003,3(1):5-12.
- [5] Teunissen P.J.G. Least-squares Estimation of the Integer GPS Ambiguities. 1993 IAG General Meeting, Beijing, 1993.
- [6] Wu Chen, Congwei Hu et al(2005). Kinematic GPS Precise Point Positioning for Sea Level Monitoring with GPS Buoy Journal of Global Positioning Systems (2004)Vol. 3, No. 1-2: 302-307.
- [7] Zhou Yangmei. A New Approach To The Integer Transformation of GPS High-dimensional Ambiguity Vectors. 2002 International Symposium On GPS/GNSS, Wuhan, 2002.
- [8] 陈小明. 高精度 GPS 动态定位的理论与实践[D]. 武汉:武汉测绘科技大学, 1997.
- [9] 陈永奇. 单历元 GNSS 变形监测数据处理方法的研究[J], 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4).
- [10] 韩保民, 欧吉坤. 一种附约束的单频单历元 GPS 双差相位解算方[J]. 测绘学报, 2003,31(4): 300-304.
- [11] 黄晓瑞, 张浩等. 单频 GPS 载波相位相对定位研究[J], 遥测遥控, 2003,24(6), PP26-29.
- [12] 李征航. 利用 GNSS 进行高精度变形监测的新模型[J], 测绘学报, 2002,31(3).
- [13] 刘根友, 欧吉坤. GPS 单历元定向和测姿算法及其精度分析. 武汉大学学报:信息科学版,2003,28(6):732:735.
- [14] 刘根友, 郝晓光. GPS 单历元阻尼 LAMBDA 算法在水库形变监测中的应用[J], 大地测量与地球动力学, 2004,24(2).
- [15] 孙红星. 差分 GPS/INS 组合定位定姿及其在 MMS 中的应用:[D]. 武汉:武汉大学, 2004.
- [16] 张小红, 李征航, 徐绍铨. 高精度 GPS 形变监测的新方法及模型研究[J], 武汉大学学报·信息科学版, 2001,26(5).