

基于 ARM+FPGA 的相位平滑伪距差分定位方法

温泉源, 纪元法, 孙希延, 符强

(桂林电子科技大学 信息与通信学院; 广西精密导航技术与应用重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:为了满足用户更高的定位精度要求,研究了载波相位平滑伪距差分定位方法.根据差分定位原理,基于 MATLAB 平台自主编制了差分解算软件,兼容北斗和 GPS 伪距差分定位;基于 ARM+FPGA 平台的接收机实现了相位平滑伪距差分定位.实验结果表明,零基线条件下,相位平滑伪距差分算法定位精度可由标准定位的米级水平提高到亚米级,性能稳定.基线距离增大,定位精度随之降低,误差在 ± 4 m 内,差分讯龄和定位精度成正比关系.

关键词:北斗系统;伪距差分;基线;讯龄;ARM+FPGA;载波相位平滑

中图分类号: TN961

文献标志码: A

北斗卫星导航系统发展迅速,单点定位很好地满足了定位实时性要求,但是精度偏低^[1],差分定位方法是提高定位精度的有效手段^[2],现有大部分研究集中于 GPS 差分定位理论层面.本文将对 BD2 载波相位平滑伪距差分进行深入研究,并基于 ARM+FPGA 平台实现差分定位^[1].伪距差分改正数数据量适中,同时考虑到载波相位的高精度特性^[3-4],在适用性和可行性方面具备明显的优势.

1 伪距差分定位原理

伪距差分定位的基本原理是参考站播发伪距改正数,在数据链覆盖范围内的一个或多个流动站利用伪距改正数修正伪距,提升定位精度目的,见图 1.

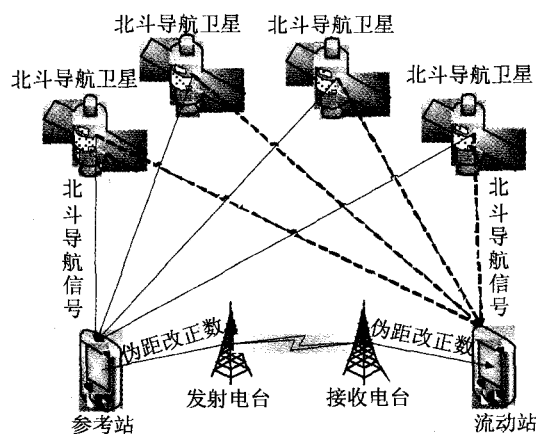


图1 伪距差分定位原理

收稿日期:2016-01-27;修回日期:2016-04-18.

基金项目:国家自然科学基金(61162007;61271284);广西自然科学基金(2013GXNSFA019004);2014 年主任基金(GXKL0614102);广西硕士研究生创新项目(YCSZ2015146).

第 1 作者简介:温泉源(1992-),男,江西赣州人,桂林电子科技大学硕士研究生,研究方向为信号处理、卫星导航, E-mail: wenquanyuan23@sina.com.

通信作者:纪元法(1975-),男,山东莘县人,桂林电子科技大学教授,博士,研究方向为信号处理、卫星导航, E-mail: jiyuanfa@163.com.

1.1 伪距差分数学模型

伪距差分定位原理是基准站播发伪距改正数,流动站利用差分信息改正测量伪距.卫星钟差和星历误差属于公共误差,可以完全消除,电离层误差和对流层误差属于路径误差,短基线内可基本消除^[5-6],从而达到提升定位精度目的.基准站至卫星*i*的测量伪距为 $\rho(t)$,则

$$\rho(t) = \rho_0(t) + c[\delta\tau_r(t) - \delta t_s(t)] + \delta\rho_{\text{eph}}(t) + \delta\tau_{\text{ion}}(t) + \delta\tau_{\text{trop}}(t) + \epsilon(t), \quad (1)$$

其中, t 是北斗时间历元(后文变量省略 t), ρ 为参考站测量伪距, ρ_0 是参考站接收机到卫星的几何距离. $\delta\tau_r$ 为接收机钟差, $\delta\rho_{\text{eph}}$ 是星历偏差引起的伪距误差, $\delta\tau_{\text{ion}}$ 为电离层延时误差, $\delta\tau_{\text{trop}}$ 为对流层延迟误差, c 是光速, δt_s 是卫星星钟相对的总钟差值, $\epsilon(t)$ 是接收机噪声误差.同理,流动站的测量伪距也可由式(1)表示,表示为 $\rho_u(t)$.

参考站位置(X, Y, Z)已知,根据导航文件提供,的星历数据可以计算得到各观测卫星的卫星位置(X^i, Y^i, Z^i),几何伪距

$$\rho_0 = \sqrt{(X - X^i)^2 + (Y - Y^i)^2 + (Z - Z^i)^2}. \quad (2)$$

流动站几何伪距也由式(2)表示,标识为 $\rho_{0,u}(t)$.

相比北斗时间,星钟也存在时间偏差和频率漂移.为确保星钟与北斗时同步,通过下式时钟模型校正卫星时钟差,星钟校正量

$$\Delta\tau_s = a_0 + a_1(t - t_{\text{oc}}) + a_2(t - t_{\text{oc}})^2 + \Delta t_r - T_{\text{GD1}}, \quad (3)$$

其中, a_0, a_1, a_2 来自导航电文, t_{oc} 为时钟参考时间, T_{GD1} 是B1I信号群波延时.这部分参数由导航文件提供, t 是北斗时间. $\Delta\tau_r$ 是相对论校正项,计算模型

$$\Delta t_r = Fe\sqrt{A}\sin E_k, \quad (4)$$

式中, e 为卫星轨道偏心率, A 为轨道长半径, F 为常数,约为 $-4.442\ 807\ 633 \times 10^{-10} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/2}$, E_k 是偏近点角,迭代计算得到.

由式(1),(3)和(4)得到改正钟差后的参考站伪距

$$\rho_{\text{adjust}}(t) = \rho(t) - c[\delta\tau_r(t) - \delta t_s(t)], \quad (5)$$

根据式(2)和(5)得到伪距差分改正量

$$\Delta\rho_{\text{prc}}(t_0) = \rho_0(t_0) - \rho_{\text{adjust}}(t_0). \quad (6)$$

差分改正信息通过数据链传输,从参考站发送伪距改正数时刻 t_1 至流动站接收伪距改正数时刻 t_2 ,这段时间 Δt_1 为传播时间;流动站接收差分信息后,需要进行解码才可以使用, Δt_2 为数据处理时间,那么 $\Delta t_1 + \Delta t_2$ 就是差分讯龄,讯龄越大,误差越大,如图2所示.因此参考站播发伪距改正数的同时,也需要播发伪距改正数变化率 $\Delta\rho_{\text{rrc}}$.伪距改正数变化率和伪距改正数^[7],两者存在如下关系

$$\Delta\rho_{\text{prc}}(t) = \Delta\rho_{\text{prc}}(t_0) + \Delta\rho_{\text{rrc}} \cdot (t - t_0), \quad (7)$$

其中, t_0 是参考站播发差分信息的时间.由式(1),(5),(6)和(7)进一步可得

$$\Delta\rho_{\text{prc}}(t) = -[\delta\rho_{\text{eph}}(t) + \delta\tau_{\text{ion}}(t) + \delta\tau_{\text{trop}}(t)] + \Delta\rho_{\text{rrc}} \cdot (t - t_0) + \epsilon(t). \quad (8)$$

由上式可知,参考站播发的伪距改正数包含星历误差、电离层延迟和对流层延迟误差,差分改正利用空间相关性消除或减小这部分误差.流动站改正后的伪距

$$\rho_{\text{corr}}(t) = \rho_u(t) + \Delta\rho_{\text{prc}}(t). \quad (9)$$

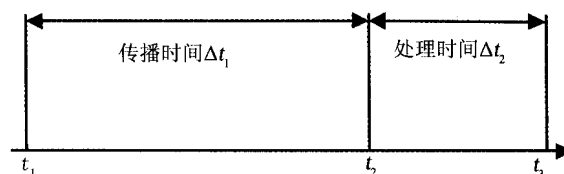


图2 伪距差分讯龄

星历误差和卫星钟差可以被完全消除;短基线内,电离层延时和对流层延时误差也可以被基本消除,因

此修正后的流动站伪距

$$\rho_{\text{corr}}(t) = \rho_{0,u}(t) + c \cdot \delta\tau_u(t) + \Delta\rho_{\text{rrc}} \cdot (t - t_0) + \epsilon'(t). \quad (10)$$

其中, $\epsilon'(t)$ 是接收机噪声引起的误差. 校正后的流动站伪距只包含接收机钟差、接收机噪声引入的测距偏差. 流动站测量伪距已经非常接近真实几何距离. 因此, 达到提高定位精度的目的. 同时, 由式(10) 容易发现讯龄越长, 误差将增大.

1.2 载波相位平滑伪距

粗码测量伪距误差较大, 接收机设计合适的环路控制策略, 伪距测量误差大概是 3 m 左右. 相比之下, 载波相位随机误差仅为 10^{-3} m 级, 包括多路径效应, 随机测量误差也小于 1 cm. 因此, 可以用多历元的载波相位平滑伪距, 达到修正码伪距误差的目的, 称为载波相位平滑伪距. 载波相位平滑伪距是降低码伪距误差, 提高差分定位精度的经典策略. 在不考虑大气层延时误差和接收机热噪声时, t 时刻的伪距测量方程和载波相位测量方程分别为

$$\begin{cases} \rho(t) = \rho_0(t) + c[\delta\tau_r(t) - \delta\tau_s(t)], \\ \varphi(t) = \lambda^{-1} \{ \rho_0(t) + c[\delta\tau_r(t) - \delta\tau_s(t)] \} + N. \end{cases} \quad (11)$$

在载波跟踪环路不失锁的情况下, 载波相位测量值中的周整模糊度 N 在各个时刻的值保持不变, 对相邻两个历元的伪距与载波相位分别进行相减, 则得出

$$\begin{cases} \Delta\rho(t) = \rho(t) - \rho(t-1) = \Delta\rho_0(t) + c[\Delta\delta\tau_r(t) - \Delta\delta\tau_s(t)], \\ \lambda \cdot \Delta\varphi(t) = \Delta\rho_0(t) + c[\delta\tau_r(t) - \delta\tau_s(t)]. \end{cases} \quad (12)$$

在式(12) 中整周模糊度 N 已经抵消, 在不考虑大气层延时误差时伪距变化量 $\Delta\rho(t)$ 与载波相位变化量 (以距离为单位) 理论上应该是相等的. 其中, λ 为北斗 B1I 信号的波长

$$\lambda = 1/f, \quad (13)$$

其中, $f = 1561.098$ MHz. 将两种测量值整合, 即为载波相位平滑伪距测量方法, 其公式为

$$\rho_s(t) = \frac{1}{M}\rho(t) + \frac{M-1}{M}\{\rho_s(t-1) + \lambda[\varphi(t) - \varphi(t-1)]\}, \quad (14)$$

上式中 $\rho_s(t)$ 为历元 t 时刻经载波平滑后的伪距, M 为平滑的时间常数, M 的值越大, 则 ρ_s 的值就越依赖于载波相位变化量, 同时伪距 ρ_s 就越平滑. 将式(1) 中的原始测量伪距采用式(14) 进行载波相位平滑, 即可得到更加平滑的伪距测量量, 进而获得更精确的定位结果.

1.3 误差分析模型

假设流动站在某点 P (流动站) 观测了 N 个历元, 则可以得到 N 个接收机坐标 (X_i, Y_i, Z_i) , $i = 1, 2, \dots, N$, X 方向 RMS 误差计算模型如下

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2}. \quad (15)$$

已知测试点坐标 P 的三维坐标精确位置为 (XYZ) , 即可计算 P 点 RMS 误差

$$\Delta X_{\text{RMS}} = \pm (X_{\text{RMS}} - X). \quad (16)$$

2 ARM+FPGA 接收机设计

基于 ARM+FPGA 的北斗载波相位平滑伪距差分接收机包括射频处理模块和基带信号处理模块^[7-8]. 射频处理模块主要完成低通滤波、下变频和模数转换 (A/D) 工作. 下变频采用广州润芯技术有限公司的 RX3007 芯片, 混频处理将 B1I 信号由 1561.098 MHz 下变频至 4.092 MHz 的模拟中频信号, A/D 变换后得到 2 bit 的数字中频信号. 射频处理模块设计如图 3 所示.

B1I 中频信号送入后级进行基带信号处理. 基带处理主要完成信号捕获、跟踪、导航电文解调和原始观测提取. 在充分考虑系统的实时性和硬件稳定性的基础上, 北斗接收机基带信号处理核心的硬件平台如图 4 所示.

ARM 采用 ST 公司 CortexTM-M3 内核的 STM32F205 芯片, FPGA 采用 Altera 公司 Cyclone IV 系列的

EPC4E22E2208N 芯片. 基带信号处理模块采用温补晶振提供时钟,clk1 为 FPGA 提供 16.368 MHz 的基准工作时钟;clk2 为 ARM 提供 25 MHz 的基准时钟,并通过锁相环配置 ARM 工作主频. 基带处理模块以 ARM 为核心,外设挂载了 FPGA 和 FLASH. ARM 处理器含丰富的通用输入/输出(GPIO)口,因此通过 GPIO 口模拟 FSMC 总线进行数据交互,基于芯片特性交互总线设计为 15 位地址总线 ADDR 和 16 位数据总线 DATA. 数据交互含片选 nCE,读使能 nOE 和写使能 nWE 时序控制信号^[8]. 基于该硬件平台,FPGA 部分主要完成信号的捕获和跟踪工作,并向 ARM 提供精准中断;ARM 部分主要完成环路控制、信号同步、导航定位解算和上位机交互等工作.

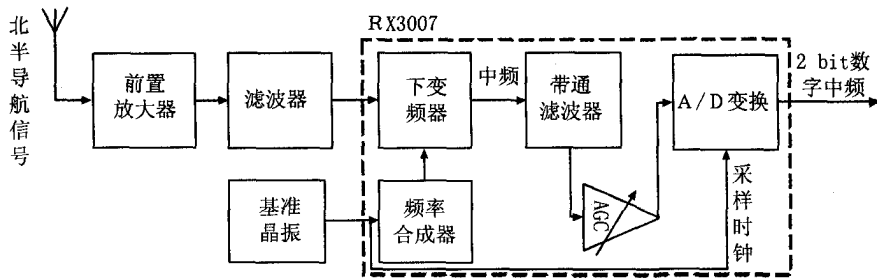


图3 射频处理模块

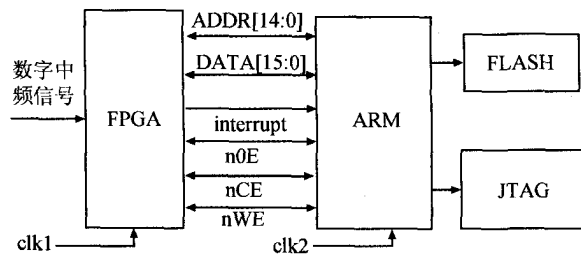


图4 基带处理模块

3 差分解算软件设计

接收机原始观测量采用 RINEX 3.02 数据格式,观测文件中的伪距经过了载波相位平滑处理. 差分信息采用 RTCM v2.3 类型 1 电文格式^[9],每个字 30 bit,为满足串口通信要求,将每个字分成 5 个 6 bit 的字段,高位补充固定的 2 bit“01”,电文采用奇偶校验算法. 类型 1 电文包含伪距改正数 PRC,伪距改正数变化率 RRC,数据期号 IOD,卫星号,修正 Z 计数,比例因子,用户精度因子等信息. 流动站实现差分电文解码,修正流动站测量伪距,实现差分定位. 自主编制差分解算软件,实现了北斗差分解算. 解算软件界面如图 5 所示.

差分解算软件支持北斗/GPS 载波相位平滑伪距差分解算;兼容 RINEX 2.1、RINEX3.02 原始数据;便捷人机交互,查询任意历元差分信息;完善的数据分析与图形处理功能.

4 算例分析

4.1 实验场景及误差分析

在标定的测绘点架设参考站天线,流动站选取不同距离试验点,连续观测,分析相同时间段、相同实验条件下不同试验点的定位差异,验证基线距离对差分定位性能的影响. 采集原始观测量及导航数据,采样间隔为 10 s. 零基线和 17 km 基线条件下,北斗相位平滑伪距差分定位误差分别如图 6、图 7 所示.

由图 6 可知用户终端定位误差在 1 m 左右,性能稳定;由图 7 可知基线距离增加为 17 km 时,误差均值达到了 2 m 左右. 差分定位性能都明显优于标准单点定位. 对比零基线和非零基线定位误差可知相位平滑伪距差分定位性能与空间相关性有关. 基线距离越长,空间相关性越弱,差分修正效果相应减弱,实验结果和

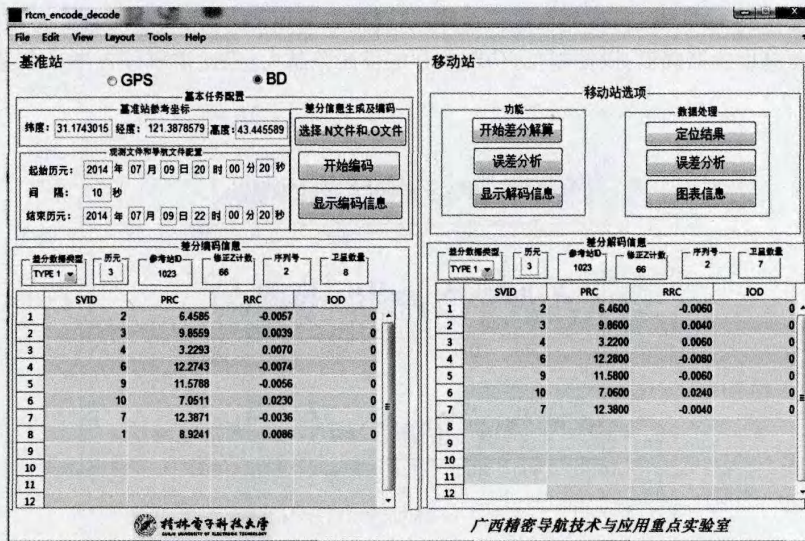


图5 伪距差分计算软件用户界面

式(10)原理描述是一致的。

4.2 讯龄和差分定位的关系

由差分讯龄的推导知道,基线距离增加,定位精度将随之降低,除了空间相关性这一主要因素外,还受到差分数据讯龄这一关键因素的影响.基线距离增加,差分改正数的传播时间同样也随之增大了,虽然可以通过 RRC 进行修正,但拟合精度和实时播发的改正信息存在一定差异.因此,通过北斗 B1I 信号说明差分讯龄和定位精度之间的关系,分别将差分讯龄设置为 0 s,5 s,10 s,20 s,差分讯龄对伪距差分定位精度的影响见表 1.

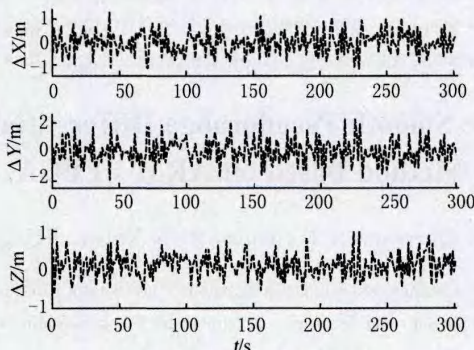


图6 零基线北斗B1I频点定位误差

表 1 差分讯龄和定位中误差的关系

讯龄/s	$\Delta X_{RMS}/m$	$\Delta Y_{RMS}/m$	$\Delta Z_{RMS}/m$
0	0.007	0.005	0.122
5	-0.009	0.017	0.128
10	-0.026	0.022	0.154
20	-0.049	0.038	0.181

5 结论

根据载波相位平滑伪距差分定位原理,基于 ARM+FPGA 平台实现了北斗原始数据输出及定位功能,自主研发的差分计算软件实验结果表明,载波相位平滑伪距差分定位方法基本上消除了卫星钟差、星历误差

以及绝大部分电离层和对流层误差,定位精度明显改善.同时可以得到如下结论:零基线,北斗静态定位相位平滑伪距差分精度达到 10^{-1} m 级,性能稳定且良好;基线距离增加,参考站和流动站空间相关性逐渐减弱,北斗伪距差分定位精度逐渐降低,讯龄越长,伪距差分定位误差越大,因此需要综合考量参考站和流动站之间的距离.

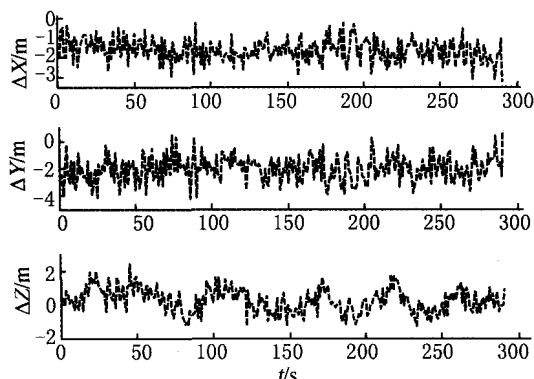


图7 17 km基线北斗B1频点定位误差

参 考 文 献

- [1] 刘增军,郑彬,刘文祥,等.三频载波相位伪距平滑算法分析与比较[J].测绘科学,2012,37(6):15-18.
- [2] ZHANG Jianguo, LI Hongjian, LIU Bin. A precise positioning system based on DGPS and GIS for automatic driving vehicle[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,416:776-780.
- [3] SABO J, SABOVA J. Using of differential global positioning system (Dgps) in instrument flying[J]. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management,2014(2):661-667.
- [4] 徐周. GPS 差分定位技术及实现方法的研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2006.
- [5] 王亚辉,孙中豪,王晓南. GPS 动态精密单点定位与差分定位结果比较[J]. 测绘地理信息,2015,4(8):47-49.
- [6] 李浩军,王解先,胡丛玮. GPS 对流层延迟的历元间差分分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010,3(15):448-452.
- [7] 邢增强,李金海,梁华庆,等. 基于 ARM+FPGA 的 GPS 接收机设计[J]. 传感器与微系统,2011,30(7):108-110.
- [8] 齐建中,张北南,宋鹏. 基于 ARM+FPGA 的三模导航接收机设计[C]. 第五届中国卫星导航学术年会电子文集,南京,2014.
- [9] 胡辉,詹玉广,叶鑫华. 差分 GPS 接收机实现方法研究[J]. 微计算机信息(测控自动化),2009,25(11):45-47.

Carrier Phase Smooth Pseudorange Differential Positioning Method Based on ARM+FPGA

WEN Quanyuan, JI Yuanfa, SUN Xiyan, FU Qiang

(School of Information and Communication Engineering, Guilin University of Electronic Technology; Precision Navigation Technology and Application Laboratory of Guangxi, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to satisfy the user's higher positioning requirements, we studied the carrier phase smoothed pseudorange differential positioning method. According to pseudo-range positioning theory, pseudo-range differential positioning software has been programmed based on MATLAB, which is compatible with BDS and GPS. At the same time, receiver implemented phase smoothed pseudo-range differential positioning based on ARM+FPGA platform. Experimental results show that: the positioning accuracy of phase smoothed pseudo-range differential algorithm can be increased from meter to sub-meter under the zero baseline, and the performance is stable; Baseline distance increases, the positioning accuracy decreases, and the error is within 4 m, and there is a positive correlation between differential age and positioning accuracy.

Keywords: BDS; pseudo-range differential; baseline; differential age; ARM+FPGA; carrier phase smooth