

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.11.020

多项式拟合法在周跳探测中的研究与改进^{*}

裴晶¹ 马颖² 刘春³

(1. 安徽四创电子股份有限公司 合肥 230031; 2. 安徽省机电排灌总站 合肥 230022;
3. 合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘要:针对北斗卫星定位系统(BDS)在载波相位观测中出现的周跳问题,建立改进的多项式拟合模型对载波相位观测中产生的周跳进行探测与修复。该方法采用3个接收机测得与同一颗卫星间的载波相位观测值,同时结合接收机与卫星间的载波相位测出两组单差值,利用一组单差值进行的多项式拟合可获得产生周跳的历元数,结合另一组单差值的多项式拟合可确定哪组载波相位发生周跳,最后对周跳进行修复。通过实验仿真发现,该方法不仅可以测得0.2以上的周跳,也可以测出0.2以上的周跳发生在哪组载波相关观测值中。

关键词:北斗卫星定位系统;周跳探测;载波相位观测值;多项式拟合法

中图分类号: P228 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.1010

Research and improvement of polynomial fitting method in cycle slip detection

Pei Jing¹ Ma Ying² Liu Chun³

(1. Anhui Sun Create Electronics Co. Ltd., Hefei 230031, China; 2. Anhui Electromechanical Irrigation and Drainage Station, Hefei 230022, China; 3. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the problem that the Beidou satellite positioning system (BDS) has cycle slip in the carrier phase observation, the method of improved polynomial fitting model can make cycle slip detection and repair in carrier phase observation. This method uses the carrier phase observations with the same satellite measured by three receivers, combined the carrier with the phase between the receiver and satellite can measure two groups of single difference. Using a set of single difference with polynomial fitting can obtain the epoch number of cycle slip, using another group of single difference with polynomial fitting can determine which group to have carrier phase cycle slip, at the end of the week, repair the cycle slip. The experimental results show that this method not only can measure more than 0.2 jumps, but also can measure more than 0.2 week jump which group of carrier observations occurred.

Keywords: BDS; cycle slip detection; carrier phase observation; polynomial fitting method

0 引言

北斗卫星系统在高精度领域中迅速发展,在我国政府政策推广中得到广泛应用,如交通运输、农业监测、变形检测等^[1]。在北斗精确定位中,主要是以载波相位观测值作为数据处理的对象,研究载波相位观测值时一个

重要的工作就是对载波相位的周跳进行探测和修复,如果发生周跳同时并未及时修复,会影响接收机定位精度,所以拥有正确的载波相位值是决定北斗接收机的作业效率和定位精度的关键因素^[2-3]。

为了对载波相位观测值发生的周跳进行探测与修复,国内外学者进行不断研究,现有的方法如:多种探测和修复周跳的方法:多项式拟合法、多普勒观测值法、

DCPC 法、电离层残差法、MW 组合算法、Blewitt 法等。其中多普勒观测法^[4]探测周跳至少保证前 4~5 个历元没有发生载波相位的周跳,相位伪距组合法^[5]探测周跳能力主要依赖于伪距的测量精度,同时对于单频接收机不适用。美国 Goad 学者提出的电离层残差法^[6]只有在电离层变化缓慢,多效应影响较小的情况下才有效,对于一些特殊周跳也无法探测。如今很多学者致力于多项式拟合法的,文献[7]把载波相位的变化率和多项式拟合结合进行周跳探测,但该方法无法探测周跳发生的位置;文献[8-9]为解决该问题,把单差和多项式拟合结合后,再用非差的载波相位观测值进行周跳探测,但该方法只能识别 1 周以上的周跳发生在哪组载波相关观测值中。本文采用基准站的两个接收机与流动站的一个接收机对同一颗卫星进行观测,对组成的两组单差值进行多项式拟合后比对,该方法不仅可以对周跳进行探测修复,而且可以发现较小周跳发生在哪组载波相位中,通过仿真实验证明该方法效果更佳。

1 周跳的特性与对精度的影响

周跳产生的原因主要有影响接收机产生信号的事物和阻挡卫星和接收机之间连接的事物。如一些楼层、树木、山峰的遮挡,会使信号在传播中出现中断现象,这是产生周跳原因中最普遍现象;接收机发生故障,信号处理中整周计数部分不能正常工作;接收机处于快速运动状态时,卫星锁定信号有时较难,会导致信号暂时失锁。为对周跳进行修复,必须得到完整的载波相位观测值,一个完整的载波相位观测值如式(1)所示。

$$\phi = N_0 + \text{Int}(\phi) + F_r(\phi) = N_0 + \phi \quad (1)$$

式中: N_0 为初始整周模糊度, $\text{Int}(\phi)$ 为整周计数, $F_r(\phi)$ 为整周分数。

由于 N_0 作为未知数要经过相应求解才可以得到,所以实际载波观测值 ϕ 是由整周计数 $\text{Int}(\phi)$ 和整周分数 $F_r(\phi)$ 两个部分组成。整周分数 $F_r(\phi)$ 是不足一个整周的载波相位,该信号是由接收机鉴相器测定,整周计数 $\text{Int}(\phi)$ 它是从 t_0 时刻到 t_i 时刻载波相位整周部分累加得到的。如果在 t_{i-1} 时刻到 t_i 时刻,由于某种因素 $\text{Int}(\phi)$ 停止计数,在 t_i 时刻后又开始恢复计数, $\text{Int}(\phi)$ 在 t_{i-1} 时刻到 t_i 时刻,累加值会少了 ΔN ,载波相位发生整周的跳变,这就是周跳^[10]。

一般在周跳的探测过程中,10 周以上的周跳很容易被探测,并得到修复,但是 5 周以下的周跳,特别是 1 周和半周以下的周跳不容易被发现,同时对定位精度会产生影响。载波相位发生 1 周周跳,据拉查佩利的统计,对经度、纬度、高程影响分别为 $\Delta L = 0.03 \sim 0.06 \text{ m}$, $\Delta B = 0.10 \sim 0.18 \text{ m}$, $\Delta H = 0.14 \sim 0.16 \text{ m}$ 。可见发生 1 周周跳

对定位影响会达到厘米级以上,所以在北斗精确定位中必须对周跳进行探测与修复,这是为了高精度定位奠定基础^[11]。

2 周跳探测与修复算法研究

本文主要研究单频接收机中常用的多项式拟合探测和修复的方法,并且建立相应的改进模型对周跳探测和修复,这种方法在探测周跳的能力和判别发生在哪组载波相位观测值上的能力比较高。

2.1 多项式拟合法探测修复周跳

当没有周跳时,载波相位观测值为一条曲线,周跳出现时刻,曲线发生了阶跃性的跳变,根据载波相位观测值的这种特性,可以用未发生周跳的载波相位拟合一条曲线,并用拟合后的曲线来预测后一个历元的载波相位值,当预测值和真实值超过了设定的偏差,便认为有周跳。根据此原理建立多项式拟合法来探测和修复周跳^[12-13],模型如下。

1) 首先确定前 m 个无周跳的载波相位观测值,同时确定多项式的阶数 n ,如式(2)所示。

$$\varphi = a_0 + a_1(t_i - t_0) + a_2(t_i - t_0)^2 + \dots + a_m(t_i - t_0)^n \quad (2)$$

式中: $a_{0 \sim m}$ 为不同阶的系数项, t_0 为初始时刻, t_i 为第 i 个载波相位观测值的时刻。

2) 建立误差方程(3)对多项式的系数和误差进行计算。

$$V = L - AX \quad (3)$$

式中: L 为前 m 个无周跳载波相位组成的矢量, X 为 n 阶系数项组成的矢量, A 为时间矩阵。根据最小二乘法求解 X :

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (4)$$

3) 根据多项式拟合后的残差,计算残差 σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{V_i V_i}{m - (n + 1)}} \quad (5)$$

4) 利用建立后的拟合公式对下一个历元的载波相位值 $\bar{\varphi}_i$ 进行外推,并把外推的载波相位值和实际的值进行对比,如果 $|\bar{\varphi}_i - \varphi_i| < 3\sigma$,该历元没有发生周跳,如果 $|\bar{\varphi}_i - \varphi_i| > 3\sigma$,该历元发生周跳,周跳大小可通过外推数和真实数之差表示,然后对周跳进行修复,可用外推的载波相位值取代实际的周跳。

5) 当该历元工作已经完成后,去掉最早的一个载波相位观测值,同时加入该历元的观测值再返回 1) 重新进行多项式拟合,外推下一个历元载波相位观测值,直到最后一个历元为止。

2.2 单差与多项式拟合探测与修复周跳

由于北斗卫星的钟差、单频接收机^[14]的钟差和电离

层、对流层误差、多路径效应等的影响,使观测数据产生了奇异性,不利于小周跳的探测^[15],如果要对更小的周跳进行探测和修复,可以把不同接收机的载波相位观测值做差,形成单差,同时结合多项式拟合法进行周跳探测^[17],但该方法无法探测周跳发生在哪组载波相位上,使有些学者把单差和多项式拟合结合后再用非差进行主接收机对载波相位进行探测^[8-9],但此方法依然不能探测出较小周跳发生在哪个接收机与卫星间的载波相位观测值中。因此本文采用改进的模型对周跳探测、修复同时对发生周跳的接收机进行判定。

2.3 改进算法模型描述

通过本文提出的思想建立卫星周跳探测图,如图1所示,是在一颗卫星和一个流动站两个基准站基础上完成的。其流程图如图2所示。

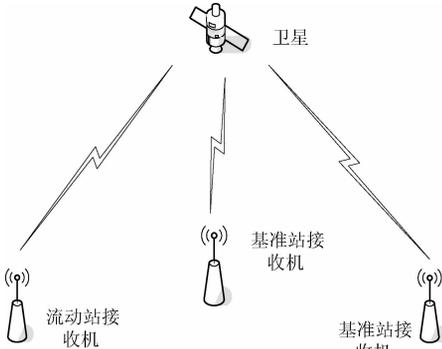


图1 本文模型周跳探测图

Fig.1 The cycle slip detection of the proposed model

如图2为本文方法的周跳探测和修复流程,并对流程图进行具体分析。

1) 首先确定一个流动站、两个基准站和一颗卫星,分别测得流动站、基准站到这颗卫星之间的载波相位观测值。

2) 以第1个流动站为基准,分别测得与第1个基准站和第2个基准站的载波相位观测值组成单差值,此差值为载波相位的变化率。

3) 对两组单差值前 m 组无周跳数据分别进行多项式拟合,用拟合后的外推数据与真实的单差载波数据进行比对。观察第1组数据和第2组数据,如果 $|\bar{\varphi}_i - \varphi_i| < 3\sigma$,认为该历元无周跳发生,去掉第一个观测数据,把观测的下一个数据放入待拟合数据列中,组成 m 组数据,并进行下一次拟合,直到历元全部解算完,若未解算完则返回3)。如果 $|\bar{\varphi}_i - \varphi_i| > 3\sigma$,则认为实际观测值有周跳,利用外推的整周计数代替观测值中有周跳的整周计数,如果周跳发生在第一组数据中转到4),如果第一组数据没有周跳而第二组数据有周跳,可对周跳进行修复,同时不会影响流动站的载波相位和定位精

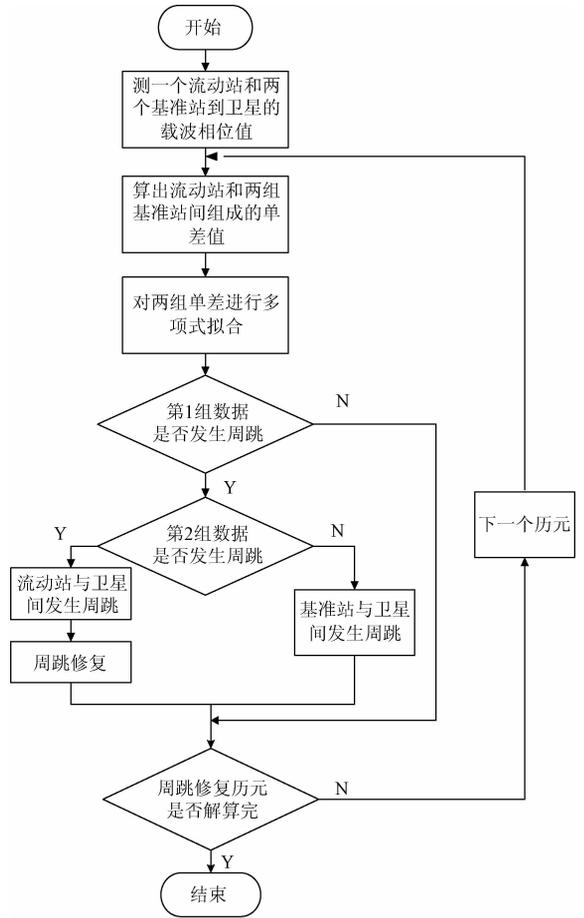


图2 模型流程

Fig.2 Flow chart of model

度。然后转回3)。

4) 观察第二组单差数据,如果 $|\bar{\varphi}_i - \varphi_i| > 3\sigma$,便确定是流动站此时历元发生了周跳,如果 $|\bar{\varphi}_i - \varphi_i| < 3\sigma$,则认为第一个基准站发生了周跳。直至历元解算结束,否则返回3)进行下一个历元的解算。

3 实验仿真及分析

3.1 不同采样率的选择

为了分析多项式拟合法探测周跳的能力,分别采用不同的采样率对周跳进行探测修复,并对其进行比较分析。实验采用1颗卫星500个历元的载波相位观测数据,以1、2、5s的采样频率来提取数据进行观察并分析,如图3所示。

图3(a)~(c)分别以1、2、5s的采样频率进行载波相位变化值进行观察,可以看出,即使没有周跳,各历元 ΔN 变化不为0,会在一定区域内上下波动,这是因载波相位观测受到电离层、对流层等影响。

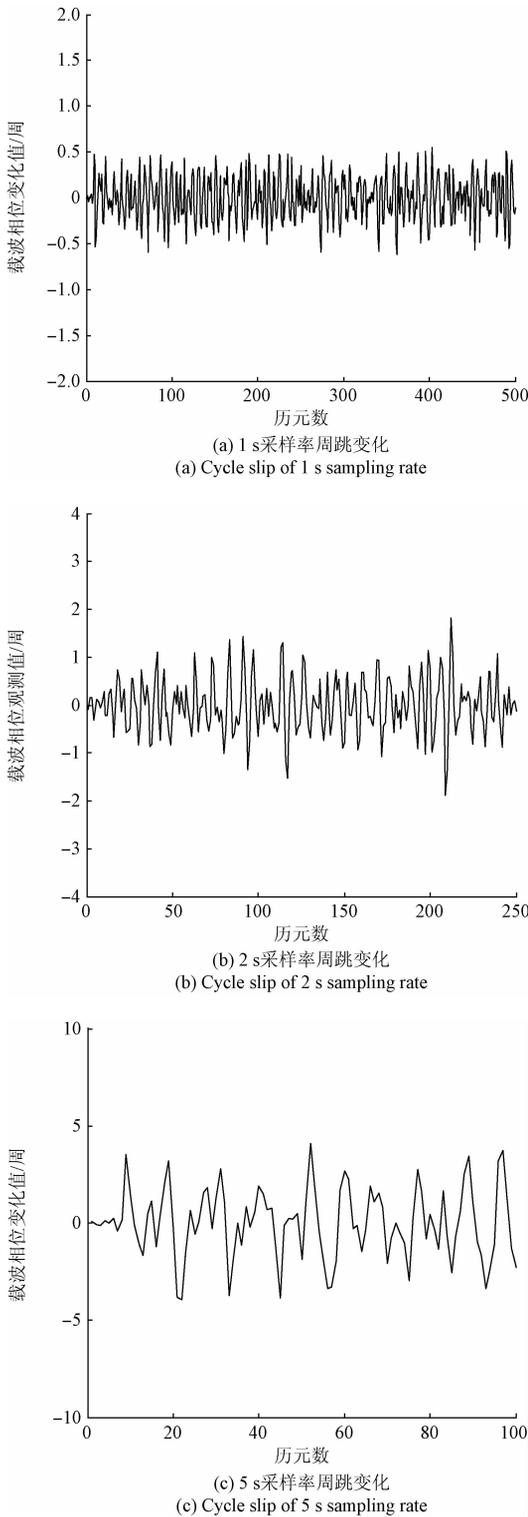


图 3 周跳变化

Fig. 3 The change of cycle slip

通过对 1、2、5 s 采样率的比较,1 s 采样率 ΔN 在 ± 0.5 波动,可以探测出 1 周以上周跳,最大偏差在 0.5 周。2 s 采样率 ΔN 在 ± 1.5 波动,可以探测出 3 周左右

的周跳,最大偏差在 1.9 周左右。5 s 采样率 ΔN 在 ± 4 波动,可以探测出 8 周以上周跳,最大偏差在 4 周。所以多项式拟合法探测周跳选择高采样率探测周跳能力和准确性更强。

3.2 单差与多项式拟合结合实验

把本文提出的方法与采用非差的多项式拟合法(后面称方法 1)、单差的多项式拟合法(后面称方法 2)、单差多项式拟合和非差结合(后面称方法 3)进行仿真实验对比,观测此方法探测周跳的能力和判别发生周跳的卫星能力。如表 1 为实验的仿真参数。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	取值
历元数/个	500
采用周期/s	1
拟合个数 m	8
多项式阶数	3

1) 周跳探测能力

在 3.1 节中得出方法 1 可探测 1 周以上的周跳,同时周跳最大误差可能达到 ± 0.5 周。方法 2、方法 3 和本文方法使用的载波相位观测值的单差进行多项式拟合,实验采用一组单差值进行研究,同时在第 50、150、250、400 个历元上分别加了 0.2 周、0.2 周、0.5 周、0.3 周的周跳,如图 4 所示。

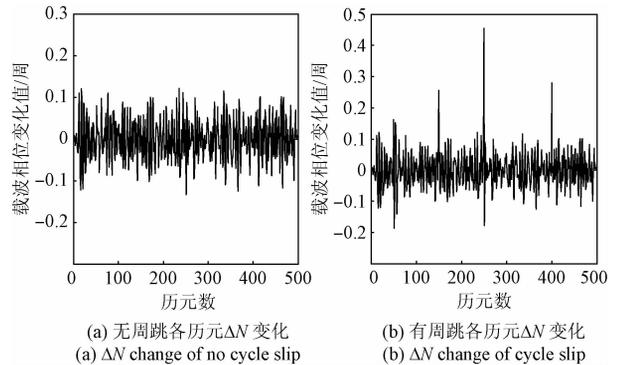


图 4 周跳 ΔN 变化(1 s 采样率)

Fig. 4 The change of cycle slip ΔN (1 s sampling rate)

从图 4 (a) 中看出,历元间的误差 ΔN 会在 ± 0.1 周上下波动,明显要比方法 1 的 ΔN 小很多,因为采用星间单差载波数据可以消除接收机的钟差影响,其他相关误差如电离层、对流层等误差也相应减少。从图 4 (b) 中可以看出,1 s 采样率可探测出在第 150、250、400 历元上发生了 0.256 5 周、0.455 0 周、0.279 6 周,但未探测出第 100 个历元上的 0.2 周跳。所以 1 s 的采样率可以探测

出0.2周左右或以上的周跳,但是由于空间误差的影响,历元周跳探测任存在偏差,有的历元最大可能达到0.1周左右的误差,对0.2周以下的周跳不敏感。

2) 判别发生周跳接收机能力

方法2可判别0.2周以上的周跳,但因载波相位值组成的单差,无法确定哪组载波相位观测值上发生了周跳。利用方法3用非差的方法对主接收机进行周跳判别,本文通过两次实验观察,分别在流动站接收机与卫星间的载波相位其中一个历元上加入1周、0.5周周跳。如图5所示。

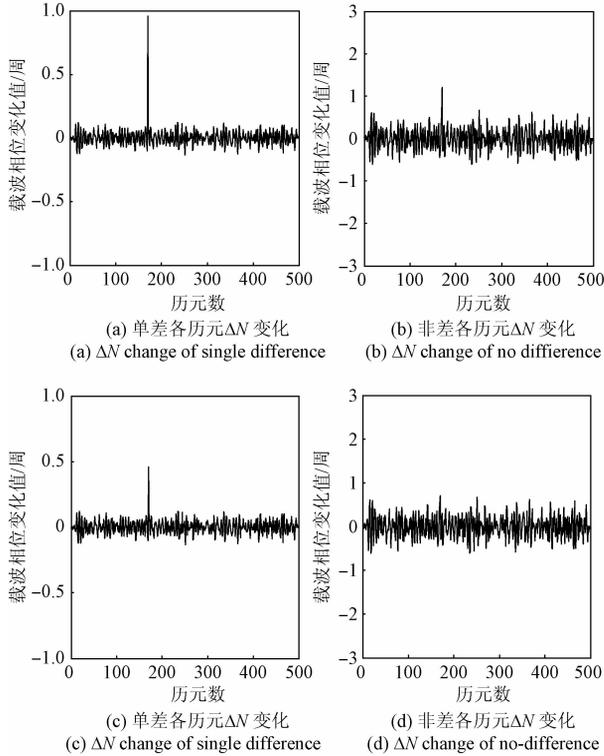


图5 1周跳与0.5周跳ΔN变化

Fig.5 ΔN change of 1 circle cycle slip and 0.5 circle cycle slip

在流动站接收机测得的载波相位上的第170个历元上加入1周周跳,用单差方法如图5(a)所示可判别出,如图5(b)看出流动站接收机在170个历元上有周跳发生,说明方法3可探测1周周跳并确定它在流动站接收机上发生。如果在流动站接收机的第170个历元上加入0.5周周跳,如图5(c)可以判别第170个历元有0.5周周跳发生,但是用非差的方法并没有探测出发生周跳的流动站接收机,说明方法3不适用1周以下周跳发生位置判别。

本文采用一个流动站和两个基准站结合的两次单差法,可对流动站发生的0.5周跳进行判别,如图6所示。

如图6所示,相比方法3,可判断0.5周的周跳发生

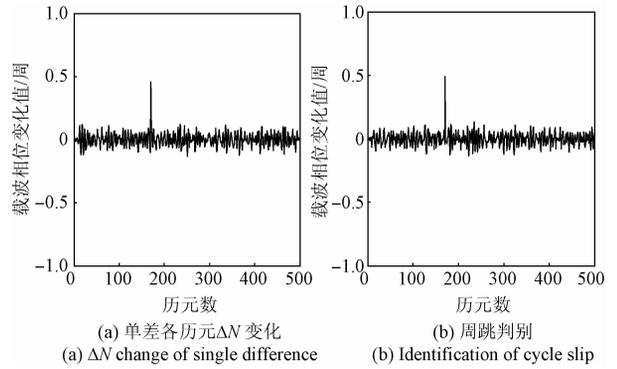


图6 0.5周周跳判别

Fig.6 Distinguish of 0.5 circle cycle slip

在流动站接收机的载波相位上,因本文方法采用3个接收机组成的两组单差值进行判别的,图6(b)是流动站接收机和第2个基准站接收机的单差值,检测中发现0.5周的周跳可确定是流动站接收机发生了周跳,如果没有,确定第1个基准站接收机发生周跳。如图4所示,可知单差可探测0.2周以上的周跳。

3.3 方法比较

如表2所示,对上述研究的几种方法进行了汇总,虽然本文方法需两个基准站接收机,但在精确定位RTK模型工作一般需要需要3个基准站,同时本文在探测发生周跳卫星的能力上要更优。

表2 探测周跳方法对比

Table 2 Comparison of detection method of cycle slip

指标	方法1	方法2	方法3	本文方法
1 s 采样率检测周跳大小	>1周	>0.2周	>0.2周	>0.2周
判别周跳发生位置	是	否	是	是
探测周跳大小	>1周	不能	>1周	>0.2周
所需接收机	1	2	2	3

4 结论

因在北斗精确定位中需要载波相位观测值,但常会出现周跳现象,所以本文对多项式拟合法在周跳探测和修复上进行了具体分析,同时提出利用3个接收机和1颗卫星组成的两组单差和多项式拟合相结合对发生周跳卫星判别同时进行修复,该方法特别在判别发生周跳卫星的能力比现有方法效果好。

参考文献

[1] 张照杰. 网络RTK定位原理与算法研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2007.
 ZHANG ZH J. Principle and algorithm research for GPS network RTK [D]. Qingdao: Shandong University of

- Science and Technology, 2007.
- [2] 张家慧. 基于载波相位实时动态差分的 GPS 精确定位系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015. ZHANG J H. Research on GPS carrier phase real time kinematic precise positioning system[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [3] 滕云龙, 师奕兵. GPS 载波相位测量数据的时间序列分析建模研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 32(9): 18-22. TENG Y L, SHI Y B. Study on modeling of time series analysis for GPS carrier phase measurement data [J]. Journal of electronic measurement and instrumentation, 2009, 32(9): 18-22.
- [4] 任永超, 汪顺喜, 方荣新. 基于多普勒频移的单频载波相位周跳探测 [J]. 测绘信息与工程, 2010, 35(1): 8-10. REN Y CH, WANG SH X, FANG R X. Detection of single-frequency GPS carrier cycle slips based on Doppler frequency shift[J]. Journal of Geomatics, 2010, 35(1): 8-10.
- [5] HAN S. Quality-control issues relating to instantaneous ambiguity resolution for real-time GPS kinematic positioning [J]. Journal of Geodesy, 1997, 71 (1): 351-361.
- [6] GOAD C C. Precise positioning with the global positioning system [C]. Proceedings of the Third International Symposium on Inertial Technology for Surveying and Geodesy, 1985: 745-756.
- [7] 罗峰, 姚宜斌, 宋伟伟. 综合利用多项式拟合和载波相位变化率探测单频 GPS 周跳[J]. 全球定位系统, 2007, 5(4): 9-13. LUO F, YAO Y B, SONG W W. Detection for cycle slips using polynomial fitting and carrier phase rate method[J]. Global Positioning System, 2007, 5 (4): 9-13.
- [8] 关昊. GPS 载波相位周跳探测. 与修复方法的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010. GUAN H. Research on cycle-slip detection and repair of GPS carrier phase position[D]. Fuxin: Liaoning Project Technology University, 2010.
- [9] 李明, 高星伟, 徐爱功. 一种改进的周跳多项式拟合方法[J]. 测绘科学, 2008, 33 (4): 82-83. LI M, GAO X W, XU AI G. An improved method of the polynomial fitting of the cycle slip [J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33 (4): 82-83.
- [10] 雷雨, 高玉平. 单频非差相位的周跳检测与修复方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2484-2490. LEI Y, GAO Y P. Study on cycle-slip detection and repair algorithm in single-frequency un-differenced carrier-phase[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(11): 2484-2490.
- [11] 万军. GNSS 周跳探测与修复融合算法研究[D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2016. WAN J. Research on fusion algorithm of cycle slip detection and correction for GNSS [D]. Beijing: Chinese Academy of Surveying and Mapping, 2016.
- [12] 张晖, 陆敏燕. 单频精密单点定位周跳探测方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38 (1): 132-140. ZHANG H, LU M Y. Study on the method of precise point positioning with single frequency [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2015, 38(1): 132-140.
- [13] 韩维维, 杨晓非, 欧阳君, 等. 环形磁通门的非线性误差及补偿技术[J]. 电子测量技术, 2013, 36(3): 98-101. HAN W W, YANG X F, OUYANG J, et al. Modeling and compensation of ring-core fluxgate's nonlinear error[J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36 (3): 98-101.
- [14] 王军, 董绪荣, 李晓宇, 等. 基于 EGNOS 开放服务的接收机关键技术分析[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11): 34-39. W J, DONG X R, LI X Y, et al. Receiver key technology analysis based on EGNOS open service [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(11): 34-39.
- [15] 扬剑, 李江卫, 吴浩, 等. 单频 GPS 非连续历元周跳处理研究[J]. 测绘科学, 2013, 38(4): 59-61. YANG J, LI J W, WU H, et al. Processing cycle-slip of discontinuous epoch in single-frequency GPS data [J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(4): 59-61.

作者简介



裴晶, 1984 年出生, 现为安徽四创电子股份有限公司助理工程师, 本科学历, 主要研究方向为通信工程。

E-mail: pj_cetc38@126.com

Pei Jing was born in 1984, B. Sc. Now he is assistant engineer in Anhui Sun Create Electronics Co. Ltd. His main research interest is communication engineering.



马颖,2013年于大连民族学院获得学士学位,2016年于合肥工业大学获得硕士学位,现为安徽省机电排灌总站助理工程师,主要研究方向为自动检测技术。

E-mail:mayinghefei@163.com

Ma Ying, received B. Sc. from Dalian Nationalities University in 2013, and M. Sc. from Hefei University of Technology in 2016, respectively. Now she is assistant engineer in Anhui Electromechanical Irrigation and Drainage Station. Her main research interest is automatic detection.



刘春,1988年于哈尔滨理工大学获得学士学位,1996年于浙江大学获得硕士学位,现为合肥工业大学副教授,主要研究方向为检测与自动技术、电工理论与新技术。

E-mail:hfliuchun@126.com

Liu Chun, received B. Sc. from Harbin University of Science and Technology in 1988, and M. Sc. from Zhejiang University in 2016, respectively. Now she is associate professor in Hefei University of Technology. Her main research interests include detection and automatic technology, electrical engineering theory and new technology.