

文章编号: 2095-4980(2020)04-0600-06

联合多普勒及 MW 周跳探测和修复方法

纪元法^{1,2}, 贾茜子^{1,2}, 孙希延^{*1,2}

(1. 桂林电子科技大学 广西精密导航技术与应用重点实验室, 广西 桂林 541004;
2. 卫星导航定位与位置服务国家地方联合工程研究中心, 广西 桂林 541004)

摘要: 导航定位中针对双频码相组合法(MW)无法探测 L_1 和 L_2 载波同一历元发生相同周跳, 以及周跳探测后不能实现频率间周跳分离的情况, 提出了一种联合多普勒及MW组合法的周跳探测改进方法。利用多普勒积分可对单频点进行周跳检测和修复的特性, 将传统MW组合法与多普勒积分法相结合, 建立改进模型, 从而计算并分离出 L_1 和 L_2 载波相位产生的周跳。用实测数据进行验证和分析, 对比了3种不同情况下改进方法的检测效果, 实验表明新算法能精确探测和分离出 L_1 和 L_2 载波相位中的周跳组合, 可以准确探测周跳发生位置及周跳数值, 并且能够探测和修复1周以上的周跳, 有效提高了MW组合算法探测与修复周跳的准确性和可靠性。

关键词: 周跳; 探测和修复; 多普勒; MW 组合

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019071

Joint Doppler and MW cycle slip detection and repair method

JI Yuanfa^{1,2}, JIA Xizi^{1,2}, SUN Xiyan^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China; 2. Satellite Navigation and Location Service National & Local Joint Engineering Research Center, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Melbourne-Wübbena(MW) combination method cannot detect the same cycle slip in the same epoch of L_1 and L_2 carriers, and the cycle slip separation cannot be realized after the sounding of the cycle. An improved method of cycle slip detection based on jointing Doppler and MW combination is proposed. The Doppler integral is applied to detect and repair the cycle slip of single frequency point. Combining the traditional MW method and Doppler integral method, an improved model is established, and the cycle slips generated by L_1 and L_2 carrier phases are calculated and separated. Verification and analysis are carried out by the measured data, and the detection results of the improved methods under three different conditions are compared. Experiments show that the new algorithm can not only detect and separate the cycle slip combinations in L_1 and L_2 carrier phases accurately, but also accurately detect the location and the values of cycle slips; and it can detect and repair the cycle slips for more than 1 cycle, which effectively improves the accuracy and reliability of the MW combination algorithm.

Keywords: cycle slip; detection and repair; Doppler; MW combination algorithm

在卫星导航的单点定位中, 全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)接收机在接收卫星信号时由于信号遮挡、多路径误差、电离层变化等影响^[1], 导致接收机的载波相位跟踪环路暂时失锁, 相位观测值出现整周的跳变, 即为周跳^[2]。在全球定位系统(Global Positioning System, GPS)数据处理过程中, 对周跳进行探测和修复是进行高精度定位计算和改正的首要前提, 也是 GPS 数据预处理的热点和难点^[3]。

收稿日期: 2019-0-12; 修回日期: 2019-0-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0505103); 国家自然科学基金资助项目(61561016, 61861008, 11603041); 广西科技厅资助项目(桂科 AC16380014, 桂科 AA17202048, 桂科 AA17202033); 广西自然科学基金资助项目(2018JJA170090); 桂林科技局资助项目(20160202, 20170216)

作者简介: 纪元法(1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事卫星导航及相关前沿科研领域研究。email:1033152054@qq.com

*通信作者: 孙希延 email:sunxiyan1@163.com

目前，用于探测载波相位观测值周跳的方法很多，包括多项式拟合法^[4]、高次差法^[5]、电离层残差法 (Geometry-Free, GF 组合)^[6]、多普勒积分法^[7]和双频码相组合法 (MW)^[8]等，但是这些方法都有各自的局限性。高次差法和多项式拟合法受观测数据采样影响较大，对小周跳很难探测；多普勒观测量独立于载波相位观测值，并不会因为相位发生周跳而变化；电离层残差法和双频码相组合法对特殊周跳组合不够敏感，不能确定周跳发生频率。由于每种方法都有其侧重点，没有一种算法能适用所有情况，因此，通常是对几种方法进行组合，从而达到更好的探测结果^[9]。

传统的电离层残差组合具有非常好的探测效果，经常与 MW 组合法联合使用，可以探测和修复大部分情况下的周跳，但仍存在不敏感周跳组合^[10-13]。本文提出了一种联合多普勒^[14-15]及 MW 组合的周跳探测方法，作为 MW 和 GF 组合的补充方法，分析了 MW 组合法的检测和修复原理，针对传统的 MW 组合无法探测 L1 和 L2 载波相位在同一历元发生相同周跳，以及无法分离 2 个频点周跳的情况进行了改进。在利用 MW 组合观测值检测时，根据多普勒观测值的独立性，对其无法探测的周跳进行改进，有效解决了 MW 组合法存在的上述问题。当多频点在同一历元发生等周跳时，可以检测和修复小至 1 周的周跳，并且能够分离双频点周跳，提高 MW 组合法探测与修复的精确度。

1 周跳探测的基本原理

1.1 MW 组合原理

MW 组合观测模型为：

$$L_{\text{MW}} = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} \quad (1)$$

其组合观测值的模糊度为：

$$\Delta N_{\text{MW}} = L_{\text{MW}} / \lambda_{\text{MW}} = (\phi_1 - \phi_2) - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{P_1 + P_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right) \quad (2)$$

式中： L_1, L_2 分别表示以距离为单位的载波相位观测值； $L_i = \lambda_i \phi_i, (i=1,2)$ ， λ_i 表示频率为 i 的载波波长， ϕ_i 表示频率为 i 的载波相位观测值； P_1, P_2 分别为两个频点的伪距观测值； $f_i (i=1,2)$ 表示频率为 i 的载波频率。

两频率载波相位值经过宽巷组合后，其载波频率变为 $(f_1 - f_2)$ ，因此可推导出其组合后的宽巷波长为

$$\lambda_{\text{MW}} = c / (f_1 - f_2) \quad (3)$$

式中 c 为光速。

其中宽巷模糊度实际代表两频率的载波相位发生周跳值的宽巷组合，因此：

$$\Delta N_{\text{MW}} = \Delta N_1 - \Delta N_2 \quad (4)$$

式中 $\Delta N_i (i=1,2)$ 表示频率为 i 的载波相位值产生的周跳值。

使用 MW 方法进行周跳检测时，需要递推前 i 个历元的平均宽巷模糊度以及均方根，递推计算为：

$$\langle \Delta N_{\text{MW}} \rangle_i = \langle \Delta N_{\text{MW}} \rangle_{i-1} + \frac{1}{i} (\Delta N_{\text{MW}(i)} - \langle \Delta N_{\text{MW}} \rangle_{i-1}) \quad (5)$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 + \frac{1}{i} \left[(\Delta N_{\text{MW}(i)} - \langle \Delta N_{\text{MW}} \rangle_{i-1})^2 - \sigma_{i-1}^2 \right] \quad (6)$$

式中： $\langle \Delta N_{\text{MW}} \rangle$ 为前 i 个历元宽巷模糊度的平均值； σ_i 为前 i 个历元模糊度的标准差。

若满足如下 2 个条件，则认为当前历元存在周跳：

$$|\Delta N_{\text{MW}(i)} - \langle \Delta N_{\text{MW}} \rangle_{i-1}| > 4\sigma_{i-1} \quad (7)$$

$$|\Delta N_{\text{MW}(i)} - \langle \Delta N_{\text{MW}} \rangle_{i+1}| \leq 1 \quad (8)$$

1.2 多普勒积分原理

多普勒积分计算：

$$d\phi_k = -\int_{t_0}^t D dt = \frac{-(D_t - D_{t_0})}{2} \Delta t \quad (9)$$

式中： D_t, D_{t_0} 表示 $[t_0, t]$ 时间内的多普勒观测量； Δt 表示 2 个观测历元间的时间间隔。将载波相位变化量减去多普勒积分值得到周跳值，一般采用梯形积分的方法计算多普勒频移值的积分。

$$\Delta N = \Delta\phi + \int_{t_0}^t Ddt + \varepsilon = (\phi_k - \phi_{k-1}) + \frac{(D_t - D_{t_0})}{2} \Delta t \quad (10)$$

式(10)表明,多普勒周跳探测法根据历元间的残差变化来判断是否有周跳发生。周跳检测测量的误差可以表示为:

$$\delta_{\Delta N} = \pm \sqrt{2\delta_\phi^2 + 2\left(\frac{\Delta t}{2}\right)^2 \left(\frac{\delta_f}{\lambda}\right)^2} \quad (11)$$

假设载波相位观测值的误差为 $\delta_\phi = 0.01$ 周,多普勒观测值的测量精确度为 $\delta_f = \pm 0.03$ m/s。若在 $[t_0, t]$ 时间内, ΔN 应该在一定范围内, δ 为门限。未发生周跳时, $\Delta N < \delta$; 若超出了门限值, $\Delta N > \delta$, 则认为发生了周跳。

2 联合多普勒和 MW 组合的周跳探测改进算法

对于 MW 组合观测值,如果检测到周跳,需要先求出前后两弧段的宽巷模糊度之差 ΔN_{MW} , 它与 2 个频点的周跳 N_1 和 N_2 的关系如式(4)所示。可以看出,如果 L_1 和 L_2 出现相同的周跳,则 N_{MW} 的前后变化为 0, 因此该方法单独使用检测不出同一历元等周大小的周跳。

虽然 MW 组合法可以有效地探测小至 1 周的周跳,但该方法存在以下 2 个不足: a) 当 L_1 和 L_2 发生相同周跳时, MW 组合法无法对其进行探测; b) 无法进行频率间周跳的分离过程。针对这 2 方面的不足,提出一种利用多普勒积分辅助 MW 组合的方法来探测与修复周跳。由于多普勒积分法能够识别周跳发生的频点,可用来与 MW 组合法进行互补。

将 MW 组合与多普勒积分联合如下:

$$\begin{cases} L_{MW} + (\phi - \int Ddt) = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} + (\phi - \int Ddt) \\ L_{MW} - (\phi - \int Ddt) = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} - (\phi - \int Ddt) \end{cases} \quad (12)$$

等式两边同时除以 λ_{MW} :

$$\begin{cases} \Delta N_{D1} = \frac{L_{MW}}{\lambda_{MW}} + \frac{(\phi - \int Ddt)}{\lambda_{MW}} = \left(\frac{\lambda_{MW} + 1}{\lambda_{MW}}\right) \Delta N_1 - \Delta N_2 \\ \Delta N_{D2} = \frac{L_{MW}}{\lambda_{MW}} - \frac{(\phi - \int Ddt)}{\lambda_{MW}} = \left(\frac{\lambda_{MW} - 1}{\lambda_{MW}}\right) \Delta N_1 - \Delta N_2 \end{cases} \quad (13)$$

通过求解方程组(13)可以解出 2 个频点的周跳 ΔN_1 和 ΔN_2 :

$$\begin{cases} \Delta N_1 = \frac{\lambda_{MW}(\Delta N_{D1} - \Delta N_{D2})}{2} \\ \Delta N_2 = \frac{(\lambda_{MW} - 1)\Delta N_{D1} - (\lambda_{MW} + 1)\Delta N_{D2}}{2} \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可以看出,改进的算法不仅能够有效分离并检测双频载波相位的周跳,分别求出 L_1 和 L_2 载波相位的周跳值 ΔN_1 和 ΔN_2 , 弥补传统 MW 组合法的缺陷,还能够探测双频载波相位的所有周跳,解决了 MW 组合中部分周跳组合无法探测的问题。多普勒值表示载波相位的瞬时变化率,它是一种非常稳定的观测值,尽管它与载波相位观测值存在一定的关系,但是它却是一个独立于载波相位的观测值,并不会因为载波相位发生周跳而变化。MW 组合与多普勒观测值相结合,能够在解决问题的基础上保证探测的准确性。此改进算法模型联合了 MW 组合与多普勒积分组合,因此会受到多普勒观测值的限制影响。在实际仿真中,多普勒积分法探测周跳时容易受到采样间隔的影响,间隔越小,对周跳的检测性能越好。由此可知,数据的采样间隔也将影响改进算法模型对周跳的检测精确度。

3 周跳探测实验与结果分析

为验证改进方法探测周跳的可行性,采用 2017 年 12 月 15 日桂林某地观测的采样数据。试验共接收了 2 000 个历元的 GPS 数据,用传统的 MW 组合法、多普勒积分法与改进的联合多普勒及 MW 组合法进行周跳的探测,最后对 3 种方法的探测能力进行比较分析^[16]。

由于 MW 组合法和多普勒积分法对周跳的探测能力都比较好，可以探测出 1 周以上的周跳。但是 MW 组合法无法分离频率间的周跳，而根据式(14)可以看出改进法能够分离双频载波相位的频间周跳。现在分 3 种情况对改进方法进行探测：情况 1，在 L_1 和 L_2 这 2 个载波相位的第 300 历元分别加入两周的周跳；情况 2，在 L_1 载波相位的第 700 历元加入 2 周的周跳，在 L_2 载波相位的第 500 历元加入 2 周的周跳；情况 3，在 L_1 和 L_2 这 2 个载波相位的第 800 历元处分别加入 2 周和 3 周的周跳。针对这 3 种情况，分别采用传统 MW 组合法及联合多普勒及 MW 组合改进法进行周跳的探测和修复，证明改进算法的可靠性和适用性。

图 1 是在 1 s 采样率的情况下进行周跳的探测，图 1(a)为传统 MW 组合检测，图 1(b)为改进的联合多普勒及 MW 组合算法。从图中可以看出对于情况 1，传统的 MW 组合法在第 300 历元处不能探测出 2 个载波相位的周跳值，改进方法能够分别探测出 L_1 和 L_2 载波相位在第 300 历元的周跳值；情况 2：传统的 MW 组合法可以探测出第 500 历元和第 700 历元处的周跳，但在实际情况下无法分辨 2 个载波相位各自的周跳值，改进的探测方法能够清楚地分辨出 L_1 载波相位在第 700 历元的周跳， L_2 载波相位在第 500 历元的周跳；情况 3：在双频载波相位第 800 历元处加入周跳后，由传统 MW 组合检测波形可以看出，传统方法只能得到一个周跳值，无法判断周跳发生在哪个载波相位上，而改进后的方法能够明显地探测出 L_1 载波相位的周跳以及 L_2 载波相位的周跳。

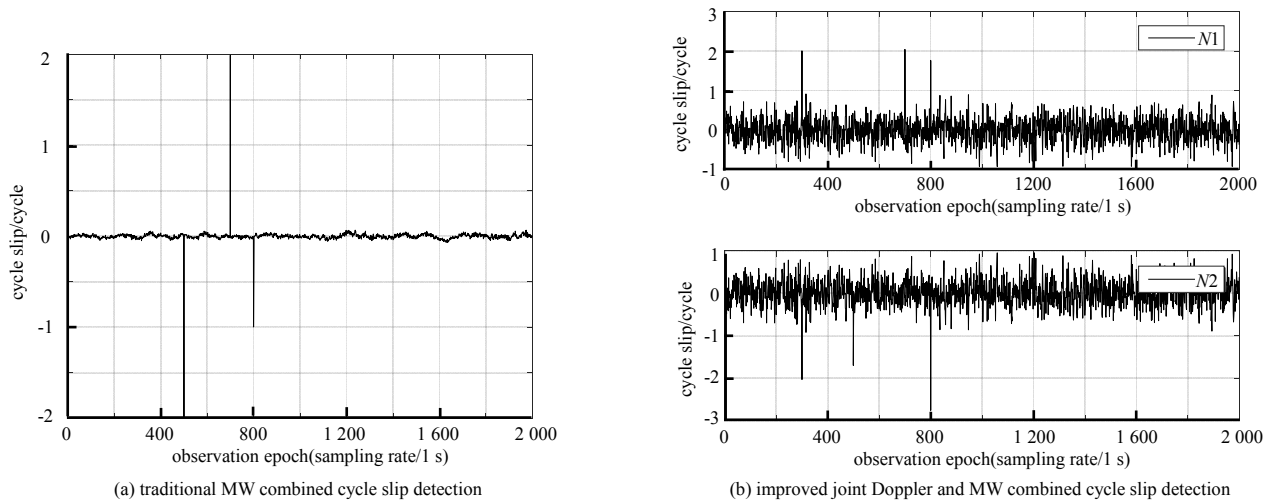


Fig.1 Results of cycle slip detection at 1 s sampling rate

图 1 1 s 采样率周跳探测结果

图 2 为 1 s 采样率的多普勒积分法周跳探测结果，可以看出多普勒积分也能对双频数据进行周跳的探测，但在实际编程中需要引入 2 个载波频率的多普勒值，这会给探测结果引入新的误差。从表 1 中也可以看出，多普勒积分法对周跳的探测误差在 0.35 周内，而改进算法的探测误差在 0.2 周内，因此该改进算法优于多普勒积分算法。

表 1 中的修复结果是基于 MW 组合法、多普勒积分法以及改进方法探测到周跳后的修复结果，可以看出，相对于传统的 MW 组合和多普勒积分法探测周跳的不足，改进算法能够准确探测出周跳发生的载波、历元及周跳值，对周跳的探测和修复达到了预期要求。

图 3 为 2 s 采样率的情况下改进后的联合多普勒及 MW 组合探测周跳。从图中可以明显看出，增大采样率后本方法仍然可以有效地探测出 3 种情况中 L_1 和 L_2 载波相位的周跳数。

因此，传统的 MW 组合并不能检测出双频率中同历元的周跳，也不能对双频率周跳分离，改进的探测算法不仅可以精确探测出双频的周跳，并且对分离后的双频周跳探测精确度较高。需要指出的是，当多普勒采样频率越高的时候，对周跳的探测精确度越好；而采样率越低，观测噪声越大，对周跳的探测与修复的影响也越大，因此本文采用较高的采样率进行解算。

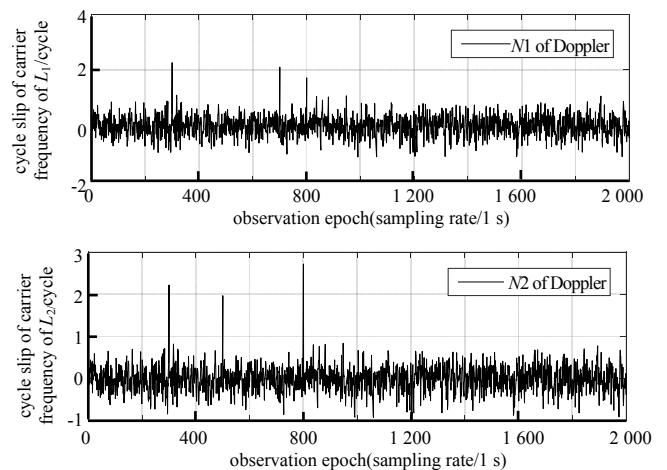


Fig.2 Cycle slip detection results by Doppler method at 1 s sampling rate

图 2 1 s 采样率的多普勒积分法周跳探测结果

表 1 1 s 采样率周跳探测与修复结果

Table 1 Cycle slip detection and repair results at 1 s sampling rate								
epoch number	add cycle slip value		traditional algorithm				detected and repaired cycle slip	
	L1	L2	MW	Doppler		improved algorithm		
				L1	L2	L1	L2	
case 1	300	2	2	0	2.257	2.223	2.005	-2.029
case 2	500	-	2	-1.987	-	1.966	-	-1.845
	700	2	-	1.992	2.098	-	2.039	-
case 3	800	2	3	-0.997	1.713	2.718	1.860	-2.921

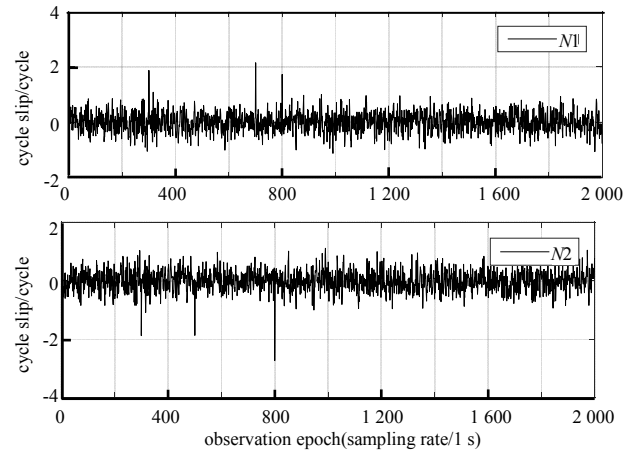


Fig.3 Cycle slip detection results of improved Doppler auxiliary MW combination algorithm at 2 s sampling rate

图 3 2 s 采样率周跳探测结果

4 结论

本文主要对 MW 组合算法进行了改进,针对传统 MW 组合法不能探测同一历元 L_1 和 L_2 上产生相同周跳,且无法分离 2 个载波相位上的周跳问题,利用多普勒值的独立性及多普勒值不受周跳影响的特性,对 MW 组合法进行联合运算。本文对 2 种方法进行组合探测和修复 GPS 周跳,充分发挥了各自的优势,弥补了 MW 组合法的不足。实验通过 3 种情况对传统探测方法和改进法进行对比,明显看出传统方法不能实现频率间的周跳分离,只能得到宽巷周跳。改进方法能有效解决传统 MW 组合中探测失效的周跳盲区,还可以准确而可靠地探测和修复 1 周以上的周跳。本算法是基于 GPS 静态定位数据得出的,对于动态实时数据的适用性还需要进一步验证,对进一步提高周跳检测精确度的研究也将在后续工作中进行。

参考文献:

- [1] 张宏杰,韦欣荣,曹锦,等. 导航星座对高轨特定目标导航方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(2):227-232. (ZHANG Hongjie,WEI Xinrong,CAO Jin,et al. Navigation method to high orbit target for navigation constellation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(2):227-232.)
- [2] WANG Z,WANG X,JI S,et al. Optimal cycle slip detection and correction with reliability[J]. Empire Survey Review, 2015, 48(349):233-239.
- [3] 帅玮祎,董绪荣,王军,等. GNSS 接收机数据质量及常见问题分析[J]. 测绘工程, 2018,27(4):14-20,28. (SHUAI Weiyi, DONG Xurong,WANG Jun,et al. Analysis of GNSS receiver data quality and common problems[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018,27(4):14-20,28.)
- [4] 裴晶,马颖,刘春. 多项式拟合法在周跳探测中的研究与改进[J]. 电子测量与仪器学报, 2017,31(11):1828-1834. (PEI Jing,MA Ying,LIU Chun. Research and improvement of polynomial fitting method in cycle slip detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017,31(11): 1828-1834.)
- [5] 董冰全,柴洪洲,刘鸣,等. 基于双频载波和高次差法的周跳探测与修复[J]. 海洋测绘, 2016,36(2):58-62. (DONG Bingquan,CHAI Hongzhou,LIU Ming,et al. A new cycle slip detection and correction method with dual-frequency carrier phase observation and high-order difference[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016,36(2):58-62.)
- [6] 陈猛,李建文,陈星宇,等. 联合 MW 组合法及改进电离层残差法的周跳探测新方法[J]. 全球定位系统, 2016,41(4):39-42. (CHEN Meng,LI Jianwen,CHEN Xingyu,et al. A new cycle slip detection based on MW and improved ionosphere residual method[J]. GNSS World of China, 2016,41(4):39-42.)
- [7] 马驰,李柏渝,刘文祥,等. 基于多普勒辅助的电离层残差探测与修复周跳改进方法[J]. 全球定位系统, 2014,39(5): 8-12. (MA Chi,LI Baiyu,LIU Wenxiang,et al. An improved cycle slip detection and repair method of ionosphere residual error based on Doppler aid[J]. GNSS World of China, 2014,39(5):8-12.)
- [8] 郭翔,鲁铁定,裴东东. 一种双频载波相位周跳探测与修复方法[J]. 测绘科学, 2017,42(9):15-19. (GUO Xiang,LU Tieding,PEI Dongdong. A method to cycle-slip detection and repair of dual frequency carrier phase[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017,42(9):15-19.)
- [9] 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 Jun. Research on fusion algorithm of cycle slip detection and correction for GNSS[D]. Beijing:Chinese Academy of Surveying and Mapping, 2016.)

- [10] 范丽红,王利,张明,等. 基于 MW 与 STPIR 组合的周跳探测与修复方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015,40(6): 790-794. (FAN Lihong,WANG Li,ZHANG Ming,et al. A combination of MW and Second-order Time-difference Phase Ionospheric Residual for cycle slip detection and repair[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015,40(6):790-794.)
- [11] 李迪,柴洪洲,潘宗鹏. STPIR 和 MW 组合的北斗三频周跳探测与修复[J]. 海洋测绘, 2018,38(1):31-34. (LI Di,CHAI Hongzhou,PAN Zongpeng. A combination of STPIR and MW for BDS triple-frequency cycle slip detection and repair[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2018,38(1):31-34.)
- [12] 甘雨,隋立芬,戚国宾,等. 利用 EMD 阈值消噪改进 MW 组合周跳探测性能[J]. 大地测量与地球动力学, 2015,35(4):666-670. (GAN Yu,SUI Lifen,QI Guobin,et al. Improving the performance of MW combined observation on cycle slip detection using EMD threshold de-noising[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015,35(4):666-670.)
- [13] 邹正标,何秀凤,唐旭. GPS 非差数据周跳探测的 TECR-MW 综合法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014,42(2):155-158. (ZOU Zhengbiao,HE Xiufeng,TANG Xu. Cycle slip detection using TECR and MW combined method for undifferenced GPS data[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014,42(2):155-158.)
- [14] 张炘,蔡成林,唐振辉,等. 一种基于多普勒改进的 BDS 单频观测值周跳探测与修复法[J]. 天文学报, 2017,58(2): 42-48. (ZHANG Xin,CAI Chenglin,TANG Zhenhui,et al. A method of detecting and repairing cycle-slip based on Doppler improved BDS single-frequency observations[J]. Acta Astronomica Sinica, 2017,58(2):42-48.)
- [15] 董凯,胡绍林. 多普勒频率数据质量评估方法研究[J]. 导航定位学报, 2016,4(1):21-24. (DONG Kai,HU Shaolin. Study on evaluation method for Doppler shift data quality[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016,4(1):21-24.)
- [16] 李仁安. 多普勒观测量在 GNSS 数据处理中的应用与效果评估[J]. 工程勘察, 2017,45(6):54-58. (LI Ren'an. The application and assessment of Doppler measurements in data processing of GNSS[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017,45(6):54-58.)

(上接第 599 页)

- [9] 鲁航,巴斌,王朋飞. 一种基于改进 PDR 与外部位置信息的融合定位算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(3): 402-408. (LU Hang,BA Bin,WANG Pengfei. A fusion algorithm based on improved PDR and external position information[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(3):402-408.)
- [10] 成晓鹏,齐锋,王泉. 电子对抗作战仿真分层半自治 Agent 系统框架设计[J]. 指挥控制与仿真, 2016,38(3):83-87. (CHENG Xiaopeng,QI Feng,WANG Xiao. Design of electronic warfare simulation system framework based on semi-autonomous Agent[J]. Command Control & Simulation, 2016,38(3):83-87.)
- [11] 陈浩,黄健,龚建兴,等. 电子对抗中武器装备体系作战能力评估研究[J]. 计算机仿真, 2018,35(8):25-30,75. (CHEN Hao,HUANG Jian,GONG Jianxing,et al. Research on combat capability evaluation of electronic weapon equipment system[J]. Computer Simulation, 2018,35(8):25-30,75.)
- [12] 魏娜,刘明雍,张帅,等. 基于协同对抗的水下博弈策略优化[J]. 西北工业大学学报, 2019,37(1):63-69. (WEI Na,LIU Mingyong,ZHANG Shuai,et al. Optimizing underwater game strategy based on cooperative confrontation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019,37(1):63-69.)
- [13] 何跃宏,孙良伟,王首斌. 舰艇编队通信对抗体系研究[J]. 舰船科学技术, 2019,41(1):125-128. (HE Yuehong,SUN Liangwei,WANG Shoubin. The system research of communication countermeasure in warship formation[J]. Ship Science and Technology, 2019,41(1):125-128.)
- [14] 罗元强,孟光磊. 基于马尔科夫网络的无人机机动决策方法研究[J]. 系统仿真学报, 2017,29(z1):106-112. (LUO Yuanqiang,MENG Guanglei. Research on UAV maneuver decision-making method based on Markov network[J]. Journal of System Simulation, 2017,29(z1):106-112.)
- [15] ZHANG Yun. Key technologies of confrontational intelligent decision support for Multi-Agent systems[J]. Automatic Control and Computer Sciences, 2018,52(4):283-290.