



北斗 WADS 分区综合改正数拟合模型及定位分析

王兵浩^{1,2} 周建华² 陈俊平^{3,4} 张益泽^{3,5} 王阿昊^{3,6}

1 战略支援部队信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 北京卫星导航中心,北京,100094

3 中国科学院上海天文台,上海,200030

4 中国科学院大学天文与空间科学学院,北京,100049

5 东京海洋大学海事系统工程系,日本 东京,135-8533

6 同济大学测绘与地理信息学院,上海,200092

摘要:针对北斗导航与广域差分服务分区综合改正数缺失和切换造成的用户端定位精度恶化和重新收敛,提出一种同时适用于系统端改正数生成和用户端定位的分区综合改正数拟合算法。通过多个临近分区的分区综合改正数与待拟合分区的改正信息之间的双残差对待拟合分区综合改正数进行拟合,可有效填补分区综合改正数的中断弧段。利用 MGEX(Multi-GNSS Experiment)监测站的数据对拟合出的分区改正参数进行定位效果评估。采用拟合分区综合改正数进行动态定位,定位精度能达到水平 0.20 m,高程 0.44 m,较使用原始分区综合改正数精度仅降低 8% 左右,但能够有效保持定位结果的连续性和精度,在提高系统服务完整性及用户定位结果的可靠性方面具有积极意义。

关键词:实时精密单点定位;北斗广域差分系统;分区综合改正数;拟合算法;定位精度

中图分类号:P228

文献标志码:A

利用全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)获取实时位置信息,进而实现基于位置的各种服务已成为社会运行不可或缺的技术支撑。卫星导航系统作为国家建设的重要基础设施,近年来得到了长足的发展。

基于地面参考站的实时动态定位(real time kinematic, RTK)^[1-3]技术在地籍测量、精细农业等领域得到充分的应用。但地面参考站的作用范围及数据通信的可用性、稳定性限制了 RTK 技术在广域范围内的应用。

互联网技术的发展使全球分布的监测站间数据实时传输成为可能。各分析中心基于大量观测数据计算得到的轨道、钟差及各种偏差改正信息,可以支持用户实现实时精密单点定位^[4-5]。进一步地,利用相位小数偏差(fractional cycle bias, FCB)^[6-7]、整数相位钟(integer recovery clock, IRC)^[8]等产品,全球定位系统(Global Positioning

System, GPS)可实现模糊度固定的实时单点定位解^[9]。此项服务的可用性同样受限于移动网络的覆盖范围,但针对北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)的实时模糊度固定技术和服务尚未成熟。

近年来,通过地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星和互联网的融合通信模式进行改正数据播发成为实时高精度定位的重要实现方式,促进了商用服务的兴起。如 Trimble RTX、StarFire SF3、OmniStar 等^[10-13],用户通过购买相应授权可享受不同精度的定位服务。

为有效提升广域范围内用户的定位精度和可靠性,BDS在现有地面运控系统的基础之上对监测网数据进行实时解算,生成并通过 GEO 卫星向用户播发电离层格网、等效钟差、轨道改正参数及分区综合改正数等改正信息,提供免费的广域差分服务(wide area differential service, WADS)^[14-17]。

收稿日期:2019-02-20

项目资助:国家自然科学基金(11673050);国家重点研发计划(2018YFB0504300)。

第一作者:王兵浩,博士生,主要从事 GNSS 广域差分模型及算法研究。wangbinghao7@126.com

通讯作者:陈俊平,博士,研究员。junping@shao.ac.cn

WADS改正数中,等效钟差和轨道改正数可实现卫星钟差和轨道误差的修正;而对于修正后残余的误差,BDS设计播发分区综合改正数进行统一修正^[18-19]。在单北斗系统情况下,通过正确使用WADS改正参数,用户利用伪距观测量可实现实时米级定位,利用相位观测量可实现实时分米级定位^[14-15,18,20],对用户的导航应用具有十分重要的意义。

连续、稳定的分区综合改正数是用户定位精度和定位可靠性提升的重要前提。然而,由于数据传输等原因,分区综合改正数的生成或用户接收过程中偶有中断现象发生。2018年12月份的监测结果表明:西部区域(分区13和15)因观测数据缺失造成改正数缺失时间段分别达到58 h和55 h,使得上述两个分区的可用性降到了92.5%左右,从而影响了用户定位精度和稳定性。

本文针对分区综合改正数中断时刻的处理策略进行研究,设计了一套经验证可行的改正数拟合算法,能够有效地延续改正数中断前的定位精度,提高定位的稳定性。

1 分区综合改正数

1.1 分区综合改正数模型

北斗WADS改正数之间存在递进关系,用户按照等效钟差、轨道改正数和分区改正数的顺序进行修正,定位精度逐步提高。其中,等效钟差主要针对轨道径向误差和卫星钟差进行修正,轨道改正数修正的主体是轨道的法向误差和切向误差。分区综合改正数是为高精度用户设计的一种相位差分改正信息^[19]:

$$\delta L_r^s = \delta \rho_r^s + c \cdot \delta t_r - c \cdot \delta t^s + \delta T + \lambda \cdot dN_r^s + \epsilon_{L_{IF}} \quad (1)$$

式中, r,s 为分区编号及卫星标识符; $\delta \rho_r^s$ 、 δt_r 、 δt^s 分别为经过等效钟差及轨道改正数改正后残余的轨道误差、分区主参考站处的站钟残差和卫星钟差残差; δT 为分区主参考站处的对流层误差残差; λ 和 dN_r^s 分别为消电离层组合波长及分区改正数中包含的模糊度偏差; $\epsilon_{L_{IF}}$ 为消电离层载波相位观测噪声。

用户采用分区综合改正数进行精密定位,可采用消电离层组合或电离层格网对电离层误差进行消除。但由于北斗电离层格网的改正精度约为0.5 m^[21],剩余电离层误差将对精密定位精度及收敛速度造成严重影响^[18-19],因此在用户定

位模型中,建议采用消电离层组合(双频消电离层组合、单频半和模型^[22]或其他形式的消电离层组合);对于单频用户,可以采用估计电离层的定位模型。定位解算过程中,用户端模糊度保持浮点解状态。

用户端定位模型如下:

$$\begin{cases} P = \rho + c \cdot (dt_r - dt^s - \text{esc}) + T + \delta_{\text{orb}} + \epsilon_P \\ \Phi = \rho + c \cdot (dt_r - dt^s - \text{esc}) + T + \delta_{\text{orb}} + \\ \quad \lambda \cdot N + \delta L + \lambda \cdot W + \epsilon_\Phi \end{cases} \quad (2)$$

式中, P,Φ 为以米为单位的伪距、相位消电离层观测量; dt^s 、 ρ 分别为用户播星历计算出的卫星钟差和卫星位置计算的站星距离; esc 、 δ_{orb} 分别为等效钟差和轨道改正数; T 为对流层延迟误差; δL 为分区综合改正数; W,N 分别为以周为单位的用户端相位缠绕误差和模糊度; ϵ_P 、 ϵ_Φ 分别为消电离层伪距观测误差和相位观测误差。

1.2 分区综合改正数服务的覆盖范围

分区综合改正数利用参考站与周边一定范围内的用户在定位过程中轨道误差、大气延迟误差之间存在的时空相关性来进一步削弱轨道、钟差和对流层的误差^[19],进而提升用户的定位精度。

分区综合改正数服务可覆盖中国及周边部分区域,按照监测站的地理位置将服务范围进行合理划分,共分为18个分区,各个分区的覆盖范围如图1所示。图1中,浅绿色阴影区域范围半径为500 km,浅蓝色阴影区域半径为1 000 km。可见在中东部地区人口密集区域,分区综合改正数可实现多重覆盖。

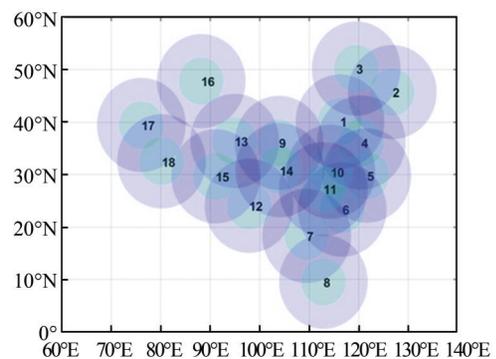


图1 分区综合改正数覆盖范围

Fig.1 Coverage Areas of WADS Zone Corrections Service

2 分区综合改正数拟合算法

连续可用的分区综合改正数对用户获得稳定、可靠的定位结果至关重要,但由于通信稳定

性、设备维护等因素造成的分区综合改正数短时间内缺失,或由于用户跨分区作业等因素造成的用户所用分区综合改正数需要进行切换等情况在系统运行和实际作业中难以避免。

为尽可能避免分区切换造成的定位结果恶化,保证用户定位精度的稳定性,本文尝试利用临近分区的分区综合改正数对用户所用分区改正信息进行拟合,以维持分区精密定位的连续性,保持用户的定位精度。

基于分区综合改正数的定义式(1),同一分区不同卫星的改正数之间存在公共误差,在单个分区不同卫星 i, j 的改正数之间进行星间差分,可有效消除分区综合改正数中的测站相关误差,即:

$$\Delta\delta L_r^{i,j} = \delta L_r^i - \delta L_r^j = \Delta\delta\rho_r^{i,j} - \Delta\delta t^{i,j} + \Delta\delta T_r^{i,j} + \lambda \cdot \Delta dN_r^{i,j} + \epsilon' \quad (3)$$

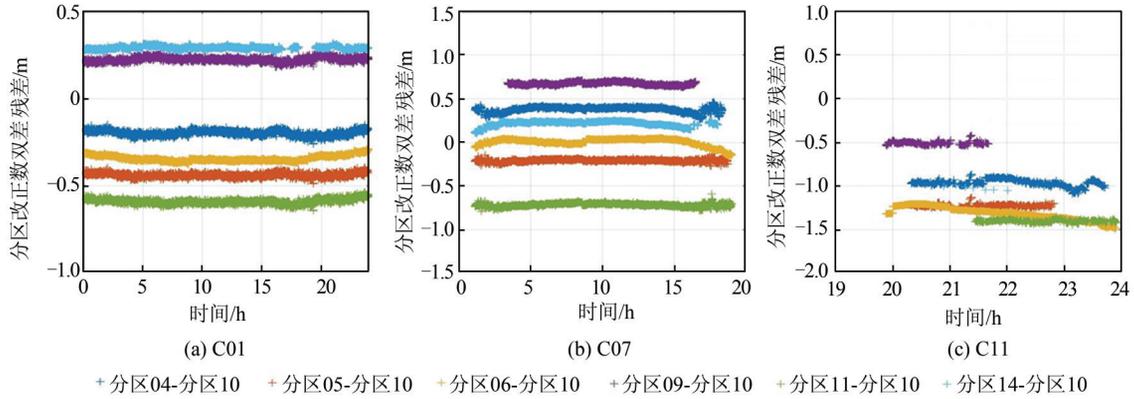


图2 分区综合改正数双差残差

Fig.2 Residuals of Double Differenced Zone Corrections

由图2可知,卫星出入境阶段,MEO(Medium Earth Orbit)和IGSO(Inclined Geosynchronous Earth Orbit)会发生相对比较明显的波动,入境一段时间后双差残差趋于稳定,因此,式(4)可表示为:

$$\nabla\Delta L_{r,u}^{i,j} = \delta L_r^i - \delta L_r^j - \delta L_u^i + \delta L_u^j \approx a \quad (5)$$

式中, a 为常数。

假定分区 u 的改正数在 $t+1$ 时刻中断,基于轨道误差及对流层延迟误差的缓变特性, $t+1$ 时刻存在如下关系:

$$\begin{aligned} \nabla\Delta L_{r,u}^{i,j}(t+1) &= \delta L_r^i(t+1) - \delta L_r^j(t+1) - \\ &\delta L_u^i(t+1) + \delta L_u^j(t+1) \approx \nabla\Delta L_{r,u}^{i,j}(t) \quad (6) \end{aligned}$$

式中, $\delta L_u^i(t+1), \delta L_u^j(t+1)$ 为未知量,将 $\delta L_u^i(t+1)$ 固定,认为中断前后不发生变化,则 $t+1$ 时刻分区 u 的分区综合改正数可表示为:

$$\begin{cases} \delta L_u^i(t+1) = \delta L_u^i(t) \\ \delta L_u^j(t+1) = \nabla\Delta L_{r,u}^{i,j}(t) + \delta L_r^i(t+1) - \\ \delta L_r^j(t+1) + \delta L_u^i(t+1) \end{cases} \quad (7)$$

式中, Δ 为单差标记; ϵ' 为单差噪声。

进一步,选取分区 r 为参考分区,在分区 u, r 之间组差,可进一步削弱分区 u 和分区 r 之间卫星端误差,则分区综合改正数的双差残差为:

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\delta L_{r,u}^{i,j} &= \delta L_r^i - \delta L_r^j - \delta L_u^i + \delta L_u^j = \\ \nabla\Delta\delta\rho_{r,u}^{i,j} + \nabla\Delta T_{r,u}^{i,j} + \lambda_{IF} \cdot \nabla\Delta dN_{r,u}^{i,j} + \epsilon'' \quad (4) \end{aligned}$$

式中, $\nabla\Delta$ 为双差标记; ϵ'' 为双差噪声。式(4)中, $\nabla\Delta L_{r,u}^{i,j}$ 主要包含双差的模糊度偏差值 $\nabla\Delta N_{r,u}^{i,j}$ 以及经过双差过程后未完全消除的轨道误差 $\nabla\Delta\delta\rho_{r,u}^{i,j}$ 和对流层延迟误差 $\nabla\Delta T_{r,u}^{i,j}$ 。无周跳情况下, $\nabla\Delta L_{r,u}^{i,j}$ 的波动即为轨道误差和大气延迟误差带来的波动。

以2018年2月7日的分区综合改正数为例,选取10号分区为基准分区,C03星为基准星,选取不同类型卫星各一颗作为代表,分区综合改正数双差残差如图2所示。

由式(7)知,改正数中断前后,保持 δL_u^i 不变,可以保证 δL_u^i 和 δL_u^j 中包含的模糊度偏差项和测站钟差残差不变,测站钟差残差不影响用户位置解算,稳定的模糊度偏差可保证用户定位的连续性。为了提高拟合结果的可靠性,综合周边多个分区的改正信息,共同拟合生成分区 u 的分区综合改正数。

假设距分区 u 的中心范围 R 之内共有 n 个分区的改正信息连续可用,记为分区 $r_k(k=1, 2, \dots, n)$,则以 r_k 作为参考分区,采用式(7)拟合出的分区 u 的分区综合改正参数为 $\delta L_u^i(t+1)_k$ 。将 n 个参考分区拟合出的分区综合改正数按式(8)进行综合(对所有卫星的改正数处理方式相同,故省略卫星标记):

$$\delta L_u(t+1) = \sum_{k=1}^n \left(\delta L_u(t+1)_k \cdot \text{dis}_k / \sum_{i=1}^n \text{dis}_i \right) \quad (8)$$

式中, dis_k 为分区 u 和 r_k 中心之间的距离。

鉴于本文提出的拟合算法基于双差分综合改正数的稳定性,而在某些情况下,分区综合改正数中包含的模糊度偏差会发生跳变,造成稳定性前提不成立。因此,针对相同的卫星、测站构成的双差分综合改正数,在拟合过程中,需对 $\nabla\Delta L(t)$ 的可用性进行判断,仅使用可用的双差分综合改正数进行拟合。判断式为:

$$\begin{cases} |\text{mean}(t-1) - \nabla\Delta L(t)| \leq \text{thres, 可用} \\ |\text{mean}(t-1) - \nabla\Delta L(t)| > \text{thres, 不可用} \end{cases} \quad (9)$$

式中,| |为取绝对值运算;mean($t-1$)为双差分综合改正数的历史平均值(前 $t-1$ 个历元),且在模糊度跳变后重置; $\nabla\Delta L(t)$ 为当前双差分综合改正数;thres的取值通过经验值给出。

以上算法中除分区综合改正数外不含其余信息,因此当系统端分区 u 的综合改正数无法正常生成时,可利用周边可用分区综合改正数进行拟合,保证系统的正常运行。

当用户接收到分区综合改正数中断时,可采用拟合的分区综合改正数继续进行计算,定位结果不需要重新收敛,在改正数缺失的时间段保持定位结果的稳定。当用户重新收到该分区的分区综合改正数时,可无缝切回使用。而当用户跨分区作业时,可采用拟合的改正信息代替新分区的改正信息,避免分区切换造成定位结果跳变。

3 实验验证

为验证本文提出的分区综合改正数拟合算法,利用系统生成的分区综合改正数进行拟合实验与原始分区综合改正数进行对比,并通过MGEX(multi-GNSS experiment)监测站观测数据进行定位解算来评估拟合算法对用户定位的

影响。

定位实验监测站与分区情况见表1。表1中,原始分区为距监测站最近的分区,置换分区为次近分区,拟合分区按由近到远排列。其中,6、10号分区位于中国东部,监测站分布密集,拟合分区为距原始分区1 000 km范围内的分区;15、16号分区位于中国西部,监测站分布稀疏,拟合分区距原始分区2 000 km,以此保证拟合分区不少于3个,保证拟合的可靠性。

表1 定位实验监测站与对应分区情况

Tab.1 Monitoring Stations and Zones Used for Experiments

测站	原始分区	拟合分区	置换分区
CKSV	6	5,11,10	5
JFNG	10	11,5,6,4	11
HKWS	6	11,5,10	11
HKSL	6	11,5,10	11
LHAZ	15	13,12,14,9,17	13
URUM	16	13,17,15,9	13

选取表1所示的6、10、15和16共4个目标分区进行拟合实验,并选择分区内的MGEX监测站进行定位实验。分区综合改正数中断与恢复时刻设置规则如下:

$$\begin{cases} t_{\text{中断}} = h:30, h = 1, 3, 5, 7 \dots 23 \\ t_{\text{恢复}} = h:30, h = 2, 4, 6 \dots 22 \end{cases} \quad (10)$$

即从01:30开始,每隔1 h进行分区综合改正数拟合。式中, $h:30$ 表示时刻如1:30、2:30等。

以2017年年积日(day of year, DOY)第352天的分区综合改正数拟合结果为例,分别选取一颗GEO、IGSO和MEO卫星为代表,分区综合改正数拟合结果如图3所示。图3中ORI(original)表示原始分区改正数,FIT(fitting)表示拟合出的改正数。

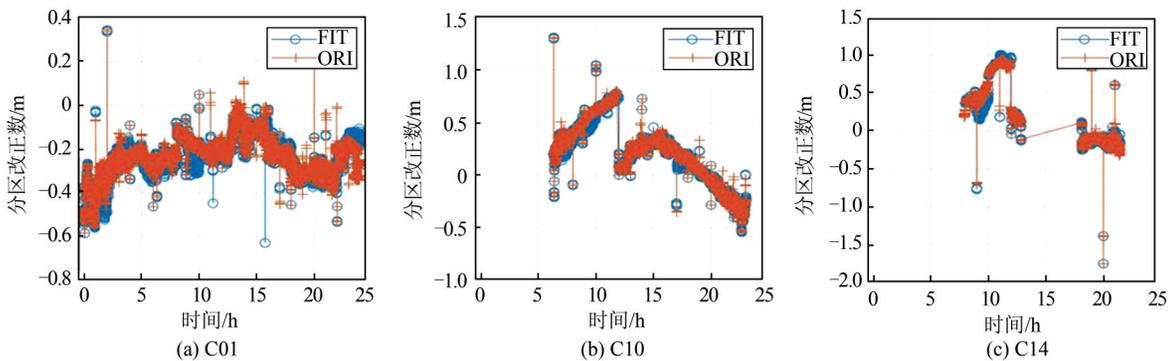


图3 分区综合改正数拟合结果
Fig.3 Result of Zone Correction Fitting

由图 3 可知,采用本文分区综合改正数拟合算法的拟合结果连续,且与原始的改正数之间相差较小,这将有利于保持用户定位结果精度。

为探究本文提出的分区综合改正数拟合算法对用户定位效果的影响,采用表 1 所示的 6 个测站进行逐历元动态定位解算,测试时间段为 2017 年 DOY350~360,共 11 d。

定位模式分为 3 种:①完全利用距监测站最近的分区的改正数(ORI);②在距离最近的分区综合改正数中断时采用拟合产生的改正数(FIT);③在距离最近的分区综合改正数缺失弧段采用次近分区的分区综合改正数(replace, REP)。

解算采用精密单点定位方式,轨道和钟差由广播星历获得,并进行实时轨道、钟差改正数以及分区综合改正数的修正。数据处理设置见表 2。

表 2 定位实验解算模式及参数设置
Tab.2 Positioning Mode and Parameter Settings

参数	设置值或策略
采样间隔	30 s
高度角阈值	10°
权值设置	高度角加权
定位频点	B1B2 双频消电离层模型
测站坐标参数	白噪声,先验信息 10 km
测站钟差	白噪声,先验信息 1 ms
解算模式	动态

以 LHAZ 站 2017 年 DOY356 的定位结果为代表,简要说明 3 种分区综合改正数的定位结果,切换时不重置模糊度/重置模糊度的结果分别如图 4、图 5 所示。

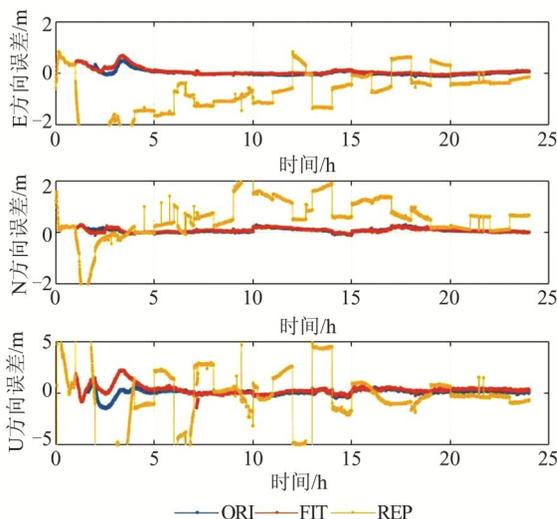


图 4 LHAZ 站年积日第 356 天定位结果(不重置模糊度)
Fig.4 Positioning Result of LHAZ in DOY356 Without Resetting Ambiguities at Switch Epoch

定位过程中,当分区综合改正数中断或突然切换的情况下,用户端模糊度参数将发生跳变,如对这种跳变不加处理,将导致定位结果发生错误,如图 4 中 REP 模式所示。若将分区综合改正数中断造成的跳变作为周跳处理,将模糊度参数重置,则会在跳变之后发生重新收敛现象,如图 5 中 REP 模式所示。因此在分区综合改正数切换时,有必要进行合理的处理来保持定位结果的稳定。

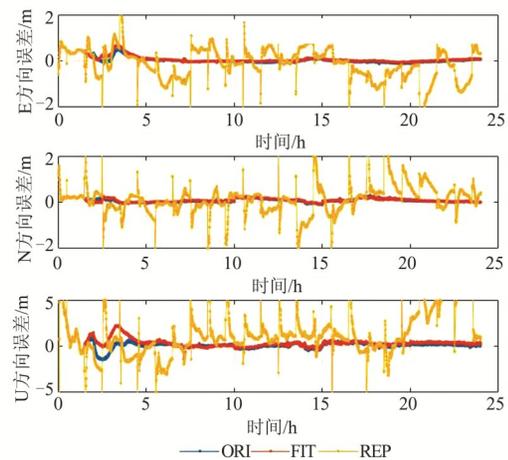


图 5 重置模糊度时 LHAZ 站年积日第 356 天定位结果
Fig.5 Positioning Result of LHAZ in DOY356 While Resetting Ambiguities at Switch Epoch

如图 4 和图 5 中 FIT 模式所示,在分区综合改正数中断时刻,采用拟合生成的改正数进行补充,定位结果连续且能够达到与采用原始分区综合改正数相近的定位精度。

以 HKSL 站的定位结果为例,将其在整个测试弧段的定位结果每小时分为一个弧段,每个弧段取均方根(root mean square, RMS),全弧段的定位结果如图 6 所示。图 6 中显示的点为该小时弧段内定位结果的 RMS 值。由图 4、图 5 可知,REP 模式下定位精度较差,因此这里仅统计 ORI 和 FIT 模式的定位结果。

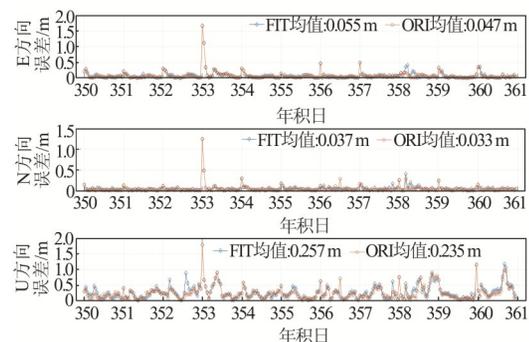


图 6 HKSL 站全时段定位结果均方差
Fig.6 Positioning RMS Result of HKSL from DOY350 to DOY360

分区综合改正数中断与恢复时间点如式(10)所示。每天00:00开始重新进行定位解算。00:00~01:30期间,ORI和FIT两组实验所用数据完全一致,不能反映分区综合改正数拟合的效果,所以忽略该时段,将每个定位监测站剩余所有时段RMS统计值按E、N和U 3个方向分别取平均,作为该测站的定位结果。参与定位解算的监测站定位结果如表3所示。URUM站DOY352定位结果的误差序列对比如图7所示。

表3 原始改正数与拟合改正数定位结果对比/m
Tab.3 Comparison of Positioning Results Using Original and Fitting Zone Corrections/m

测站	ORI			FIT		
	E	N	U	E	N	U
CKSV	0.062	0.046	0.364	0.087	0.062	0.450
HKSL	0.047	0.033	0.235	0.055	0.037	0.257
HKWS	0.048	0.032	0.240	0.056	0.037	0.263
JFNG	0.421	0.315	1.046	0.430	0.333	1.016
LHAZ	0.080	0.075	0.227	0.125	0.086	0.274
URUM	0.175	0.187	0.379	0.173	0.196	0.401
平均	0.139	0.115	0.414	0.154	0.125	0.444

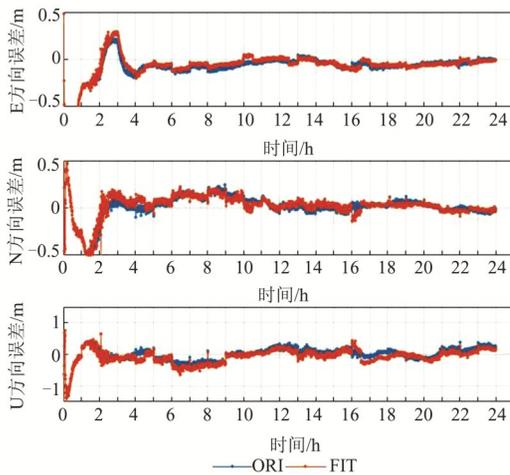


图7 定位结果误差序列对比(DOY352)
Fig.7 Comparison of Positioning Result of URUM (DOY352)

监测站定位结果中,JFNG站定位结果较差的原因在于原始观测数据不完整,多次发生1 h以上的中断,造成解算过程中多次发生重新收敛过程,且收敛过程中定位结果较差,未能达到分米级的定位水平。

由表3可知,采用拟合的分区综合改正数较原始分区综合改正数定位精度略有下降,但两者定位结果保持在同一量级。此外,在定位过程中,发现定位结果规律性地发生跳变。跳变发生

的时刻分为两种情况:(1)星历切换时刻;(2)改正数切换时刻。以URUM站DOY352的定位结果为例:改正数切换时刻,分为从原始分区综合改正数向拟合分区综合改正数切换(ORI→FIT)和由拟合分区综合改正数向原始分区综合改正数切换(FIT→ORI)两种情况。

将定位结果中的星历切换和改正数切换时刻前后定位结果之间的差值进行提取并统计,其分布情况如图8所示。

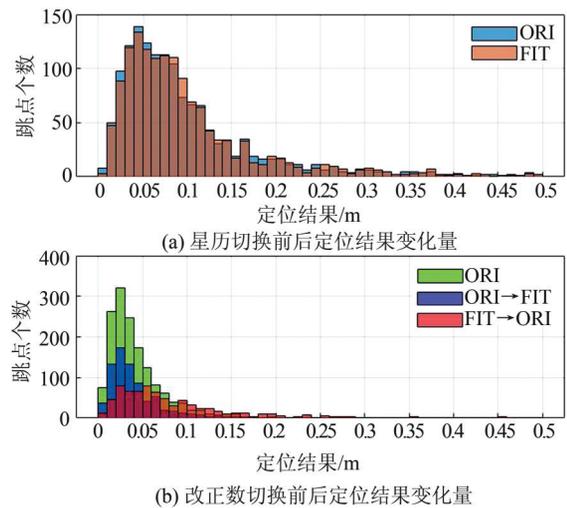


图8 定位结果跳变分布

Fig.8 Distribution of Jump Values at Ephemeris and Zone Correction Switching Epochs

分别统计不同模式定位结果跳变量的RMS、均值和置信度为95%情况下的结果,相关统计数据见表4。

由图8(a)及表4统计值可知,ORI定位模式和FIT定位模式在星历切换时刻前后均会出现跳变,但定位结果变化量无明显差异,说明星历切换并不是导致拟合分区综合改正数定位结果下降的原因。

表4 不同时刻定位结果变化量统计结果

Tab.4 Statistics of Jump Values at Ephemeris and Zone Correction Switching Epochs

不同时刻	模式	RMS/m	均值/m	95%置信度/m
星历切换	ORI	0.129	0.099	0.274
	FIT	0.128	0.100	0.271
改正数切换	ORI	0.065	0.046	0.114
	ORI→FIT	0.060	0.043	0.108
	FIT→ORI	0.118	0.087	0.256

从图8(b)及表4的统计结果可知,在改正数切换时刻,ORI→FIT时间点坐标变化量与ORI

模式对应时刻坐标变化量几乎相同,而 FIT→ORI 时刻,定位结果发现较大的偏差,这种跳变将会影响接下来一段时间的定位精度。

基于前文对式(7)的分析,拟合的分区综合改正数能够保持分区综合改正数引入的模糊度偏差不发生变化,对用户定位不会产生影响。同时,星历误差和对流层误差在 ORI→FIT 切换后也能够保持连续,因而在 ORI→FIT 切换时刻定位结果不会发生跳变。当距用户最近分区的综合改正数中断或进入新分区后,采用拟合的改正数替代中断的改正数或新分区的改正数进行位置解算,可以保持现有的定位精度。

随着拟合时间的延长,用于拟合的分区 r_k 与分区 u 的分区综合改正数中,轨道误差和对流层延迟残差之间的一致性变差。而且,在拟合阶段的处理使拟合出的改正数包含的测站钟差残余误差和模糊度偏差项不变,在 FIT→ORI 时刻,新的分区综合改正数中包含的测站钟差残差和模糊度偏差项较拟合阶段存在跳变,导致在 FIT→ORI 切换时刻定位结果会发生跳变,造成 FIT 定位模式的定位结果略差于 ORI 模式,但 FIT 模式定位结果整体同样可以维持分米级的定位精度。因此,当距用户最近分区的改正数恢复后,用户在定位过程中,可以从拟合改正数切换回当前分区的改正数,定位结果仍然可以维持分米级的定位精度。

4 结 语

本文提出一种利用多个临近分区的改正数对中断弧段的改正数进行拟合的算法。采用多个分区的分区综合改正数进行算法验证,拟合出的分区综合改正数与实时生成的改正参数接近,且趋势相同。

利用 6 个 MGEX 监测站进行分区综合改正数差分定位,评估拟合的分区综合改正数。采用原始的分区综合改正数进行定位解算,定位结果为水平 0.18 m(E:0.14 m,N:0.11 m),高程 0.41 m。采用拟合的分区综合改正数解算的定位结果为水平 0.20 m(E:0.15 m,N:0.12 m),高程 0.44 m。定位结果虽然有 7.94% 左右的降低,但仍然能保证水平 0.2 m、高程 0.5 m 内的定位精度,同时避免了因分区综合改正数缺失造成的定位结果错误及重收敛等问题。

由于本文提出的拟合算法不涉及分区综合改正数产品以外的数据,因此本算法同时适用于

系统端分区综合改正数生成和客户端定位过程中,可在一定程度上提高系统服务的完整性和用户定位精度的稳定性、可靠性。但是从根本上解决改正数切换造成的不良影响,应进一步消除不同分区改正信息间的系统差,实现整网改正数的归一化。

参 考 文 献

- [1] Chen Dezhong. Research on BDS Medium/Long-range Quickly Ambiguity Resolution and Regional Error Correction [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016(陈德忠. 北斗中长距离基准站模糊度快速固定及区域误差建模方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2016)
- [2] Zhang Ming. Research on the Key Technologies of GPS/BDS Long-range Network RTK [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016(张明. GPS/BDS 长距离网络 RTK 关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学, 2016)
- [3] Lü Zhiwei. Research on Theory and Methodology of Kinematic Positioning Based on Continuous Operational Reference Stations [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2010(吕志伟. 基于连续运行基准站的动态定位理论与方法研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2010)
- [4] Kazmierski K, Sośnica K, Hadas T. Quality Assessment of Multi-GNSS Orbits and Clocks for Real-Time Precise Point Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2017, 22(1): 10-21
- [5] Seepersad G, Bisnath S. An Assessment of the Interoperability of PPP-AR Network Products [J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2017, 15(1): 4
- [6] Geng J. Rapid Integer Ambiguity Resolution in GPS Precise Point Positioning [D]. Nottingham, UK: University of Nottingham, 2010
- [7] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82: 389-399
- [8] Liu Shuai, Sun Fuping, Hao Wanliang, et al. Modeling and Effects Analysis of PPP Ambiguity Fixing Based on Integer Phase Clock Method [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(12): 1 230-1 237(刘帅,孙付平,郝万亮,等. 整数相位钟法精密单点定位模糊度固定模型及效果分析[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1 230-1 237)
- [9] Rovira-Garcia A, Juan J M, Sanz J, et al. Fast Pre-

- cise Point Positioning: A System to Provide Corrections for Single and Multi-frequency Navigation [J]. *Navigation*, 2016, 63(3): 231-247
- [10] Glocker M, Landau H, Leandro R, et al. Global Precise Multi-GNSS Positioning with Trimble Centerpoint RTX [C]. 6th IEEE ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (Navitec 2012) & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, Noordwijk, Netherlands, 2012
- [11] Dai L, Chen Y, Lie A, et al. StarFire™ SF3: Worldwide Centimeter-Accurate Real Time GNSS Positioning [C]. The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, 2016
- [12] Tobías G, Calle J D, García A J, et al. MagicGNSS' RTCM-Based Service, a Leap Forward Towards Multi-GNSS High Accuracy Real-Time Processing [C]. The 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Florida, 2015
- [13] Krzyżek R. Precision Analysis of Trimble RTX Surveying Technology with Xfill Function in the Context of Obtained Conversion Observations [J]. *Reports on Geodesy & Geoinformatics*, 2014, 97(1): 47-70
- [14] Chen Junping, Yang Sainan, Zhou Jianhua, et al. A Pseudo-range and Phase Combined SBAS Differential Correction Model [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(5): 537-546 (陈俊平, 杨赛男, 周建华, 等. 综合伪距相位观测的北斗导航系统广域差分模型 [J]. 测绘学报, 2017, 46(5): 537-546)
- [15] Chen Junping, Hu Yifan, Zhang Yize, et al. Preliminary Evaluation of Performance of BeiDou Satellite-Based Augmentation System [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(7): 1 075-1 082 (陈俊平, 胡一帆, 张益泽, 等. 北斗星基增强系统性能提升初步评估 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(7): 1 075-1 082)
- [16] Chen Junping, Zhang Yize, Zhou Jianhua, et al. Zone Correction: A New SBAS Differential Correction Model for BDS Decimeter-level Positioning [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(9): 1 161-1 170 (陈俊平, 张益泽, 周建华, 等. 分区综合改正: 服务于北斗分米级星基增强系统的差分改正新模型 [J]. 测绘学报, 2018, 47(9): 1 161-1 170)
- [17] Chen Junping, Zhang Yize, Yang Sainan, et al. A New Approach for Satellite Based GNSS Augmentation System: From Sub-meter to Better than 0.2 Meter Era [C]. Proceedings of the ION 2015 Pacific PNT Meeting, Honolulu, Hawaii, 2015
- [18] Zhang Yize, Chen Junping, Yang Sainan, et al. Analysis of PPP Performance Based on BDS Comprehensive Zone Corrections [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(2): 159-165 (张益泽, 陈俊平, 杨赛男, 等. 北斗广域差分分区综合改正数定位性能分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(2): 159-165)
- [19] Zhang Yize. Research on Real-Time High Precision BeiDou Positioning Service System [D]. Shanghai: Tongji University, 2017 (张益泽. 北斗实时高精度定位服务系统研究 [D]. 上海: 同济大学, 2017)
- [20] Yang Sainan. Research on BDS Decimeter Level SBAS and Its Performance Assessment [D]. Shanghai: Chinese Academy of Sciences, 2017 (杨赛男. 北斗分米级星基增强系统关键技术研究及精度评估 [D]. 上海: 中国科学院大学, 2017)
- [21] Wu Xiaoli, Zhou Jianhua, Tang Bo, et al. Evaluation of COMPASS Ionospheric Grid [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(4): 639-649
- [22] Gao Yang, Shen Xiaobing. A New Method for Carrier-Phase-Based Precise Point Positioning [J]. *Navigation*, 2002, 49(2): 109-116

A Fitting Algorithm and Positioning Analysis of BDS WADS Zone Correction

WANG Binghao^{1,2} ZHOU Jianhua² CHEN Junping^{3,4} ZHANG Yize^{3,5} WANG Ahao^{3,6}

1 School of Geospace Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2 Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

3 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

4 Department of Maritime Systems Engineering School of Astronomy and Space Science,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 Department of Maritime System Engineering, Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo 135-8533, Japan

6 College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: The BeiDou Navigation Satellite System (BDS) provides wide area differential service (WADS) for users in China territory by broadcasting equivalent satellite clock, orbit correction, ionospheric grid information and zone correction through Geostationary Earth Orbit (GEO) satellites. By using WADS corrections correctly, users with code observations can get meter-level positioning accuracy while carrier phase users can get decimeter-level result. However, the imperfection and discontinuity of zone correction bring a negative influence upon positioning. Aiming at solving the precision deterioration and positioning re-convergence caused by the discontinuity of zone correction, a fitting algorithm is proposed for zone correction generation and user's positioning. The fitting algorithm is established on the basis of the stability of double-differenced zone corrections. By fixing the zone correction of one reference satellite and the double-differenced bias between multiple zones and satellites, the correction gap can be filled up successfully. Then, the validity of the algorithm and the performance of fitting zone correction was evaluated by differential positioning experiments using observations from six Multi-GNSS Experiment (MGEX) stations within zone correction service range under kinematic PPP mode. Experiment results show that although the positioning precision of fitting zone corrections, which is 0.20 m and 0.44 m for horizontal and vertical components respectively, is slightly inferior to the result derived by using the original corrections. In the discontinuous periods of zone correction, the positioning results are much more stable and continuous, and without positioning re-convergence. With no additional information used in correction fitting, the algorithm can be used for the zone correction generation period and position, which will improve the service integrity and positioning reliability.

Key words: real-time precise point positioning; BDS WADS; zone correction; fitting algorithm; positioning precision

First author: WANG Binghao, PhD candidate, specializes in the GNSS wide area differential model and algorithm .E-mail: wangbinghao7@126.com

Corresponding author: CHEN Junping, PhD, professor. E-mail: junping@shao.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(11673050); the National Key Research and Development Program of China(2018YFB0504300).

引文格式: WANG Binghao, ZHOU Jianhua, CHEN Junping, et al. A Fitting Algorithm and Positioning Analysis of BDS WADS Zone Correction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(4):565-573. DOI:10.13203/j.whugis20180260(王兵浩, 周建华, 陈俊平, 等. 北斗 WADS 分区综合改正数拟合模型及定位分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(4):565-573. DOI:10.13203/j.whugis20180260)