



灾害应急环境下智能终端高精度北斗增强定位方法

祝会忠¹ 李 军¹ 徐爱功¹ 甄 杰² 雷啸挺¹

1 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新, 123000

2 中国测绘科学研究院, 北京, 100830

摘 要:针对灾害应急环境下的高精度定位需求,研究了一种基于智能终端的长距离北斗增强定位方法,通过长距离参考站提供非差误差改正数,用户可采用非常灵活的数据处理方法。采用分类误差处理满足长距离高精度增强定位的需求,实现用户长距离伪距增强定位、载波相位增强定位以及载波相位平滑伪距增强定位等多种增强定位方式。提出了基于非差误差改正数的相位平滑方法,通过消除误差后的观测值估计整周模糊度,然后重新拟合伪距观测值,并利用参考站平滑后的非差误差改正数削弱用户定位误差。伪距观测值不涉及模糊度,定位模式简单且实时性高,利用载波相位观测值来提高伪距定位的精度,能够更好地满足灾害应急环境下用户高精度定位的需求。在智能终端融合了针对用户专用接收机设备的增强定位数据处理方法,智能终端既可作为观测数据源,又可作为用户定位数据处理的载体。采用实测数据进行了智能终端增强定位算法验证与分析,结果表明所提方法能够实现用户实时厘米级、分米级和亚分米级等优于1 m的高精度定位。

关键词:灾害应急环境;智能终端;增强定位;北斗卫星导航系统;载波相位观测值

中图分类号: P228

文献标志码: A

中国的北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)具有可靠性好、覆盖范围广等优点。但受观测值精度、大气延迟误差、钟差等影响,其标准定位精度为20 m左右,如果采用低成本的接收设备,接收终端的观测数据质量较差,定位精度会更低。北斗增强定位可利用参考站网的差分定位方式降低用户的观测误差影响,是提高定位精度、实现实时动态高精度定位的主要手段。

在灾害环境和应急场景下,观测环境较复杂,定位影响因素的不确定性大,用户从附近的外部卫星定位辅助设施获得支持比较困难。专用导航定位接收设备在灾害应急环境下的适用性和可操作性不一定能够满足定位需求。因此,需要一种方便定位操作,且定位算法高效、数据利用率高,便于实现的增强定位算法,以满足灾害应急环境下用户对高精度定位的需求。采用通用、大众化的接收设备能够更好地满足用户对定位方便、高效、容易实现的需求。以民众广泛持有的智能手机为定位和操作载体,融合专用型

接收设备和大众化导航定位设备为一体,实现高精度定位,是灾害环境下用户定位的关键技术问题。大众化的智能手机终端作为定位和数据处理载体,对满足灾害应急环境下用户定位的需求更具有普及性和可行性。但是通用设备的观测值精度较低、观测噪声较大,完全不能满足灾害环境下对高精度定位的需求,特别是伪距观测值的噪声较大限制了伪距定位的精度。同时,在灾害环境下,由于周围环境遭到破坏及其他影响,用户周围的参考站网存在损坏的风险,能够提供增强定位信息的参考站网可能距离用户较远,即需要采用长距离参考站。但随着参考站与用户之间距离的增加,参考站与用户电离层延迟误差、对流层延迟误差等误差的空间相关性减弱,降低了用户误差改正和定位的精度。为了满足灾害应急环境下的高精度定位需求,需要解决长距离参考站网提供增强定位改正数的精度问题。

目前,卫星增强定位方面的研究成果较多^[1-8]。这些增强定位方法主要采用数十千米站间距的参考站网进行实验,并实现了GPS、BDS

的高精度定位。而长距离增强定位参考站间距超过100 km,参考站间距较大,观测误差的空间相关性小,高精度误差改正数计算困难。已有的智能终端定位研究成果对智能手机的数据质量、定位精度以及传统的定位算法进行了分析^[9-17],但缺乏对智能终端长距离增强定位方面的研究,多是将智能手机作为定位源,没有作为用户定位的操作载体使用。北斗伪距观测值精度低于载波相位观测值精度,伪距观测值噪声较大,一般通过相位平滑伪距降低噪声的影响^[18-19]。高精度增强定位多是采用载波相位观测数据,实现高精度定位的前提是模糊度的准确求解,参数求解的过程较复杂,在灾害应急环境中影响定位的因素较多,不能够保证完全满足解算要求。同时,智能终端的数据处理能力有限,需要使用方便数据处理、计算效率高的算法进行增强定位。

因此,本文研究了一种基于智能终端、适用于灾害应急环境下的长距离北斗系统增强定位方法,并在智能终端融合了针对专用接收机设备的增强定位数据处理方法,实现了集成BDS、通信网等多种手段为一体的空间位置获取技术,智能终端即可作为观测数据源,又可作为用户定位的操作载体。采用长距离参考站网的非差误差改正数进行用户伪距和载波相位观测值的改正,增强定位的实现更灵活,用户数据处理简单、效率高。该方法能够根据观测值类型的不同和各类观测值的优点,实现长距离的伪距增强定位、载波相位增强定位以及载波相位平滑伪距增强定位等多种增强定位方式,通过分类误差改正的处理方法生成高精度非差误差改正数。

1 北斗伪距和载波相位观测方程

智能终端增强定位采用的北斗系统观测值包括伪距观测值和载波相位观测值,北斗系统有B1、B2、B3频率的观测数据,非差伪距和载波相位的观测方程为:

$$C_{iu}^S = R_u^S + H^S \delta X + ct_u - ct^S + I_{iu}^S + T_u^S \quad (1)$$

$$\lambda_i \varphi_{iu}^S = R_u^S + H^S \delta X + \lambda_i N_{iu}^S + ct_u - ct^S - I_{iu}^S + T_u^S \quad (2)$$

式中, C 、 φ 表示卫星 S 频率 i 的伪距观测值和载波相位观测值; R 为接收机到卫星的几何距离; δX 为位置参数; H 为测站位置参数的系数; λ 为载波相位的波长; N 为载波相位观测值的整周模糊度; c 为光速; t_u 为接收机钟差; t^S 为卫星钟差; I_{iu}^S 表示电离层延迟误差; T_u^S 表示以对流层延迟、卫星轨

道误差为主的非色散性误差;上标 S 表示卫星;下标 u 表示测站。

2 灾害应急环境下增强定位误差改正数的计算

传统增强定位多采用双差观测模型,造成了测站和卫星间的相关性,增加了数据处理难度,降低了定位算法的兼容性,且需要考虑模糊度承接以及法方程变换的问题。在灾害应急环境中智能终端的数据处理能力有限,应使用最方便计算、效率最高的数据处理算法进行增强定位。因此,采用非差观测误差改正数的方式进行灾害应急环境下用户观测值的误差改正,使用远离灾害发生区域的参考站发送包含模糊度和误差改正信息的改正数,可消除卫星钟差的影响,削弱大气误差和卫星轨道误差,用户数据处理简单,兼容性强。

2.1 长距离参考站非差改正数的计算

以参考站 A 为例,计算伪距和载波相位观测值的非差误差改正数。根据式(1)和式(2),参考站 A 的伪距和载波相位非差误差改正数为:

$$O_{i,c,A}^S = C_{i,c,A}^S - R_A^S = T_A^S + I_{i,c,A}^S + c(t_A - t^S) \quad (3)$$

$$O_{i,A}^S = \lambda_i \varphi_{i,A}^S - R_A^S = \lambda_i N_{i,A}^S + T_A^S - I_{i,A}^S + c(t_A - t^S) \quad (4)$$

式中, $O_{i,c,A}^S$ 、 O_A^S 为伪距和载波相位观测值的非差改正数;下标 A 表示参考站。采用相同的方式可得到其他卫星参考站的非差误差改正数。用户获得了一个参考站的误差改正数,则直接改正非差观测值,根据式(1)-(4)可得经非差改正数改正后的用户观测方程为:

$$C_{iu}^S - O_{i,c,A}^S = R_u^S + H^S \delta X + ct_u - ct^S + I_{iu}^S + T_u^S - O_{i,c,A}^S \quad (5)$$

$$\lambda_i \varphi_{iu}^S - O_{i,A}^S = R_u^S + H^S \delta X + \lambda_i N_{iu}^S + ct_u - ct^S - I_{iu}^S + T_u^S - O_{i,A}^S \quad (6)$$

经过非差改正数改正后,用户消除了卫星钟差及硬件延迟误差,削弱了电离层延迟误差、对流层延迟误差以及轨道误差。仍存在用户接收机钟差和参考站钟差的影响,则用户非差观测方程表示为:

$$C_{iu}^S - O_{i,c,A}^S = R_u^S + H^S \delta X + ct + \delta I_{iu}^S + \delta T_u^S \quad (7)$$

$$\lambda_i \varphi_{iu}^S - O_{i,A}^S = R_u^S + H^S \delta X + \lambda_i N_{iu}^S + ct - \delta I_{iu}^S + \delta T_u^S \quad (8)$$

式中,接收机钟差为 $t = t_u - t_A$,将两个接收机钟差合并进行参数估计; δT 和 δI 分别表示对流层误差和电离层误差的残差,模糊度参数包含了参考

站模糊度信息。以单颗卫星为对象进行误差改正,式(8)中的载波相位整周模糊度是非组合模糊度,用户观测值通过非差误差改正数的改正之后,恢复了载波相位模糊度的整数特性,可以进行载波相位整周模糊度的解算。

2.2 长距离参考站网分类误差改正数的计算

在灾害应急环境下,如果使用远离灾害发生区域的单个参考站提供的非差误差改正数,不需要进行误差改正数的内插计算,可直接使用单个参考站的非差误差改正数。但在灾害发生的长距离增强定位时,还需要采用远离灾害区域的长距离参考站网中由多个参考站提供的增强定位信息。北斗长距离增强定位方法实现高精度定位的关键是通过参考站网计算出非差误差改正数,以削弱用户观测误差的影响,使残差不影响用户载波相位整周模糊度的准确确定和高精度定位的实现。增强定位一般是采用综合处理各类观测误差的方式进行用户误差改正,在长距离情况下,使用综合误差处理方式不能准确求出用户所在空间位置的误差改正数。因此,按照误差性质对观测误差改正信息进行分类处理。将电离层延迟误差和以对流层延迟误差为主的非色散误差分离,分别内插计算非差改正数,误差分类非差内插方法示意图见图1,A、B、C为3个远离灾害发生区域的参考站,U为灾害应急环境下的用户,即智能终端。

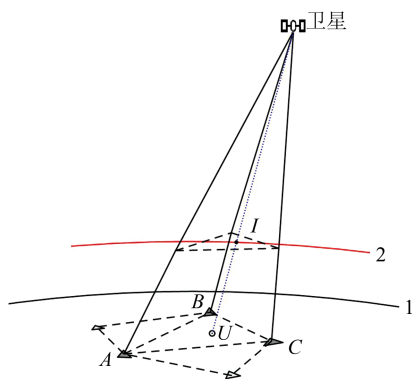


图1 分类误差内插示意图

Fig.1 Diagram of Classified Error Interpolation

图1中,误差内插面1为参考站网和用户所在的地球表面,在该内插面上对与频率无关的非色散性误差进行内插计算;误差内插面2的高度为中心电离层高度,在该内插面上进行用户电离层延迟误差的内插计算。内插面2上I点为用户卫星的电离层穿刺点。

设参考站A、卫星S的非差电离层延迟误差

为 I_{iA}^S ,除电离层延迟误差以外的与频率无关的非色散性误差为 T_A^S 。类似地,可得参考站A、B、C与卫星S的非差电离层延迟误差改正数、与频率无关的非色散性误差改正数。通过内插计算得到用户的非差电离层延迟误差改正数和非色散性误差改正数分别为:

$$\begin{aligned} I_{iu}^{OS} &= a_A^I \cdot I_{iA}^S + a_B^I \cdot I_{iB}^S + a_C^I \cdot I_{iC}^S \\ T_{iu}^{OS} &= a_A \cdot T_A^S + a_B \cdot T_B^S + a_C \cdot T_C^S \end{aligned} \quad (9)$$

式中, a_A^I, a_B^I, a_C^I 为非差电离层延迟误差的内插系数,利用各测站每颗卫星的电离层穿刺点位置坐标计算得到; a_A, a_B, a_C 为非差非色散性误差内插的系数,可以根据用户与参考站网各站地球表面的位置计算得到。用户非差误差内插系数的关系为 $a_A^I + a_B^I + a_C^I = 1, a_A + a_B + a_C = 1$ 。非差误差改正数的使用与式(5)、式(6)相同,得到与式(7)、式(8)一致的用户观测方程。不同的是长距离参考站网提供的是非色散性误差改正数和非差电离层延迟误差改正数,是由多个参考站内插计算的,式(5)、式(6)使用的是一个包含模糊度信息的非差误差改正数。

3 灾害应急环境下用户增强定位的实现

根据外部长距离参考站提供的误差改正数,灾害应急环境下用户可实现不同类型的增强定位。北斗用户的主要观测数据是伪距和载波相位,本文采用的长距离增强定位方法由参考站提供了伪距观测值和载波相位观测值的非差误差改正数。因此,智能终端增强定位采用伪距观测值和载波相位观测值两种类型,增强定位数据处理也是基于伪距观测值和载波相位观测值。

3.1 伪距增强定位

伪距观测值不涉及模糊度,数据处理简单/快速,且实时性高,是灾害环境下用户定位的首选。但是伪距单点定位的误差影响较大,定位精度低,不能满足灾害应急中用户定位精度的需求。因此,利用参考站提供的非差误差改正数对用户观测误差进行改正,根据非差误差改正数计算方法,可得非差观测误差改正之后的伪距观测方程为:

$$\begin{cases} C_{iu}^1 - O_{i,c}^1 = R_u^1 + H^1 \delta X + ct + \delta I_{iu}^1 + \delta T_u^1 \\ \vdots \\ C_{iu}^S - O_{i,c}^S = R_u^S + H^S \delta X + ct + \delta I_{iu}^S + \delta T_u^S \end{cases} \quad (10)$$

式中,上标1、S为卫星编号。

如果是采用参考站网计算增强定位信息,则

式(10)中的非差误差改正数 $O_{i,c}$ 为式(9)计算出的分类误差改正数总和。不管是单个参考站的非差误差改正,还是长距离参考站网的分类非差观测误差改正,都能够消除卫星钟差的影响,削弱卫星轨道、对流层延迟误差、电离层延迟误差等空间相关误差的影响。非差误差改正之后的电离层延迟误差残余 δI_{iu} 和对流层延迟误差残余 δT_u 都较小,对于伪距观测值量级的定位,可提高智能终端伪距定位的精度,定位精度主要受伪距观测值精度和观测噪声的影响。

$$\begin{cases} \lambda_i \varphi_{iu}^1 - O_i^1 = R_u^1 + H^1 \delta X + \lambda_i N_{iu}^1 + ct - \delta I_{iu}^1 + \delta T_u^1 \\ \vdots \\ \lambda_i \varphi_{iu}^S - O_i^S = R_u^S + H^S \delta X + \lambda_i N_{iu}^S + ct - \delta I_{iu}^S + \delta T_u^S \end{cases} \quad (11)$$

参考站提供的非差误差改正数能够消除卫星钟差的影响,削弱了卫星轨道、对流层延迟误差、电离层延迟误差等空间相关误差的影响,但对电离层延迟误差残余 δI_{iu} 和对流层延迟误差残余 δT_u 的精度要求比伪距增强定位更高,要求残余误差不影响恢复载波相位观测值模糊度的整数特性。采用非差观测误差改正数,特别是采用分类误差改正方法,可以恢复用户载波相位模糊度的整数特性,以便于进行载波相位整周模糊度的准确解算。

估计参数随时间变化可分为时变参数和时不变参数,对于位置参数和接收机钟差采用消参方法,以便进行下一历元法方程叠加,而模糊度参数则从初始历元一直叠加。本文采用非差非组合的模糊度解算方法,不需要考虑基准卫星的变换,数据处理简单。式(11)中的载波相位整周模糊度是非差非组合载波相位整周模糊度,利用最小二乘估计方法解算载波相位整周模糊度参数和其他未知参数,得到各未知参数估计的法方程信息。先根据参数的方差协方差矩阵搜索确定各卫星载波相位整周模糊度^[20],再使用载波相位观测值计算用户的位置坐标。

3.3 载波相位平滑伪距增强定位

智能终端获得的伪距观测值精度低,观测噪声大,限制了伪距定位的精度。载波相位观测值的精度较伪距观测值高2~3个数量级,但使用载波相位观测值进行高精度定位的前提是整周模糊度的准确求解,参数解算过程较复杂。在灾害应急环境下实现高精度定位不能仅依靠定位算法简单的伪距增强定位和精度较高的载波相位增强定位,还要兼容载波相位平滑伪距增强定位。利用载波相位观测值来提高伪距定位的精

3.2 载波相位增强定位

虽然基于非差误差改正数的伪距增强定位数据处理简单,但是灾害应急环境下智能终端使用伪距定位时,观测噪声影响大,伪距增强定位只能在观测噪声较小(采用专业接收设备)的情况下满足灾害环境下用户定位精度的需求。因此,采用载波相位增强定位是保证用户定位精度的主要方法,利用长距离参考站提供的非差误差改正数对用户误差进行改正,可得用户非差误差改正之后的载波相位观测方程为:

度,可充分发挥伪距定位简单和载波相位观测值高精度的优势。用户伪距观测值经过载波相位平滑后噪声减小,但仍受各种观测误差影响,利用非差误差改正数可进一步提高定位精度,同时需要进行非差误差改正数的相位平滑。

由式(1)、式(2)可得用户载波相位平滑伪距观测值为:

$$\bar{C}_{iu}^S = \lambda_i \varphi_{iu}^S + \langle \lambda_i N_{iu}^S \rangle + 2I_{iu}^S \quad (12)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 表示多个历元求均值;平滑后的第 k 个历元以距离为单位的载波相位模糊度是 $\langle \lambda_i N_{iu}^S \rangle = \frac{1}{k} \left(\sum_{t=1}^k C_{iu,t}^S - \sum_{t=1}^k \lambda_i \varphi_{iu,t}^S \right)$ 。

可通过非差误差改正数或者无电离层组合观测值来改正电离层延迟误差的影响。随着平滑历元的增加,伪距观测值的噪声逐步减小,噪声对定位结果的影响将减小。以初始历元的观测值为初始基准,以载波相位观测值的历元间变化为伪距观测值的变化量,通过初始基准和变化量来拟合伪距观测值。式(12)仅受第一历元伪距观测值噪声的影响,载波相位观测值噪声较小,可以忽略其影响。在灾害应急环境下,当有周跳发生时,则以发生周跳历元重新为基准继续进行平滑。

对非差伪距误差改正数进行载波相位平滑伪距处理,平滑后的值通过多历元计算得到,多历元的贡献在于对模糊度的求取和观测噪声的降低,而其他观测误差不随历元数而叠加。以参考站 A 为例,平滑后卫星 S 伪距误差改正数 \bar{O}_{iA}^S 可以表示为:

$$\bar{O}_{iA}^S = \bar{C}_{iA}^S - R_A^S = ct_A - ct^S + I_{iA}^S + T_A^S \quad (13)$$

式中,误差改正数 \bar{O}_{iA}^S 包含接收机钟差、卫星钟差、电离层延迟误差、对流层延迟误差和卫星轨

道误差。与未平滑的误差改正数相比,平滑后的误差改正数受观测值噪声的影响较小,得到的误差改正数更加准确。所以在参考站播发伪距误差改正数时,可以优先播发平滑后的非差误差改正数,提高播发的改正数精度。用户载波相位平滑观测值的误差改正和位置参数计算公式为:

$$\begin{aligned} \tilde{C}_{iu}^S - \tilde{O}_{iA}^S &= R_u^S + H^S \delta X + ct_u - ct^S + I_{iu}^S + \\ &T_u^S - \tilde{O}_{iA}^S \end{aligned} \quad (14)$$

用户观测值经过非差改正数改正后,消除了卫星钟差,削弱了电离层延迟误差、对流层延迟误差以及轨道误差等误差。接收机钟和参考站钟差合并为一个参数,则用户非差观测方程表示为:

$$\tilde{C}_{iu}^S - \tilde{O}_{iA}^S = R_u^S + H^S \delta X + ct + (\delta I_{iu}^S + \delta T_u^S) \quad (15)$$

式中的非差误差改正数也可以是通过多参考站计算得到的平滑后非差误差改正数, $(\delta I_{iu}^S + \delta T_u^S)$ 为平滑后误差改正的残余。

如果是参考站网提供非差误差改正数,先利用分类误差改正方法进行误差改正数计算和相位平滑,然后形成非差误差改正数。利用相似的方法可以得到用户所有可用卫星经过误差改正之后的观测方程,观测误差改正之后的电离层延迟误差残余和对流层延迟误差的残余都较小。因为没有进行整周模糊度解算,定位精度相对于载波相位增强定位略低。通过载波相位平滑伪距降低了伪距观测值的噪声,同时不受载波相位整周模糊度解算的影响,相对于伪距增强定位可提高智能终端定位解算的精度,相对于载波相位增强定位,数据处理解算简单。

4 算例分析

本文对灾害应急环境下智能终端增强定位算法进行了软件实现,研发了智能终端增强定位数据处理应用(application, APP),该APP布置在智能终端。除了处理智能终端采集的卫星观测数据之外,兼容了接收处理用户专业接收设备观测数据和长距离参考站网生成的外部增强定位信息,智能终端增强定位算法的实现流程如图2所示。

智能终端的增强定位数据处理APP接收用户专用接收设备观测数据,如果在灾害应急环境下用户没有配备专用的接收设备,则采用智能终端采集的观测数据。同时,智能终端接收长距离参考站网生成的外部增强定位信息,该增强定位

信息是由数据处理服务器提供的,采用非差误差改正数计算方法得到。本文的增强定位信息不是第三方提供的,是自编软件计算生成的非差误差改正数,所以智能终端的增强定位信息输入非常稳定。根据增强信息的种类,利用伪距非差误差改正数和伪距观测值进行单历元的伪距增强定位,根据载波相位非差误差改正数和载波相位观测值可进行载波相位增强定位,同时利用伪距和载波相位观测值及非差改正数进行相位平滑伪距定位,以多种定位数据处理模式满足灾害应急环境下的定位需求。将智能终端的高精度定位结果与应急管理的位置服务系统进行交互,提供用户的高精度位置信息。在灾害发生和应急环境下,长距离参考站网可以利用远离灾害发生区域、运行稳定的参考站网提供增强定位信息,是解决灾害应急环境中用户高精度定位的首要手段,因此采用长距离参考站网提供增强定位信息进行智能终端定位实验。

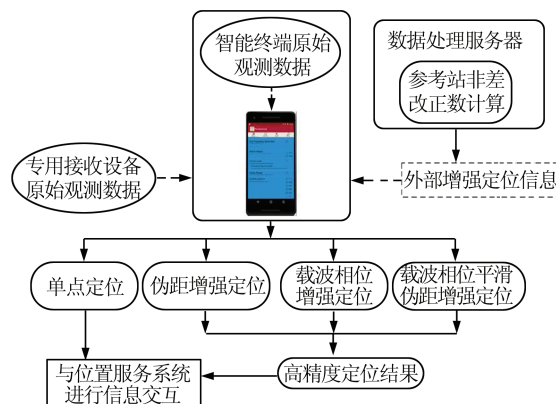


图2 智能终端增强定位算法流程图

Fig.2 Flowchart of Augmented Positioning on Smart Device

4.1 实验1:用户智能终端专业接收机增强定位实验

利用华北地区3个参考站 Base 1、Base 2、Base 3和1个用户 Move 专业接收设备的北斗实测数据进行增强定位算法实验,观测时间为2018-08-27。参考站网中各站间的距离在100 km以上,用户距离各参考站70 km以上,满足长距离参考站网数据处理实验要求。测站分布如图3所示。

由单个和多个参考站分别提供长距离的非差误差改正数增强信息。将未进行误差改正的北斗伪距单点定位结果和相位平滑伪距定位结果与准确值进行比较,图4是定位结果与准确值的差值在北(north, N)、东(east, E)和天顶(up,

U)方向的时间序列。

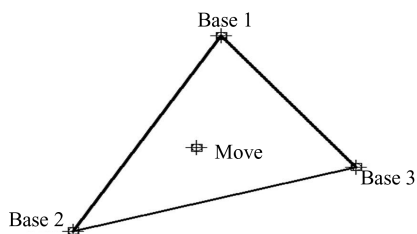


图3 测站分布

Fig.3 Distribution of Stations

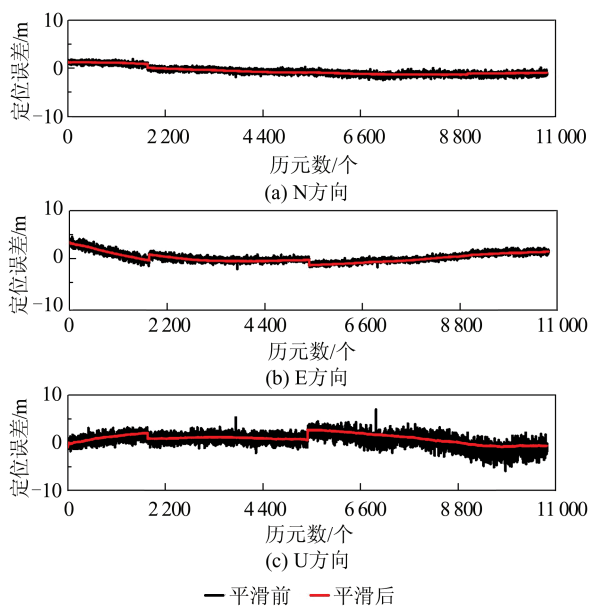


图4 用户定位结果偏差

Fig.4 Biases of User Positioning

从图4中可以看出,在没有任何误差改正增强信息时,通过载波相位平滑伪距能使定位结果更加平稳,这是由于相位平滑使误差对定位结果的影响较稳定,主要是降低了伪距观测噪声。图4中3个方向的定位结果均出现了跳动,是由卫星钟差引起的,用户单独定位时卫星钟差的影响不能消去,而利用参考站提供的误差改正数可以完全消去卫星钟差的影响,改善由卫星钟差引起的跳跃。由于用户未对各种误差进行改正,误差的影响较大,定位结果不稳定。表1是定位结果偏差的均方根(root mean square, RMS)值,相比于未平滑之前3个方向RMS值分别提升6%、5%、15%。平滑算法能使用户定位结果稳定,在定位精度上也会有所提升,但各种误差对用户的影响较大,使得用户定位的精度较差。

使用参考站非差误差改正数对用户进行误差改正,用改正后的相位平滑伪距观测值进行用户站定位,将利用非差误差改正数进行改正的伪距增强定位结果与载波相位平滑后的伪距增强

结果与准确值比较,图5是定位结果的差值在N、E和U方向的时间序列。从图5可以看出,参考站非差误差改正数改正后用户定位结果不受卫星钟差影响,定位结果不再出现跳动,定位结果非常稳定,平滑后结果可以很快趋于平稳。从表1的定位结果偏差RMS值来看,未平滑的伪距增强定位N、E、U方向的RMS值分别为0.277 m、0.594 m、0.985 m,平滑后增强定位的N、E、U方向的RMS值分别为0.080 m、0.175 m、0.229 m。相比于未平滑之前,N、E、U这3个方向的RMS值分别提升346%、339%、430%,平滑后的精度较平滑之前有了很大的提高。

表1 用户定位结果差值的RMS/m

Tab.1 RMS of User Station Positioning Bias/m

定位方式	相位平滑	定位结果差值RMS		
		N	E	U
单点定位	平滑前	1.058	1.041	1.499
	平滑后	1.002	0.996	1.299
单参考站增强定位	平滑前	0.277	0.594	0.985
	平滑后	0.080	0.175	0.229
多参考站增强定位	平滑前	0.224	0.349	0.713
	平滑后	0.034	0.171	0.185
载波相位增强定位		0.014	0.012	0.023

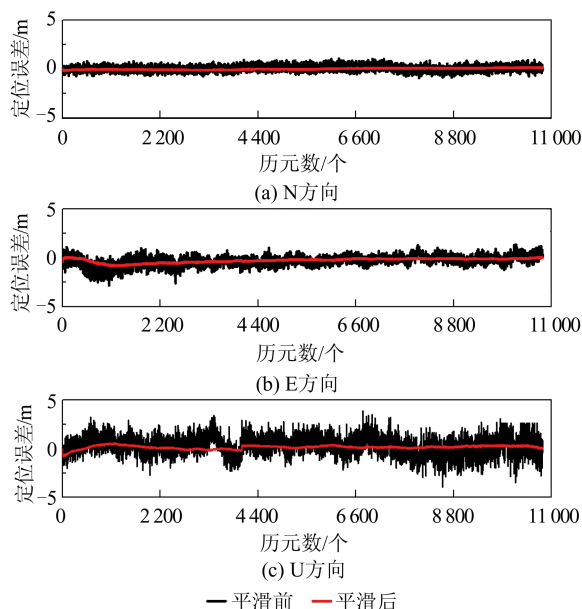


图5 单参考站增强定位结果偏差

Fig.5 Biases of Augmented Positioning of Single Base Station

采用多个参考站提供的分类误差非差误差改正数对用户进行误差改正,用改正后的观测值

进行用户定位,将平滑前与平滑后定位结果与准确值比较,图6给出了定位结果的差值在N、E和U方向的时间序列信息。图7为利用参考站非差误差改正数进行载波相位增强定位结果的差值时间序列。

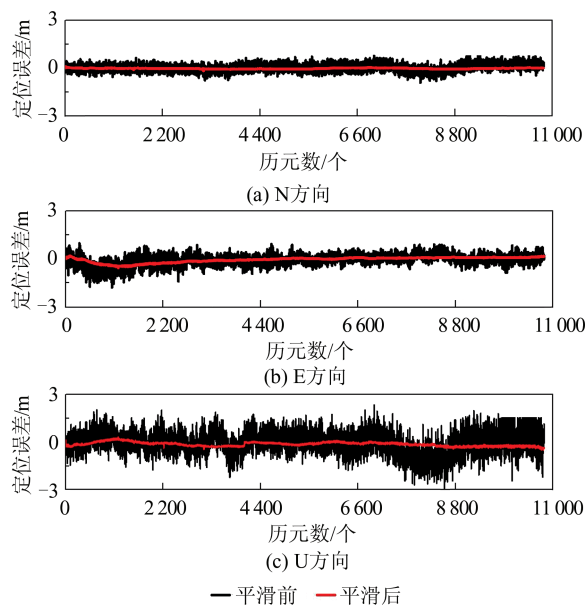


图6 多参考站增强定位结果偏差

Fig.6 Biases of Augmented Positioning of the Base Stations

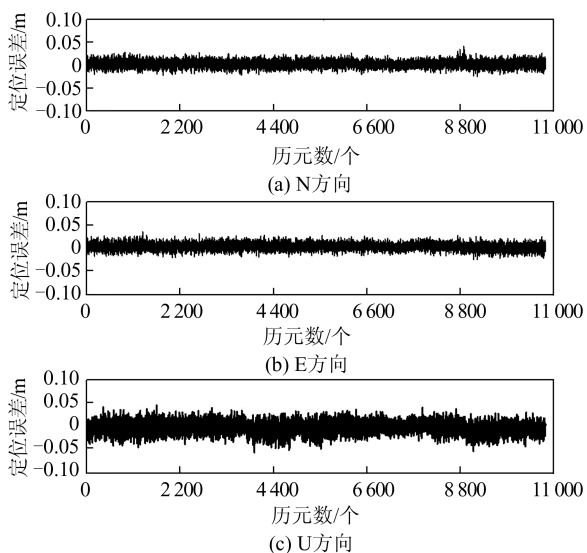


图7 载波相位增强定位结果偏差

Fig.7 Biases of Augmented Positioning with Carrier Phase

从表1统计的定位结果差值RMS可知,图6中平滑前N、E、U方向的RMS值分别为0.224 m、0.349 m、0.713 m,平滑后N、E、U方向的RMS值为0.034 m、0.171 m、0.185 m,相比于平滑前N、E、U 3个方向的RMS值分别提升658%、204%、385%,平滑后的结果较平滑之前有了很大的提

高,平滑后结果可以很快趋于平稳。采用长距离参考站网的误差分类非差改正数计算方法得到的定位结果精度优于采用单参考站提供的非差误差改正数得到的定位结果,这是因为多参考站的误差改正精度更可靠。伪距增强定位和载波相位平滑伪距增强定位不需要进行载波相位整周模糊度的解算,算法简单,计算效率高,但定位结果精度不如进行整周模糊度解算的载波相位增强定位。图7中载波相位增强定位N、E、U 3个坐标方向差值的RMS分别为0.014 m、0.012 m、0.023 m。载波相位增强定位采用的是单历元观测值定位解算的方式,由于载波相位整周模糊度能够准确固定为整数,定位结果优于伪距增强和载波相位平滑伪距增强定位。

用户定位精度能够反映非差误差改正的效果,从表1中各增强定位的精度来看,本文采用的非差误差改正数的精度较高,完全能够满足灾害应急环境下用户的定位需求。为了更直观地反映误差改正数的精度,将误差改正数与准确值进行对比,其中载波相位误差改正数精度要求最高。因此,以北斗卫星编号C03、C07为例,采用分类误差改正方法得到的载波相位误差改正数与准确值的差值见图8、图9。采用不同的误差内插计算方式,在中心电离层高度进行电离层延迟误差的内插计算,更符合长距离误差改正的特点。从图8、图9中可以看出,分类误差改正方法的载波相位改正数精度较高,提高了误差改正的精度。用户的误差改正精度在厘米级水平,能够恢复用户载波相位模糊度的整数特性,保证载波相位整周模糊度的准确解算和高精度定位的实现,所以图7的载波相位增强定位精度较高。

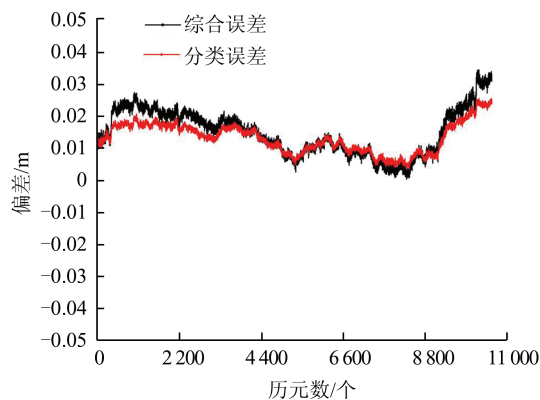


图8 C03误差改正数偏差

Fig.8 Error Correction Biases of C03

4.2 实验2:用户智能终端增强定位实验

实验1是专业接收设备在智能终端APP进

行数据处理,智能终端的型号为小米8智能手机。同时,在长距离参考站网提供增强定位信息的情况下,采用两个小米8智能终端进行原始北斗观测数据采集,使用的天线为智能终端内置天线。在灾害应急环境下,如果用户没有配备专业接收设备,就需要采用智能终端采集的观测数据进行增强定位。对北斗卫星观测数据进行多路径误差和信噪比分析,智能终端原始观测数据的多路径误差和信噪比时间序列见图10、图11。

从数据质量上来看,智能终端采集的原始观测数据质量较差。在灾害应急环境下进行定位时,如果用户可以使用专业接收设备,优先使用专业接收设备。智能终端伪距观测值噪声较大,采用载波相位平滑伪距的方式降低观测值的噪

声和使用载波相位观测值进行增强定位,以提高智能终端原始观测数据的定位精度。

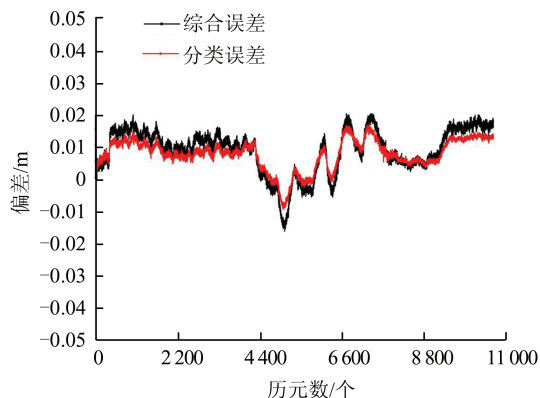


图9 C07误差改正数偏差

Fig.9 Error Correction Biases of C07

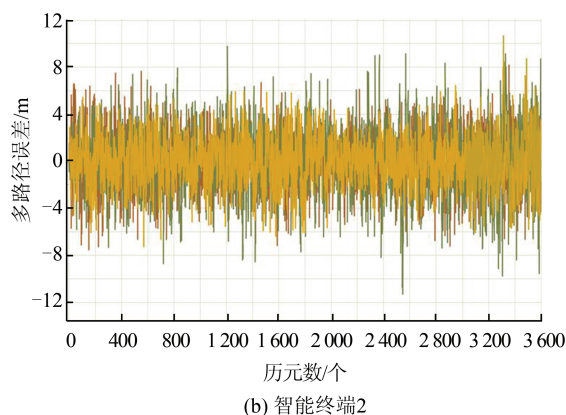
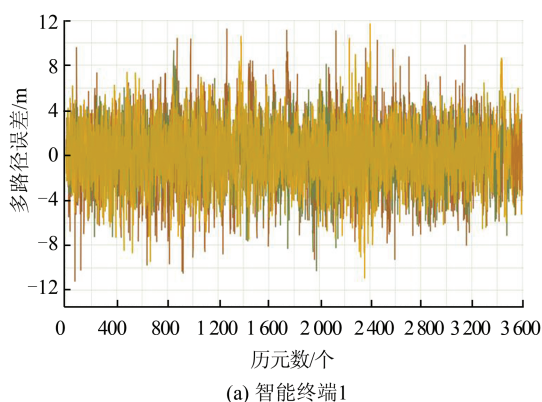


图10 智能终端多路径误差

Fig.10 Multipath Error of Smart Device

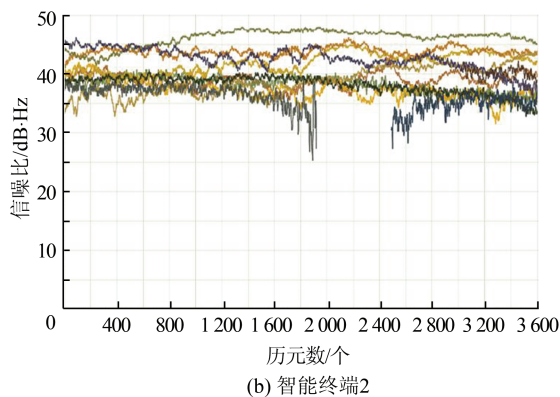
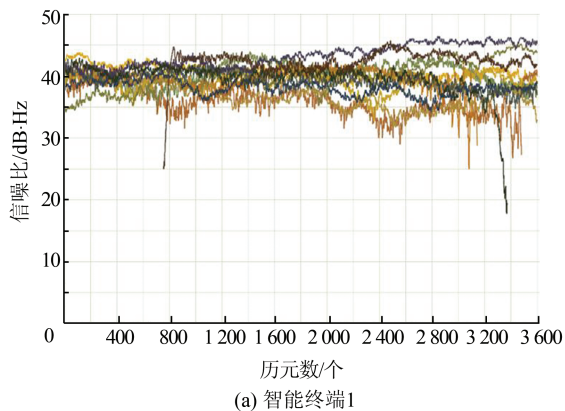


图11 智能终端信噪比

Fig.11 Signal to Noise Ratio of Smart Device

虽然智能终端的观测值数据质量较差,但是通过增强定位和载波相位平滑伪距可以提高原始观测数据的定位精度,两个智能终端的单点定位和增强定位结果与准确值偏差的时间序列如图12-19所示,其中智能终端1的定位结果差值为图12-15,智能终端2的定位结果差值为图

16-19。

智能终端伪距单点定位结果精度较低,伪距增强定位结果精度提升也有限,主要是因为智能终端采集的原始数据伪距观测噪声大,其他观测误差改正之后的定位精度提升不显著。而利用载波相位平滑伪距之后的观测值噪声明显减小,

不管是单点定位还是增强定位,平滑后伪距的定位结果较平稳,定位精度也有很大的提升,特别是平面定位精度提升明显。从表2的定位结果差值统计信息可知,相位平滑后的伪距增强定位平面精度优于1 m。

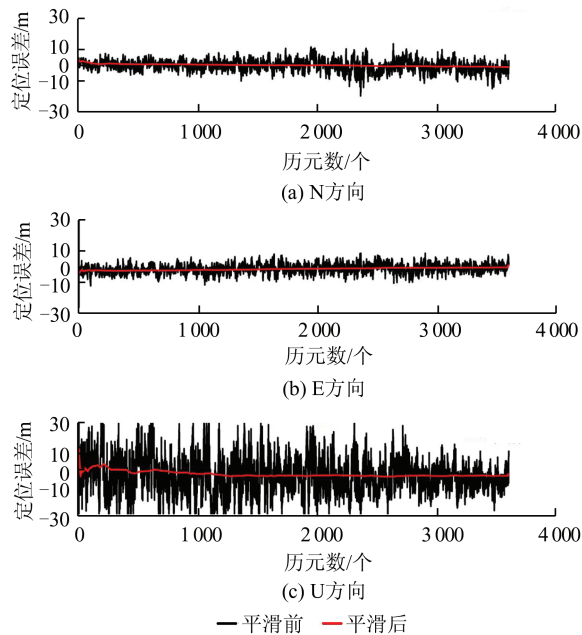


图 12 单点定位偏差(智能终端1)

Fig.12 Biases of Single Point Positioning(Smart Device 1)

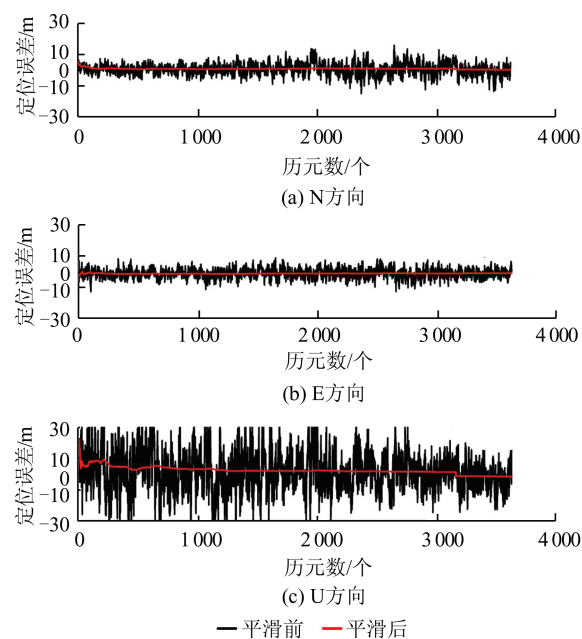


图 13 伪距增强定位偏差(智能终端1)

Fig.13 Biases of Augmented Positioning with Pseudo-Range(Smart Device 1)

智能终端载波相位增强定位采用了固定解和浮点解两种模式,浮点解从定位精度收敛开始进行统计。载波相位增强定位的固定解精度达

到厘米级,有些历元模糊度固定结果不可靠,但定位精度也优于1 m。在灾害发生的极端条件下如果载波相位整周模糊度的固定解获取困难,则可以使用载波相位整周模糊度的浮点解进行定位,通过多历元观测数据的计算,浮点解定位精度可以达到厘米级。与载波相位固定解的厘米级精度相比,浮点解的精度稍低,但是也能很容易地获得优于1 m的定位精度。

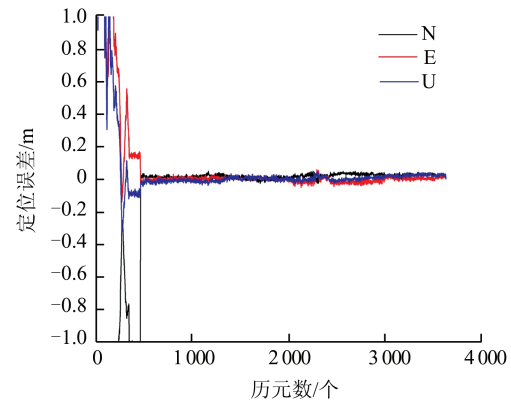


图 14 载波相位增强定位偏差(固定解,智能终端1)

Fig.14 Biases of Augmented Positioning with Carrier Phase(Fixed, Smart Device 1)

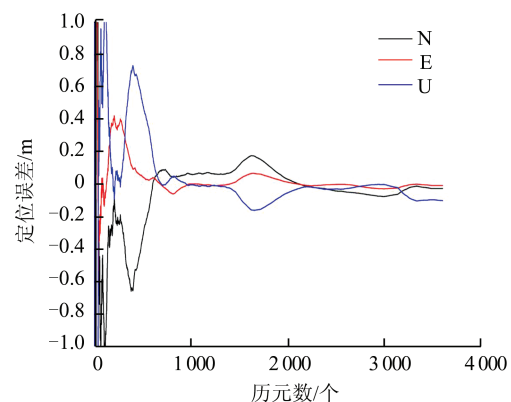


图 15 载波相位增强定位偏差(浮点解,智能终端1)

Fig.15 Biases of Augmented Positioning with Carrier Phase(Float, Smart Device 1)

4.3 实验3:用户智能终端增强定位动态实验

灾害应急环境下用户的动态增强定位性能也是重要需求之一,使用长距离参考站网提供的增强定位信息进行动态定位实验。利用专业接收设备和智能终端采集原始数据,在辽宁工程技术大学操场进行动态定位实验,采用辽宁省连续运行参考站网提供的长距离非差误差改正信息。将专业接收设备和智能终端固定在一起,智能终端的型号为小米8智能手机。沿着操场边缘移动,操场边缘有部分树木遮挡情况,观测条件相对恶劣,可模拟出较差的观测环境。将专业接收

设备和智能终端平面定位结果轨迹进行叠加比较,如图20所示。

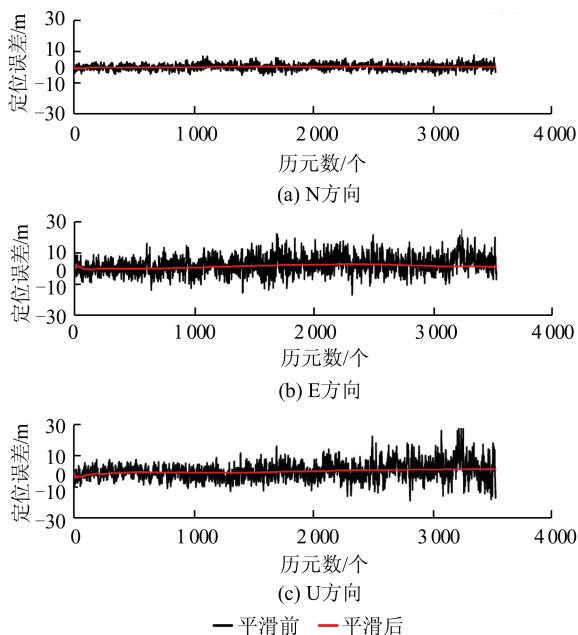


图16 单点定位偏差(智能终端2)

Fig.16 Biases of Single Point Positioning(Smart Device 2)

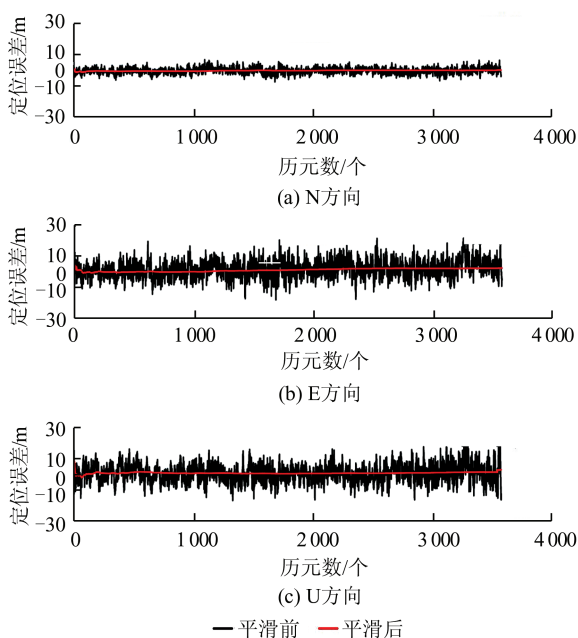


图17 伪距增强定位偏差(智能终端2)

Fig.17 Biases of Augmented Positioning with Pseudo-Range(Smart Device 2)

专用型接收机的观测数据质量较高,本文使用高精度的全球导航卫星系统定位数据处理软件对接收的专用接收机观测数据进行了增强定位结果的检验,其增强定位结果精度在厘米级。大部分智能终端的定位轨迹与专用接收机的定位轨迹重合,定位精度为厘米级水平,部分智能

终端的定位结果在运动轨迹附近分布,智能终端的总体定位结果较好,定位精度优于1 m。

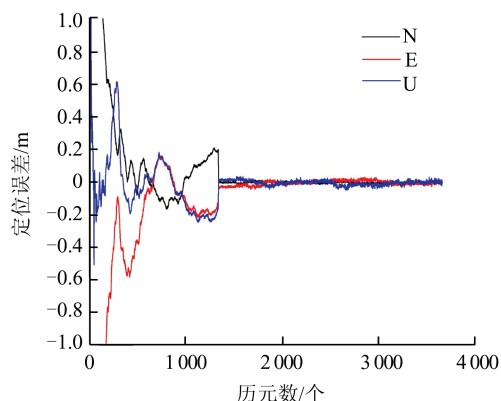


图18 载波相位增强定位偏差(固定解,智能终端2)

Fig.18 Biases of Augmented Positioning with Carrier Phase(Fixed,Smart Device 2)

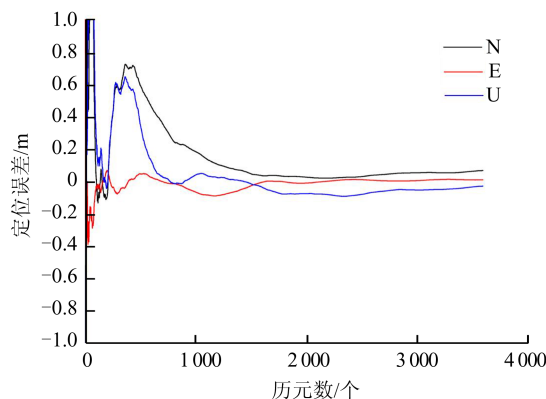


图19 载波相位增强定位偏差(浮点解,智能终端2)

Fig.19 Biases of Augmented Positioning with Carrier Phase(Float,Smart Device 2)

从多种类型的实验结果可知,本文基于智能终端的长距离增强定位方法,利用长距离参考站网提供非差误差改正数实现了伪距增强定位、载波相位增强定位和载波相位平滑伪距增强定位,用户可实现实时厘米级、分米级和亚分米级等优于1 m的高精度定位,能够满足灾害应急环境下用户定位的需求。

5 结语

本文利用非差误差改正数实现了基于智能终端的、适用于灾害应急环境的长距离北斗增强定位方法,并在智能终端融合了对用户专业接收机设备的增强定位数据处理方法,数据处理算法简单高效,集成了北斗卫星导航系统、通信网等手段为一体的空间位置获取技术,智能终端即可作为观测数据源,又可作为用户定位的操作和数据处理终端。观测模型上兼容了长距离的伪距

增强定位、载波相位增强定位以及载波相位平滑伪距增强定位等多种增强定位方式,充分利用了伪距观测值不涉及模糊度、定位模式简单且实时性高的特点,能够更好地适用于灾害应急环境下用户高精度定位的需求。利用载波相位观测值来提高伪距定位的精度,可充分发挥伪距定位模

式简单和载波观测值高精度的优势,使用高精度的载波相位观测值拟合伪距观测值。使用长距离参考站网的观测数据进行了智能终端增强定位算法验证和实验分析,实验结果表明,本文方法能够实现用户实时厘米级、分米级和亚分米级等优于 1 m 的高精度定位。

表 2 智能终端定位结果差值的 RMS/m
Tab.2 RMS of Smart Device Positioning Biases/m

序号	坐标方向	伪距单点定位	伪距单点定位平滑	伪距增强	载波相位平滑伪距增强	载波相位固定解	载波相位浮点解
智能终端 1	N	3.685	0.734	3.732	0.453	0.022	0.042
	E	3.327	1.715	3.058	0.457	0.019	0.012
	U	12.726	3.521	13.249	3.038	0.051	0.128
智能终端 2	N	1.938	0.434	1.965	0.236	0.061	0.043
	E	5.678	1.814	5.797	0.891	0.008	0.042
	U	6.625	2.831	5.754	1.301	0.065	0.132

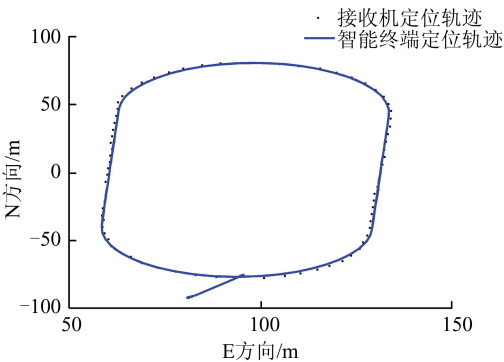


图 20 增强定位轨迹
Fig.20 Trail of Augmented Positioning

参 考 文 献

[1] Gao Xingwei, Chen Ruizhi, Zhao Chunmei. A Network RTK Algorithm and Its Test[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11):1 350-1 353(高星伟,陈锐志,赵春梅. 网络RTK算法研究与实验[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(11):1 350-1 353)

[2] Zhu Huizhong. The Study of GNSS Network RTK Algorithm Between Long Range at Single Epoch-Using Un-difference Error Corrections[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012(祝会忠. 基于非差误差改正数的长距离单历元GNSS网络RTK算法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2012)

[3] Zou Xuan, Ge Maorong, Tang Weiming, et al. URTK: Undifferenced Network RTK Positioning [J]. *GPS Solution*, 2013, 17:283-293

[4] Ge M, Zou X, Dick G, et al. An Alternative Network RTK Approach Based on Undifferenced Obser-

vation Corrections[C]. ION GNSS, Protland, Oregon, 2010

[5] Zhu Huizhong, Liu Jingnan, Tang Weiming, et al. The Algorithm of Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution Between Long-Range Network RTK Base Stations [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3):359-365(祝会忠,刘经南,唐卫明,等. 长距离网络RTK基准站间整周模糊度单历元确定方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(3):359-365)

[6] Yao Yibin, Hu Mingxian, Xu Chaoqian. Positioning Accuracy Analysis of GPS/BDS/GLONASS Network RTK Based on DREAMNET[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(9):1 009-1 018(姚宜斌,胡明贤,许超钤. 基于DREAMNET的GPS/BDS/GLONASS多系统网络RTK定位性能分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(9):1 009-1 018)

[7] Zhu Huizhong, Xu Aigong, Gao Meng, et al. The Algorithm of Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution Between Middle-Range BDS Network RTK Reference Stations [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(1):50-57(祝会忠,徐爱功,高猛,等. BDS网络RTK中距离参考站整周模糊度单历元解算方法[J]. 测绘学报, 2016, 45(1):50-57)

[8] Zhu Huizhong, Li Bo, Xu Aigong. Differential Method of Long-Range Single Epoch Single-Frequency Non-difference BeiDou Network[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(5):14-20(祝会忠,李博,徐爱功. 长距离单历元单频非差北斗网络差分方法[J]. 测绘科学, 2016, 41(5):14-20)

[9] Zhao Shuo, Bei Jinzhong, Xu Yantian. Analysis of

- GNSS Data Quality and Positioning Accuracy of Dual Frequency Smartphone[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(8):1-10(赵硕, 秘金钟, 徐彦田. 双频智能手机GNSS数据质量及定位精度分析[J]. 测绘科学, 2019, 44(8):1-10)
- [10] Zhang Kaishi, Jiao Wenhai, Li Jianwen. Analysis of GNSS Positioning Precision on Android Smart Device [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(10):1 472-1 476(张楷时, 焦文海, 李建文. Android智能终端GNSS定位精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(10):1 472-1 476)
- [11] Zhang Kaishi. Research on Key Technologies for Precise Positioning of Android Smart Terminal[D]. Wuhan: Information Engineering University, 2019(张楷时. 安卓智能终端精密定位关键技术研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2019)
- [12] Shi Xiang. Continuous Smoothing Positioning Algorithm Based on GNSS Observations of Smartphones [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019(史翔. 基于智能手机GNSS观测值的连续平滑定位算法[D]. 武汉:武汉大学, 2019)
- [13] Weng D, Gan X, Chen W, et al. A New DGNSS Positioning Infrastructure for Android Smartphones [J]. *Sensors*, 2020, 20(2):1-15
- [14] Zhang X, Tao X, Zhu F, et al. Quality Assessment of GNSS Observations from an Android N Smartphone and Positioning Performance Analysis Using Time-Differenced Filtering Approach[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3):70-80
- [15] Realini E, Caldera S, Pertusini L, et al. Precise GNSS Positioning Using Smart Devices [J]. *Sensors*, 2017, 17(10):2 434-2 447
- [16] Liu W, Shi X, Zhu F, et al. Quality Analysis of Multi-GNSS Raw Observations and a Velocity-Aided Positioning Approach Based on Smartphones [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(8):2 358-2 377
- [17] Dabove P, Di Pietra V. Towards High Accuracy GNSS Real-Time Positioning with Smartphones[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(1):94-102
- [18] Hatch R. The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements [C]. International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, Physical Sciences Laboratory of New Mexico State University, Las Cruces, NM, USA, 1982
- [19] Zheng Nanshan, Li Zengke. Application of Doppler Smoothing Pseudo Range in GPS/INS Tightly Coupled Navigation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(10):1 158-1 162(郑南山, 李增科. 多普勒平滑伪距在GPS/INS紧耦合导航中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(10):1 158-1 162)
- [20] Teunissen P J. A Canonical Theory for Short GPS Baselines Part II: The Ambiguity Precision and Correlation[J]. *Journal of Geodesy*, 1997, 71:320-336

High-Precision BDS Augmented Positioning Method for Disaster Emergency Environment on Smart Device

ZHU Huizhong¹ LI Jun¹ XU Aigong¹ ZHEN Jie² LEI Xiaoting¹

¹ School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

² Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

Abstract: Objective: The uncertainty of influencing factors of BDS positioning is great in the disaster environment and emergency scene. The applicability and maneuverability of receiver in disaster emergency environment may not meet the needs of positioning. Therefore, the method of augmented positioning between long range stations on smart device was researched to meet the demand high-precision positioning in disaster emergency environment. The augmented positioning algorithm is convenient for high efficiency and easy to realize, and the user can use a very flexible data processing method. **Methods:** The un-difference error corrections between long-range reference stations was used of augmented positioning. The satellite clock error was eliminated and the atmospheric error and satellite orbit error can be weakened by the un-difference error corrections. The augmented positioning of user including pseudo-range, carrier phase and carrier phase smoothing pseudo-range between long range stations were achieved. And the demand of high-precision

sion positioning of long range was meted by corrections of classified errors. The method of carrier phase smoothing pseudo-range by un-difference error corrections was used. The integer ambiguity was estimated by observations with eliminating errors and the pseudo-range was recalculated by the simple smoothing formula. The user station errors were removed or corrected by the reference station smoothing error corrections. The pseudo-range observations do not involve ambiguity with simple positioning mode and high-real-time performance, at the same time the accuracy of pseudo-range positioning can be improved by carrier phase observations. And this method can be better applied to the demand for high-precision positioning in disaster environment. The augmented positioning for specific receiver equipment was also integrated in the smart device. **Results:** Three reference stations between long range together with smart device and receiver in North China were used to test the augmented positioning. The positioning accuracy of dm or cm can be obtained by augmented positioning with pseudo-range and carrier phase smoothing of receiver, the accuracy on cm level obtained with carrier phase. The smart device can get the position on dm level of horizontal with carrier phase smoothing augmented positioning, and the augmented positioning with carrier phase was able to achieve the accuracy on cm level by fixed ambiguity or float ambiguity. The kinematic augmented positioning of smart device can get the positioning accuracy better than 1 meter with the test at Liaoning. **Conclusions:** The smart device can be used as the source of observation and the carrier of data processing for user receiver positioning. The results indicate that the method can achieve high-precision positioning with real-time dynamic centimetre, decimetre and sub-meter levels better than 1 meter.

Key words: disaster emergency environment; smart device; augmented positioning; BDS; carrier phase observations

First author: ZHU Huizhong, PhD, associate professor, specializes in BDS high-precision positioning. E-mail: zhuhuizhong@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China (2016YFC0803102).

引文格式: ZHU Huizhong, LI Jun, XU Aigong, et al. High-Precision BDS Augmented Positioning Method for Disaster Emergency Environment on Smart Device[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(8): 1155-1167. DOI: 10.13203/j.whugis20200123 (祝会忠, 李军, 徐爱功, 等. 灾害应急环境下智能终端高精度北斗增强定位方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(8): 1155-1167. DOI: 10.13203/j.whugis20200123)