第 18 卷 第 2 期 2018 年 1 月
1671—1815(2018)002-0274-05

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18 No. 2 Jan. 2018

引用格式:刁彦华, 尹良旭, 王晓君. 基于概略坐标的高精度差分定位算法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 274—278

Diao Yanhua, Yin Liangxu, Wang Xiaojun. A high precision differential positioning algorithm based on general locations[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 274—278

基于概略坐标的高精度差分定位算法

刁彦华 尹良旭* 王晓君

(河北科技大学信息科学与工程学院,石家庄 050000)

摘 要 GPS 载波相位差分定位是近些年来高精度定位的方向。鉴于载波相位差分求解定位中,随着用户站和基准站之间基线长度的变长,基准站对卫星的单位观测向量和用户站对卫星的单位观测向量会出现很大的方向偏差。这种偏差随着基线长度的变长,定位误差将变大。针对上述问题,在载波相位双差算法的基础上提出了基于概略坐标的定位数学模型并重点推导了概略定位模型过程;以及给出了相应的仿真结果。结果表明基于概略坐标定位的数学模型比传统双差定位精度高,能够达到高精度定位要求。

关键词 载波相位 差分定位 概略坐标 基线

中图法分类号 TN961; **文献标志码** A

近年来,随着人类对全球定位系统(GPS)的深入研究,发现它不仅能够实现一般精度的导航定位,而且能进行高精度的测量定位。

我们知道,GPS 码相位的测量精度在 1 m 左右,而载波相位测量值的精度可达到几毫米。对于高精度定位如勘探要求来说,伪距测量值已经不能胜任,载波相位测量值成了必需[1,2]。由于 GPS 信号自身的特性和应用的需要,促使差分相对定位技术面世,按照观测量类型不同可分为位置差分、伪距差分和载波相位差分[3]。高精度相对定位一般都采用载波相位差分技术,定位精度能够达到厘米级。本文主要在载波相位双差定位算法上,提出了基于概略坐标差分定位模型实现高精度定位要求。

1 载波相位双差相对定位原理

载波相位相对定位是基于载波相位观测量的定位技术,能够实时、准确地解算出用户接收机在坐标系中的三维定位结果,其精度可达到厘米级[4]。载波相位双差相对定位系统模型由两台设备构成,其中一台设备作为基准站另外一台设备作为用户站,基准站观测到的卫星数据实时传送给用户站,用户站实时接收数据并构建载波相位双差关系来解算出用户站位置信息。图 1 描述了载波相位双差大体示意图,根据图示可知双差测量值涉及基准站和用户站在同一时刻对两颗卫星 (i,j) 的观测量,基准站和用户站对卫星 i 和卫星 j 的单差进行差分[5],即为双差。通过双差可消除接收机钟差、卫星钟差、大气误差等公共误差的影响,进而实时数据处理来高精度确定用户站位置。

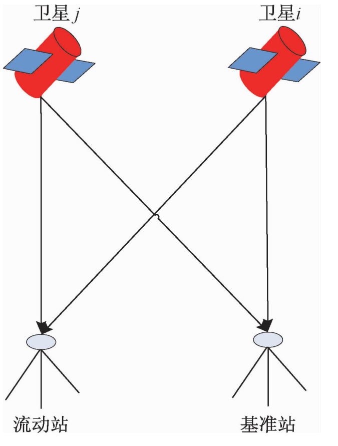

图 1 载波相位双差示意图

Fig. 1 Carrier phase double differential schematic

载波相位测量值定义为接收机复制载波信号的相位和接收机收到卫星载波信号的相位之间的差异[6]。基准站和用户站同时跟踪编号为 i 的同一颗卫星,测量的载波相位为 $\varphi_r^{(i)}$ 和 $\varphi_u^{(i)}$,则有

$$\varphi_r^{(i)} = \lambda^{-1}(r_r^{(i)} - I_r^{(i)} + T_r^{(i)}) + f(\delta t_r - \delta t^{(i)}) + N_r^{(i)} + \varepsilon_{\varphi,r}^{(i)} \tag{1}$$

2017 年 6 月 21 日收到 河北科技大学校立基金项目(2016PT79)资助
第一作者简介:刁彦华(1966—),副教授,硕士研究生导师。研究方向:卫星通信和卫星导航。

*通信作者简介:尹良旭(1991—),硕士研究生。研究方向:卫星通信和卫星导航定位。E-mail:260330936@qq.com。

$$\varphi_{u}^{(i)} = \lambda^{-1}(r_{u}^{(i)} - I_{u}^{(i)} + T_{u}^{(i)}) + f(\delta t_{u} - \delta t^{(i)}) + N_{u}^{(i)} + \varepsilon_{\varphi,u}^{(i)} \tag{2}$$

式中,$r_{*}^{(i)}$ 代表接收机和卫星 i 之间的几何距离(注:下标 * 指代接收机);$I_{*}^{(i)}$ 、$T_{*}^{(i)}$ 为接收机相对于卫星 i 的电离层、对流层延时;δt_{*} 为接收机钟差;$\delta t^{(i)}$ 为卫星 i 钟差;$N_{*}^{(i)}$ 为接收机相对于卫星 i 的整周模糊度;$\varepsilon_{\varphi,*}^{(i)}$ 为接收机载波相位测量噪声[7]。用户站和基准站之间对卫星 i 的单差载波相位观测量为 $\varphi_{ur}^{(i)}$,定义如下:

$$\varphi_{ur}^{(i)} = \varphi_{u}^{(i)} - \varphi_{r}^{(i)} \tag{3}$$

把式(1)和式(2)代入式(3),得

$$\varphi_{ur}^{(i)} = \lambda^{-1}(r_{ur}^{(i)} - I_{ur}^{(i)} + T_{ur}^{(i)}) + f\delta t_{ur} + N_{ur}^{(i)} + \varepsilon_{\varphi,ur}^{(i)} \tag{4}$$

在式(4)中,双下标参量代表前者减去后者。若用户与基准站相距不远时,则载波相位单差中电离层延时差值 $I_{ur}^{(i)}$ 几乎等于零,如若两个接收机处于同一高度时,对流层延时差值 $T_{ur}^{(i)}$ 也会接近于零,可忽略不计[8]。那么,对于短基线载波相位单差来说,式(4)可进一步简化为

$$\varphi_{ur}^{(i)} = \lambda^{-1} r_{ur}^{(i)} + f\delta t_{ur} + N_{ur}^{(i)} + \varepsilon_{\varphi,ur}^{(i)} \tag{5}$$

考虑到差分定位的目标是求解出用户站和基准站之间的基线向量 $\boldsymbol{b}_{ur}$。基准站和用户站测量卫星信号的几何向量分布如图 2 所示,基准站指向用户站位置的向量称之为基线向量 $\boldsymbol{b}_{ur}$,基准站指向卫星的单位向量称之为单位观测向量 $\boldsymbol{1}_{r}^{(i)}$。由于卫星到基准站和用户站的距离远大于基准站和用户站之间的距离,那么用户站到卫星 i 的单位观测向量和基准站到卫星 i 的单位观测向量在方向上近似相等。用户站与基准站到卫星 i 的几何向量距离差值 $r_{ur}^{(i)}$ 与基线向量 $\boldsymbol{b}_{ur}$ 以及基准站到卫星 i 观测方向的单位向量 $\boldsymbol{1}_{r}^{(i)}$ 存在如下关系[8]:

$$r_{ur}^{(i)} = -\boldsymbol{b}_{ur} \cdot \boldsymbol{1}_{r}^{(i)} \tag{6}$$

式(6)中,$\boldsymbol{b}_{ur}$ 和 $\boldsymbol{1}_{r}^{(i)}$ 之间的运算符号 · 代表两个向量之间的点乘,它的几何意义是其中一个向量在另一个向量上的投影。载波相位双差是单差的单差,即单差之间再进行一次差分[9]。根据式(5)可以得到用户站和基准站跟踪卫星 j 的单差载波相位测量值为

$$\varphi_{ur}^{(j)} = \lambda^{-1} r_{ur}^{(j)} + f\delta t_{ur} + N_{ur}^{(j)} + \varepsilon_{\varphi,ur}^{(j)} \tag{7}$$

在同一时刻测得载波相位单差 $\varphi_{ur}^{(i)}$ 和 $\varphi_{ur}^{(j)}$,由它们组成的双差载波相位 $\varphi_{ur}^{(ij)}$ 定义为

$$\varphi_{ur}^{(ij)} = \varphi_{ur}^{(i)} - \varphi_{ur}^{(j)} \tag{8}$$

把式(5)和式(7)代入式(8),得到双差载波相位观测量为

$$\varphi_{ur}^{(ij)} = \lambda^{-1} r_{ur}^{(ij)} + N_{ur}^{(ij)} + \varepsilon_{\varphi,ur}^{(ij)} \tag{9}$$

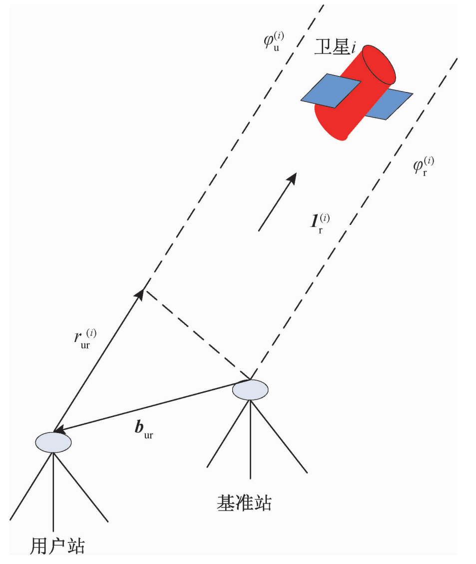

图 2　基准线和用户站测量卫星信号的几何向量分布示意图

Fig. 2　The baseline and user stations measure the geometry vector distribution of the satellite signals

根据基准站和用户站与卫星的几何关系,根据式(9)推导出式(10)。

$$\varphi_{ur}^{(ij)} = -\lambda^{-1}(\boldsymbol{1}_{r}^{(i)} - \boldsymbol{1}_{r}^{(j)}) \cdot \boldsymbol{b}_{ur} + N_{ur}^{(ij)} + \varepsilon_{\varphi,ur}^{(ij)} \tag{10}$$

在式(9)中引入的双差测量噪声 $\varepsilon_{\varphi,ur}^{(i,j)}$ 是单差测量噪声 $\varepsilon_{\varphi,ur}^{i}$ 的 $\sqrt{2}$ 倍,误差一般在 1 cm 左右。在式(10)中,三维向量基线向量 $\boldsymbol{b}_{ur}$ 是待求结果,根据基准站位置信息和得到的基线向量结果可求解出用户站的位置信息。显然,根据一组载波相位双差公式求解不出三维基线向量,方程组的个数要大于 3。在这里选取对编号为 1、2、3、4 的卫星进行载波相位测量,并且以对 1 号卫星的载波相位测量值为基准,可以产生 3 组相互独立的双差值,并把 3 组双差观测方程式集合在一起组成了如下的矩阵方程式:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ur}^{(21)} \\ \varphi_{ur}^{(31)} \\ \varphi_{ur}^{(41)} \end{bmatrix} = \lambda^{-1} \begin{bmatrix} -(\boldsymbol{1}_{r}^{(2)} - \boldsymbol{1}_{r}^{(1)}) \\ -(\boldsymbol{1}_{r}^{(3)} - \boldsymbol{1}_{r}^{(1)}) \\ -(\boldsymbol{1}_{r}^{(4)} - \boldsymbol{1}_{r}^{(1)}) \end{bmatrix} \boldsymbol{b}_{ur} + \begin{bmatrix} N_{ur}^{(21)} \\ N_{ur}^{(31)} \\ N_{ur}^{(41)} \end{bmatrix} \tag{11}$$

理论上,在短基线情况下载波相位双差相对定位中,卫星钟差、接收机钟差、电离层误差和对流层误差基本上可以全部消除,采用双差得到的定位结果精度很高。图 3 仿真了式(11)中载波相位双差相对定位法下测量不同基线各个分量下的误差。结果表明,基线长度较短时,测量得到的定位结果跟用户站的实际结果基本相符,但是伴随着基线长度的增加,测量结果跟实际结果误差不

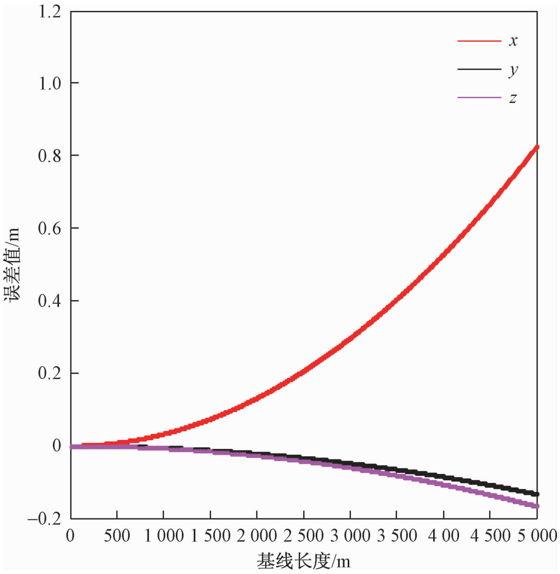

图 3 双差载波相位差分下不同基线的误差

Fig. 3 Errors of different baselines under difference of double difference carrier

断变大。

2 双差相对定位中的改进措施

在对载波相位双差相对定位结果误差变大分析中，基准站到卫星的单位观测向量是误差变大的主要原因。卫星轨道平均高度为 20 200 km，远远大于用户站和基准站之间的距离，基于此，基准站到卫星和用户站到卫星的单位观测向量在方向相同、大小近似相等[10,11]。实际上，两者在方向上并不是绝对的相同，而有一定的角度偏差，并且伴随着基线长度的增加，这种角度偏差呈变大趋势。但在载波相位双差相对定位中一直用基准站到卫星的单位观测向量，结果显然定位误差不断变大。基于此因素，可借助概略坐标来实现双差定位。概略坐标是对用户站的大概坐标的估计，可通过安装在用户站的定位模块获取。一般情况下，导航定位模块得到的定位结果误差在 10 m 内。概略坐标和用户站距离很近，那么相比基准站到卫星的单位观测向量，概略坐标到卫星的单位观测向量更加接近用户站到卫星的单位观测向量。基于此种关系，可通过概略坐标以及概略坐标和用户站的位置关系获取载波相位差分关系来解算概略坐标和用户站之间的基线向量，从而求解用户站的坐标。图 4 描述了基于概略坐标的定位模型，在图中描述出了概略坐标与用户站之间的基线向量以及概略坐标对卫星 i 的单位观测向量与基准站对卫星 i 单位观测向量之间的向量差。设用户站、概略坐标观测卫星 i 的的载波相位分别为是 $\varphi_{u}^{(i)}$，$\varphi_{g}^{(i)}$（概略相位假设），根据设定的载波相位可以得到单差方程如下式：

$$\varphi_{ug}^{(i)} = \varphi_{u}^{(i)} - \varphi_{g}^{(i)} = \lambda^{-1}(r_{ug}^{(i)} - I_{ug}^{(i)} + T_{ug}^{(i)}) + f\delta t_{ug} - N_{ug}^{(i)} + \varepsilon_{\varphi,ug}^{(i)} \tag{12}$$

对式(12)两边同时减去基准站测量卫星 i 的载波相位 $\varphi_{r}^{(i)}$，并且等号右边对基准站相对于卫星 i 的整周模糊度 $N_{r}^{(i)}$ 做处理，等价变化得到下式：

$$\varphi_{u}^{(i)} - \varphi_{r}^{(i)} = \lambda^{-1}r_{ug}^{(i)} - N_{u}^{(i)} + N_{g}^{(i)} + N_{r}^{(i)} - N_{r}^{(i)} - \varphi_{r}^{(i)} + \varphi_{g}^{(i)} + f\delta t_{ug} + \lambda^{-1}(T_{ug}^{(i)} - I_{ug}^{(i)}) + \varepsilon_{\varphi,ug}^{(i)} \tag{13}$$

整理式(13)得

$$\begin{aligned}\varphi_{ur}^{(i)} &= \lambda^{-1}r_{ug}^{(i)} - N_{u}^{(i)} + N_{g}^{(i)} + N_{r}^{(i)} - N_{r}^{(i)} - \varphi_{r}^{(i)} + \varphi_{g}^{(i)} + f\delta t_{ug} + \lambda^{-1}(T_{ug}^{(i)} - I_{ug}^{(i)}) + \varepsilon_{\varphi,ug}^{(i)} = \lambda^{-1}r_{ug}^{(i)} - \\ &\quad (N_{u}^{(i)} - N_{r}^{(i)}) + [N_{g}^{(i)} + \varphi_{g}^{(i)} - (N_{r}^{(i)} + \varphi_{r}^{(i)})] + f\delta t_{ug} + \lambda^{-1}(T_{ug}^{(i)} - I_{ug}^{(i)}) + \varepsilon_{\varphi,ug}^{(i)} = \lambda^{-1}r_{ug}^{(i)} - \\ &\quad N_{ur}^{(i)} + \frac{1}{\lambda}\{\lambda[(N_{g}^{(i)} + \varphi_{g}^{(i)}) - (N_{r}^{(i)} + \varphi_{r}^{(i)})]\} + f\delta t_{ug} + \lambda^{-1}(T_{ug}^{(i)} - I_{ug}^{(i)}) + \varepsilon_{\varphi,ug}^{(i)} = \lambda^{-1}r_{ug}^{(i)} - \\ &\quad N_{ur}^{(i)} + \frac{1}{\lambda}(r_{g}^{(i)} - r_{r}^{(i)}) + f\delta t_{ug} + \lambda^{-1}(T_{ug}^{(i)} - I_{ug}^{(i)}) + \varepsilon_{\varphi,ug}^{(i)} = \lambda^{-1}r_{ug}^{(i)} - N_{ur}^{(i)} + \frac{1}{\lambda}r_{gr}^{(i)} + \\ &\quad f\delta t_{ug} + \lambda^{-1}(T_{ug}^{(i)} - I_{ug}^{(i)}) + \varepsilon_{\varphi,ug}^{(i)}\end{aligned} \tag{14}$$

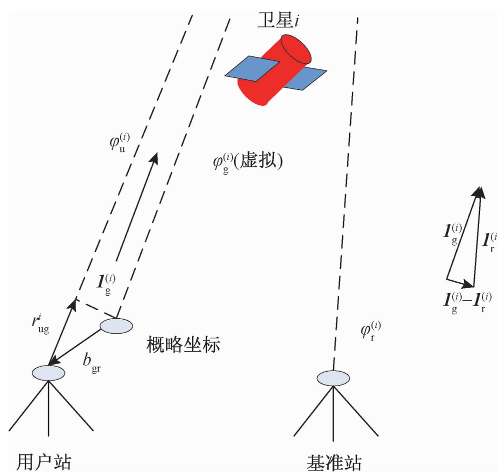

图 4 基于概略坐标模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram based on general locations model

式(14)是对载波相位单差的一种变形形式，它是把用户站与基准站之间的基线向量 $\boldsymbol{b}_{ur}$ 转换为用户站与概略坐标之间的基线向量 $\boldsymbol{b}_{gr}$。在用户站和基准站在短基线的情况下，测量编号为 1、2、3、4 的载波相位单差值，并以 1 号卫星为基准，求取双差在可消除钟差，电流层、对流层延迟情况下，把得到的 3 组双差载波相位值组成矩阵表达式如下：

$$\begin{bmatrix} \varphi_{\mathrm{ur}}^{(21)} \\ \varphi_{\mathrm{ur}}^{(31)} \\ \varphi_{\mathrm{ur}}^{(41)} \end{bmatrix} = \lambda^{-1} \begin{bmatrix} -(\boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}^{(2)} - \boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}^{(1)}) \\ -(\boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}^{(3)} - \boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}^{(1)}) \\ -(\boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}^{(4)} - \boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}^{(1)}) \end{bmatrix} \boldsymbol{b}_{\mathrm{rg}} - \begin{bmatrix} N_{\mathrm{ur}}^{(2)} - N_{\mathrm{ur}}^{(1)} \\ N_{\mathrm{ur}}^{(3)} - N_{\mathrm{ur}}^{(1)} \\ N_{\mathrm{ur}}^{(4)} - N_{\mathrm{ur}}^{(1)} \end{bmatrix} + \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} r_{\mathrm{gr}}^{(2)} - r_{\mathrm{gr}}^{(1)} \\ r_{\mathrm{gr}}^{(3)} - r_{\mathrm{gr}}^{(1)} \\ r_{\mathrm{gr}}^{(4)} - r_{\mathrm{gr}}^{(1)} \end{bmatrix} \tag{15}$$

基于概略坐标下的双差定位矩阵表达式(15)和式(11)对比,引入了概略坐标对卫星的单位观测矢量 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{g}}^{(i)}$ 、概略坐标和用户站之间的基线向量 $\boldsymbol{b}_{\mathrm{rg}}$ 以及用户站与概略坐标到卫星 i 的几何向量距离差值 $r_{\mathrm{gr}}^{(i)}$ 。在获取概略坐标位置前提以及概略坐标和用户站基线向量未知的情况下,式(15)的仿真结果如图 5 所示,仿真结果显示伴随着基线长度的变长,定位误差没有出现不断加大的情况。图 5是在消除了所有公共误差的影响前提下的仿真结果。现实中,短基线情况下用户站跟基准站的相关性比较好,相关误差可很好的去除,但是伴随着基线长度的加大,两者相关性减弱,定位误差影响将会变大。

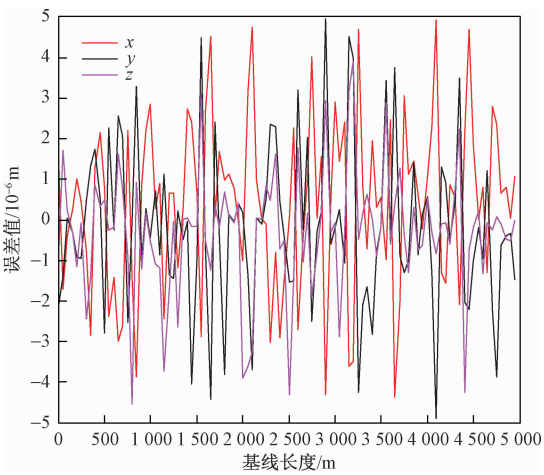

图 5 基于概略坐标载波相位双差误差结果

Fig. 5 Error result based on doubled difference phase of general locations

3 结论

在深入了解载波相位测量值以及相位差分定位的基础上,提出并推导了一种借助概略坐标位置信息进行载波相位双差改进定位算法。本文,首先介绍了载波相位单差、双差概念以及载波相位双差与用户站和基准站之间基线向量的关系。然后仿真了不同基线长度下的定位误差。针对用户站和基准站基线长度的变长,定位误差结果变大,本文最后提出了概略坐标并将概略坐标信息融入到了载波相位双差关系中,用户站定位信息转换为与概略坐标间的基线向量关系。据上述思路进行了仿真验证,结果表明基于概略坐标的差分相位定位能够准确的确定用户站三维位置信息。

参 考 文 献

1 孙福余, 张 鹏, 徐亚明, 等. 载波相位测量原理及在 GPS 软件接收机上的实现. 测绘通报, 2014; 14(4): 70—73
Sun Fuyu, Zhang Peng, Xu Yaming, *et al*. Principle of carrier phase measurements and implementation upon GPS software receiver platform. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014; 14(4): 70—73

2 杨 俊, 武奇生. GPS 基本原理及其 Matlab 仿真. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006
Yang Jun, Wu Qisheng. GPS principles and its matlab simulation. Xi'an: Xidian University Press, 2006

3 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. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015
Zhang Jiahui. Research on GPS carrier phase real time kinematic precise positioning system. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015

4 翟建勇, 吕 超. 载波相位差分相对定位解算及性能提升研究. 全球定位系统, 2016; 41(1): 1—2
Zhai Jianyong, Lü Chao. Research on carrier phase difference relative positioning and performance improving. GNSS World of China, 2016; 41(1): 1—2

5 周轶红. 基于差分 GPS 的高精度在线定位系统研究. 西安: 西安电子科技大学, 2014
Zhou Yihong. Research on DGPS based high-precision online positioning system. Xi'an: Xidian Uuiversity, 2014

6 陈石磊. GPS 载波相位定位技术的研究. 西安: 西安电子科技大学, 2008
Chen Shilei. Research on technology of GPS carrier phase positioning. Xi'an: Xidian University, 2008

7 张业旺, 李冶安, 卢艳娥, 等. GPS 差分基准站高精度基准坐标测定方法研究. 科学技术与工程, 2012; 12(25): 6346—6361
Zhang Yewang, Li Yean, Lu Yane, *et al*. Research on the method of obtaining high precision reference coordinate of the GPS differential reference station. Science Technology and Engineering, 2012; 12(25): 6346—6361

8 谢 钢. GPS 原理与接收机设计. 北京: 电子工业出版社, 2009
Xie Gang. Principles of GPS and receiver design. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009

9 任光辉. 基线约束的 GPS 单历元定向技术研究与实现. 上海: 上海交通大学, 2013
Ren Guanghui. Dissertation submitted to shanghai jiao tong university for the degree of master. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013

10 高成发, 胡伍生. 卫星导航定位原理与应用. 北京: 人民交通出版社, 2011
Gao Chengfa, Hu Wusheng. The principle and application of satellite navigation and positioning. Beijing: China Communications Press, 2011

11 周 婧, 张 怡, 张 航. 全球定位系统的差分伪距定位的算法研究. 科学技术与工程, 2008; 8(4): 1034—1037
Zhou Jing, Zhang Yi, Zhang Hang. Method research of impedance matching based on analysis of signal integrity. Science Technology and Engineering, 2018; 8(4): 1034—1037

A High Precision Differential Positioning Algorithm Based on General Locations

DIAO Yan-hua, YIN Liang-xu*, WANG Xiao-jun
(School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050000, China)

[**Abstract**] GPS carrier phase differential positioning is the direction of high precision positioning field in recent years. In the carrier phase difference solution positioning, with the increase in the length of the baseline between the user station and the base station, the unit observation vector of the satellite and the base station will have a large deviation from the unit observation vector of the satellite and the user station. As the baseline length becomes longer, the positioning error caused by the deviation becomes longer. In order to solve the above problems, a general locations' mathematical model based on carrier phase difference algorithm is presented and the process of general positioning model is deduced, corresponding simulation results are given. The results show that the mathematical model based on the general positioning is higher than the traditional double differential positioning, and it can meet the requirement of high precision positioning.

[**Key words**] carrier phase differential positioning general locations baseline