

遮挡环境下原子钟和气压测高仪辅助北斗定位方法研究

李博^{*①②} 徐超^{①②} 李孝辉^① 张慧君^① 王文利^①

^①(中国科学院国家授时中心 西安 710600)

^②(中国科学院大学 北京 100039)

摘要: 在城市峡谷等遮挡环境下,接收机无法连续进行定位解算;并且高程定位精度不能满足用户在立交桥或者盘山公路等环境下的定位需求。在接收机内使用原子钟,可以利用原子钟的高稳定性,对钟差进行高精度的预测。并通过与气压测高仪共同辅助北斗系统定位,可以有效提高接收机的定位精度和连续性;该文首先理论分析了原子钟和气压测高仪辅助定位算法;然后,提出一种气压测高仪初始化校正方法,并通过对钟差噪声类型的分析确定了钟差预测方法;最后,模拟遮挡环境,进行原子钟和气压测高仪辅助北斗卫星导航系统定位试验,并分析了定位结果。结果表明:仅跟踪两颗可见卫星,便可以进行定位解算,并且垂直方向上的定位误差从8.2 m (RMSE)下降到了5.2 m,定位结果的波动从4.6 m下降到了0.8 m。

关键词: 北斗卫星导航系统; 遮挡环境; 双星定位; 原子钟; 气压测高仪

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)09-2212-07

DOI: 10.11999/JEIT171181

BeiDou Navigation Satellite System in Challenge Environment Using an Atomic Clock and Barometric Altimeter

LI Bo^{①②} XU Chao^{①②} LI Xiaohui^① ZHANG Huijun^① WANG Wenli^①

^①(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The vertical positioning accuracy of BeiDou satellite navigation System (BDS) and the continuity of receiver in the challenge environment can not satisfy the user demand. If atomic clocks are used in the receiver, the high stability of the atomic clock can be used for long time and high precision prediction of receiver clock bias. The positioning accuracy and continuity are improved by using atomic clock and barometric altimeter. This article first analyzes the atomic clocks and barometric altimeter aided BDS positioning algorithm; Then, correction method is proposed for initialization of barometric altimeter, and analysis on the difference of noise type clock is used to determine the clock bias prediction method; Finally, positioning experiment of the atomic clock and barometric altimeter aided BDS in simulation challenge environment is carried out, and the positioning result is analyzed. The results show that BDS can positioning solution to track two visible satellites, and vertical positioning accuracy is significantly improved. The positioning error in the vertical direction is decreased from 8.2 m (RMSE) to 5.2 m, and the fluctuation of the positioning results decreased from 4.6 m to 0.8 m.

Key words: BeiDou navigation satellite System (BDS); Challenge environment; Double satellite positioning; Atomic clock; Barometric altimeter

1 引言

卫星导航的突出特点是3维位置和1维时间的统

一解算。然而,在高楼密集的城市街道、森林和山谷等遮挡物较多的环境下,可见卫星数目少于4颗时导航系统无法进行定位解算,严重地影响了定位的连续性。随着导航精度和鲁棒性要求的不断增加,垂直位置的重要性也在日益增加^[1]。

传统的气压测高校正方法或是对气压进行建模,或是通过气象参考站,这样不仅需要大量的运算,还需要额外的通信设备用于接收参考站的气压

收稿日期: 2017-12-18; 改回日期: 2018-05-18; 网络出版: 2018-07-12

*通信作者: 李博 lbeer1831@163.com

基金项目: 国防科技创新基金(CXJJ-17-M110)

Foundation Item: Defense Science and Technology Innovation

Fund (CXJJ-17-M110)

数据，造成成本增加，并且精度不佳。随着原子钟技术的提升，新一代的原子钟的价格、尺寸和功率消耗已经大大减小，在接收机中使用原子钟已成为可能^[2-4]。以往钟差辅助定位是基于使用普通晶振的接收机，钟差的预测相对时间短、误差大，定位精度往往较低^[5,6]。

本文将原子钟和气压测高仪结合起来共同辅助北斗卫星导航系统。通过原子钟辅助可以长时间、高精度地进行钟差的预测^[7,8]；气压测高仪经过校准后，可为系统提供高精度的高程信息。有效地提高了连续性和定位精度，仅在两颗可见卫星的遮挡环境下可进行位置解算，垂直方向的定位精度优于单独使用北斗系统时的定位精度。并提出了一种较文献^[9]更简洁的方法解决了由于大地水准面波动引起的高程测量误差较大的问题，减少了将海平面作为气压测高的参考点时引起的较大误差和复杂运算，以减小垂直方向定位结果的波动幅度。最后分析了辅助定位算法，进行了共同辅助北斗导航系统定位试验。

2 气压测高仪测量高度

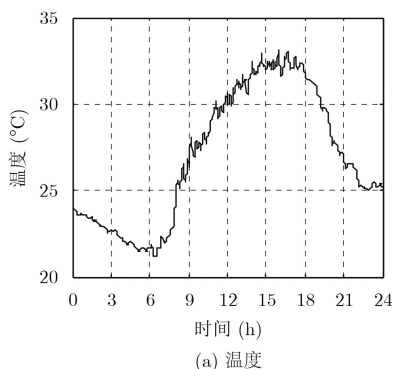
2.1 气压测高原理

根据气压随高度升高而递减的变化规律^[10]。若已知高度为 H_0 的参考点气压 P_0 和温度 T_0 ，使用气压测高仪测出测量点的气压 P 和温度 T ，可以求出观测点的高度 H ：

$$H = \frac{R_d}{g} \left(\frac{T_0 + T}{2} \right) \ln \frac{P_0}{P} + H_0 \quad (1)$$

式中， $R_d=287.05 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 是干空气的气体常数， $g=9.80665 \text{ m}/\text{s}^2$ 为重力加速度。

气压测高仪测量的高度是相对于参考位置的高度，通常采用海平面作为参考，在标准大气条件下，海平面处的静压 $P_0=101.325 \text{ kPa}$ ，温度 $T_0=15^\circ\text{C}$ ，高度 $H_0=0 \text{ m}$ 。实际上，各个地方的大气压力、温度和温度递减率均不是常数，并且随时间而变化。



因此在高度的测量过程中会产生误差，需要对气压测高仪进行初始化校正。

2.2 气压测高仪初始化校正

2.2.1 气压和温度变化规律 为了分析气压和温度的变化规律，采集了2015年5月20日到2017年6月20日两年内西安地区的气压和温度数据，如图1所示。从图1可以看出，长时间内气压和温度变化幅度较大，一天内气压的变化大约为1 kPa左右，温度变化大约为 15°C 左右。但是，通过观察发现气压在短时间内变化缓慢。以2017年6月18日为例(图2)，一个小时内气压和温度的最大变化为0.1 kPa和 3.9°C 。

表1中列出了两年内，气压、温度在不同时间段内变化的统计结果。通过分析可知：虽然气压和温度在长时间内波动较大，但是在短时间内相对稳定。例如，15 min内气压和温度仅变化了0.017 kPa和 0.44°C (RMS)。随着时间的增加，变化量将会不断增大。

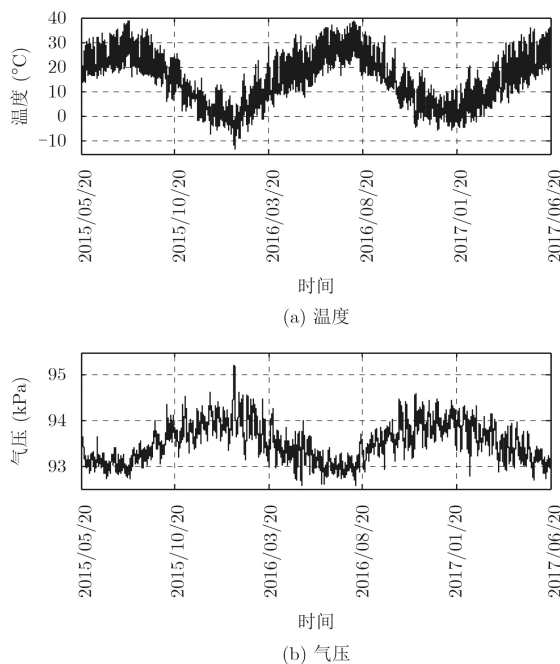


图1 两年内气压和温度的变化

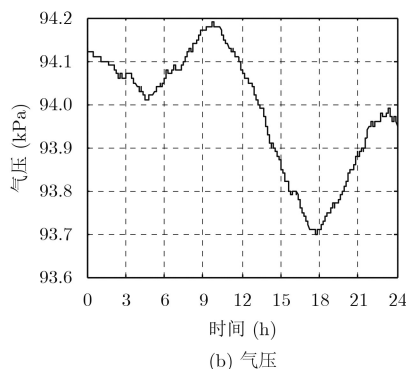


图2 2017年6月18日气压和温度的变化

表1 不同时长内气压、温度最大变化量的均方根误差

时间(min)	气压(kPa)	温度(°C)
15	0.017	0.44
30	0.030	0.69
45	0.043	0.92
60	0.055	1.12

2.2.2 温度和气压分别对高度测量的影响 随着海拔的升高, 气压值呈指数减少, 气压测高仪的高程测量分辨率在不同海拔高度下并不相同。从海拔0 m的海平面到海拔4000 m的青藏高原, 气压发生了40 kPa的变化, 气压测高仪的测量分辨率从0.7 m到1.4 m不等。表2中列出了不同温度和气压条件下, 温度和气压的单位变化对高度测量的影响。

表2 在不同温度和不同气压条件下, 气压每变化0.01 kPa对高度的影响(m)

气压(kPa)	温度(°C)				
	-40	-20	0	20	40
100	0.68	0.74	0.80	0.86	0.92
90	0.76	0.82	0.89	0.95	1.02
80	0.85	0.93	1.00	1.07	1.15
60	1.14	1.24	1.33	1.43	1.53

例如, 在近海平面处, 气压在100 kPa附近、温度为20°C时, 气压每变化0.01 kPa, 气压测高仪测量的高度变化0.86 m。在海拔4000 m处气压大约为60 kPa, 高度将变化1.3 m左右。在相同温度下, 随着海拔的升高气压随之降低, 气压变化对高度的测量产生更大的影响。

从表2中可以看出温度每变化20°C对高度影响仅为0.06 m, 温度每变化1°C仅对高度产生0.003 m。温度变化对高度的测量影响较小。若观测点的气压 P 和参考点的气压 P_0 值接近, 在式(1)中也可用观测点的温度 T 代参考点的温度 T_0 。

2.2.3 气压测高仪初始化校正方法 气压测高的难点在于初始化的校正。通过前文对气压和温度的变化规律分析, 可以发现: 虽然气压在长期内的波动较大, 但是短时间(1 h)内相对平稳。根据气压和温度在短时间变化缓慢的规律, 本文提出了一种新的校正方法。

在卫星导航系统定位精度较高时($PDOP < 6$), 对气压测高仪进行初始化校正。使用卫星导航系统高度作为气压测高仪参考高度 H_0 , 使用此时气压测高仪测量的温度和气压作为参考温度 T_0 和气压 P_0 , 在后续测量中使用 H_0 , T_0 和 P_0 作为参考。气压测高仪校正后, 通过实时测量气压 P 和温度 T , 使用式

(1)计算得到实时的海拔高度 H 。

最大可接受DOP值的门限取决于所需的精度水平。对本文来说, 系统的可用性选择规定为 $PDOP < 6$ 。这个值通常在卫星导航系统的性能标准中作为服务可用性门限来使用^[11]。

虽然卫星导航系统垂直方向定位精度较差, 通过原子钟辅助使垂直精度得到了一定提高, 从而可以为气压测高仪的修正提供准确的参考。此方法不需要气象参考站对高度进行修正, 不需要对气压进行建模, 避免了复杂运算。由于测量的是相对于参考点的高度, 测量位置与参考点位置距离也较近, 也避免了大地水准面与椭球面不一致引起的高程误差。

为了验证新的校正方法, 利用2015~2017年气压测高仪采集的数据, 分析了气压测高仪1 h内由参考点气压和温度变化引起的高度测量误差, 统计结果如表3中所示。15 min时的高度测量误差仅为1.54 m(RMS), 随着时间的增加, 高度的测量误差也将会增大, 在60 min时增加到了4.97 m。可以根据不同的精度需求, 选择不同的测量时长。

表3 不同时长内, 气压测高仪测量高度的误差(RMS)

时长(min)	15	30	45	60
高度(m)	1.54	2.73	3.97	4.97

3 原子钟辅助北斗卫星导航系统

许多接收机使用普通的石英晶振作为时间基准。接收机时钟与卫星导航系统时间存在着钟差, 定位解算时把钟差作为一个未知量解出。如果接收机使用原子钟作为时钟参考, 原子钟具有较好的长期稳定性, 接收机可以根据钟差的历史值高精度地估计当前的钟差, 不再去解算钟差, 变4维解算为3维解算, 从而可以提高系统的可用度。伪距的测量精度将会得到提高, 从而定位精度也随之提高, 尤其是垂直方向上的定位精度。

3.1 原子钟对高程精度因子(VDOP)的提高

接收机使用原子钟作为时钟参考, 接收机时钟与系统时间的钟差可以较高精度地进行估计, 将其作为一个测量值辅助系统进行定位解算。因此, 几何矩阵可变为

$$H = \begin{bmatrix} \frac{x_1 - \hat{x}_u}{\hat{r}_1} & \frac{y_1 - \hat{y}_u}{\hat{r}_1} & \frac{z_1 - \hat{z}_u}{\hat{r}_1} \\ \frac{x_2 - \hat{x}_u}{\hat{r}_2} & \frac{y_2 - \hat{y}_u}{\hat{r}_2} & \frac{z_2 - \hat{z}_u}{\hat{r}_2} \\ \frac{x_3 - \hat{x}_u}{\hat{r}_3} & \frac{y_3 - \hat{y}_u}{\hat{r}_3} & \frac{z_3 - \hat{z}_u}{\hat{r}_3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

在原子钟辅助后, 只需要解算3维位置即可。

位置误差的协方差矩阵可变为

$$\text{cov}(\mathbf{d}\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \sigma_{x_u}^2 & \sigma_{x_u y_u}^2 & \sigma_{x_u z_u}^2 \\ \sigma_{x_u y_u}^2 & \sigma_{y_u}^2 & \sigma_{y_u z_u}^2 \\ \sigma_{x_u z_u}^2 & \sigma_{y_u z_u}^2 & \sigma_{z_u}^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

设 $D = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}$ ，则

$$\text{cov}(\mathbf{d}\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{bmatrix} \sigma_u^2 \quad (4)$$

式中， σ_u 是伪距误差因子； σ_{x_u} 、 σ_{y_u} 、 σ_{z_u} 是位置误差的方差。因此，VDOP可表示为

$$\text{VDOP} = \sigma_{z_u} / \sigma_u = \sqrt{D_{zz}} \quad (5)$$

原子钟辅助后的协方差矩阵不依赖于时钟状态，此时VDOP将会减小。垂直方向定位精度与时钟状态高度相关，也可以这样形象地解释：时钟偏差与沿垂直方向上移动天线对伪距测量值的影响非常相似^[12]。当沿垂直方向上移动天线，可以看作从每个伪距的钟差项中减少或增加相似的量，尤其对于高仰角的卫星。

3.2 接收机钟差预测

表征频率源信号频率稳定度有很多种方法。Allan方差不能分辨调相白噪声和调相闪烁噪声^[13]。因此，在进行方差估计时使用巴恩斯第1偏函数 $B_1(N, r, \mu)$ 对一定取样时间 τ 所对应的主导噪声类型进行估计^[14]。 B_1 偏函数定义为 N 次取样标准方差和双取样Allan方差的比率^[15]，如式(6)所示。

$$B_1(N, r, \mu) = \frac{\sigma^2(N, T, \tau)}{\sigma^2(2, T, \tau)} \quad (6)$$

式中， $r = T/\tau$ ， T 为取样周期， τ 表示取样时间。

通过对原子钟辅助后接收机解算出的钟差进行分析， $B_1 = 1.39$ ，钟差符合调频白噪声特性。根据不同的时钟噪声类型特性，有不同的钟差估计方法^[16]。例如：对于调相白噪声，最佳的估计方法是钟差的简单平均；而对于调频白噪声，最佳估计是使用最后一个钟差值作为后续一段时间的钟差(也被称为端点法)^[16]。

本文采用端点法作为钟差估计方法。在PDOP>6时，使用PDOP<6时的最后一个钟差数据，作为当前的钟差。使用UniNAVMEU_C_001型接收机接收北斗B3频点的导航信号，频率源锁定在外部铯原子钟上，采集了2016年11月09~18日的的数据。

为了验证端点法的效果，预测60 min的误差如图3所示。从10天统计结果可知，85.6%的预测误差在10 ns以内，99%的预测误差在20 ns以内，均方

根误差为6.9 ns。分别预测1~60 min接收机钟差，其均方根误差变化曲线如图4所示。随着时间的增加，钟差预测的误差也将会增加。在实际应用中可以根据不同的精度要求，选择不同的预测时间。

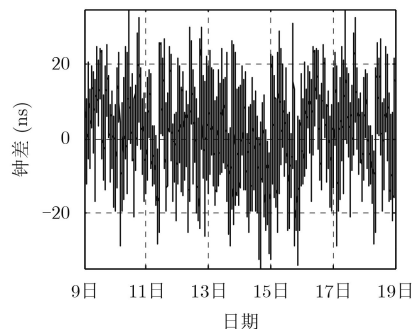


图3 使用端点法，预测60 min后钟差的误差

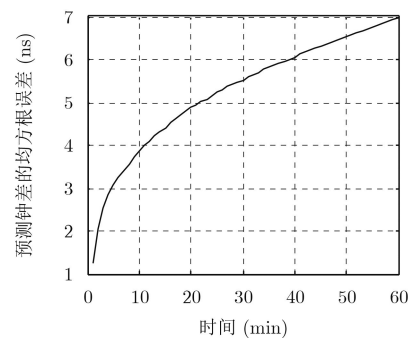


图4 不同时长的接收机钟差预测的均方根误差

4 原子钟和气压测高仪辅助定位算法

地球表面可以近似为一个椭球面，用户的3维坐标 (x_u, y_u, z_u) 和海拔高度 h 可以近似地满足一个椭球的方程，利用气压测高仪测得用户所在位置的海拔高度作为约束条件构造一个观测方程式：

$$\frac{x_u^2 + y_u^2}{(R_e + h)^2} + \frac{z_u^2}{(R_p + h)^2} = 1 \quad (7)$$

式中， $R_e = 6378137.0$ m和 $R_p = 6356752.3$ m分别是地球的赤道半径和极半径；海拔高度 h 由气压测高仪测得。

在接收机内使用原子钟或者将频率源锁定在外部原子钟上，当前的接收机钟差 t_u 可以通过钟差的历史值进行预测。此时钟差可视为已知量，在辅助定位解算时不解算钟差，仅解算用户3维位置。并通过气压测高仪测量气压和温度，使用式(1)计算得到用户高程信息 h ，代入地球椭球方程中产生观测方程式(7)。这时仅对两颗卫星进行伪距测量，便可进行定位解算。联立伪距观测方程和高程观测方程：

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 - ct_u &= \sqrt{(x_{s1} - x_u)^2 + (y_{s1} - y_u)^2 + (z_{s1} - z_u)^2} \\ \rho_2 - ct_u &= \sqrt{(x_{s2} - x_u)^2 + (y_{s2} - y_u)^2 + (z_{s2} - z_u)^2} \\ \frac{x_u^2 + y_u^2}{(R_e + h)^2} + \frac{z_u^2}{(R_p + h)^2} &= 1 \end{aligned} \right\} (8)$$

式中, x_u, y_u 和 z_u 为用户的3维位置, x_s, y_s 和 z_s 为卫星的3维位置, ρ_i 为扣除电离层延迟和对流层延迟等误差后的伪距测量值。

将用户真实位置与近似位置之间的偏移用 $(\Delta x_u, \Delta y_u, \Delta z_u)$ 表示。将式(8)按泰勒级数在近似位置处展开, 并省去1阶偏导数以后的项。可通过式(9)求出 $\Delta x_u, \Delta y_u$ 和 Δz_u :

$$\left. \begin{aligned} \Delta \rho_1 &= a_{x1} \Delta x_u + a_{y1} \Delta y_u + a_{z1} \Delta z_u \\ \Delta \rho_2 &= a_{x2} \Delta x_u + a_{y2} \Delta y_u + a_{z2} \Delta z_u \\ \Delta h &= h_x \Delta x_u + h_y \Delta y_u + h_z \Delta z_u \end{aligned} \right\} (9)$$

其中, a_{xi}, a_{yi} 和 a_{zi} 各项表示由近似用户位置指向第 i 号卫星的单位矢量的方向余弦; Δh 为高度估计值与测量值的差; h_x, h_y, h_z 为地球椭球方程对 x_u, y_u, z_u 的偏导数:

$$\left. \begin{aligned} h_x &= \frac{x_u}{(a+h)^2} \left[\frac{x_u^2 + y_u^2}{(a+h)^3} + \frac{z_u^2}{(b+h)^3} \right]^{-1} \\ h_y &= \frac{y_u}{(a+h)^2} \left[\frac{x_u^2 + y_u^2}{(a+h)^3} + \frac{z_u^2}{(b+h)^3} \right]^{-1} \\ h_z &= \frac{z_u}{(b+h)^2} \left[\frac{x_u^2 + y_u^2}{(a+h)^3} + \frac{z_u^2}{(b+h)^3} \right]^{-1} \end{aligned} \right\} (10)$$

可采用线性化迭代方法对式(9)进行求解^[9]。

5 原子钟和气压测高仪共同辅助北斗系统定位试验

精度因子(DOP)反映了卫星几何结构对导航接收机定位精度的影响。本文以PDOP作为标准衡量卫星几何布局是否满足导航定位要求。若 $PDOP < 6$, 则说明此时卫星几何布局良好, 定位精度相对较高, 对气压测高仪进行校正, 并记录钟差数据; 当 $PDOP > 6$ 时, 此时卫星几何结构不佳, 定位误差将会增大。此时, 使用气压测高仪测量海拔高度, 使用端点法进行接收机钟差的预测。

为了验证原子钟和气压测高仪辅助北斗卫星导航系统在遮挡环境下的导航解算性能, 设计了一个从开阔环境下进入遮挡环境的场景。采用2016年11月11日北斗导航接收机采集的伪距测量值等数据进行定位解算, 气压测高仪同时采集的气压和温度数据。试验中以高度角大于 10° 作为限制条件来模拟开阔环境, 跟踪全部可见的10颗卫星; 仅跟踪

6号和9号两颗卫星模拟用户所处的遮挡环境(高度角约为 60°), 此时的卫星星座图如图5所示。

在试验场景中, 对用户进入遮挡环境后1 h内的定位结果进行分析。PDOP的变化情况如图6所示, 图中圆点实线为在开阔环境下使用10颗卫星的解算结果, \times 型虚线为使用原子钟、气压测高仪和两颗卫星的解算结果。在 $0 \sim 30$ min 内用户在开阔环境下的PDOP大约为2.5。此时, 对气压测高仪进行校准和预测接收机钟差。在 $30 \sim 90$ min 内, 模拟用户进入仅有两颗卫星的遮挡环境, 通过原子钟和气压测高仪辅助后的PDOP值大约为4.5, 系统可以提供定位服务。

在开阔环境下, 水平方向和高程方向上的定位结果如图7—图9中圆点实线所示。在遮挡环境下,

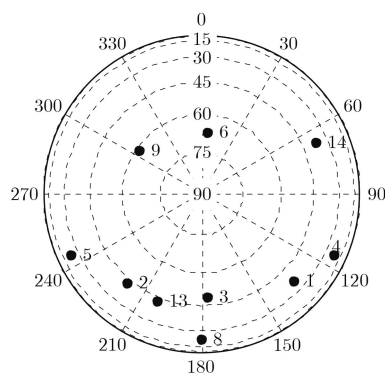


图5 可见卫星星座图

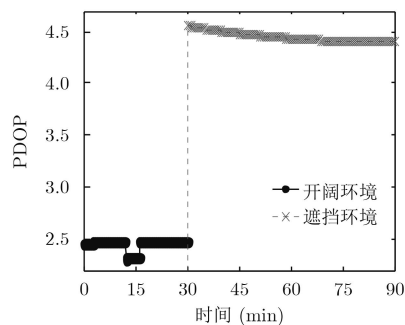


图6 PDOP变化图

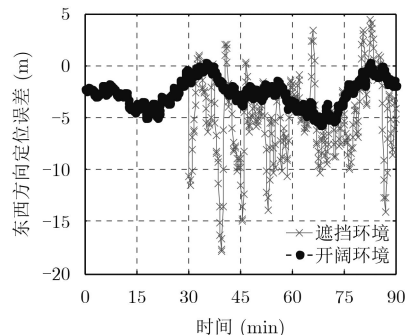


图7 东西方向定位结果对比图

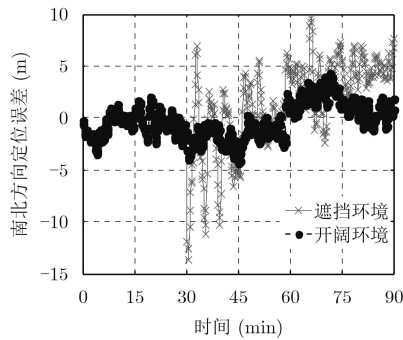


图8 南北方向定位结果对比图

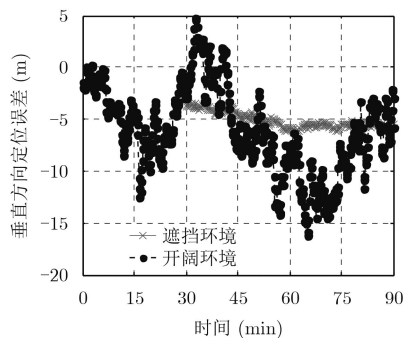


图9 垂直方向定位结果对比图

仅跟踪两颗卫星，通过原子钟和气压测高仪辅助后的定位结果如图7—图9中30~60 min内的×型虚线所示。

从图中可以看出，在只有两颗可见星的重度遮挡环境下，辅助后系统仍可以定位解算，水平方向上的定位误差从3.5 m(RMSE)增加到了8.0 m，虽然水平定位精度降低，但是接收机的连续性很大程度地提高。

通过原子钟和气压测高仪的辅助，垂直方向的定位误差从8.2 m(RMSE)下降到了5.2 m，并且优于开阔环境下的定位结果。原子钟的加入提高了卫星导航系统的高程定位精度，为气压测高仪的初始化提供了更高精度的参考。共同辅助后，垂直方向上系统的定位精度主要取决于气压测高仪的高程测量精度。表4中量化对比了试验中，开阔环境下无辅助时的定位结果与遮挡环境下辅助后的定位结果。

垂直定位误差其中包含了气压测高仪初始化时卫星导航系统的高程误差，也包括了由于气压波动

造成的气压测高仪高度测量误差。随着时间的推移，钟差的估计误差以及气压测高仪的测量误差将会逐渐增大，从而导致定位随之增大。

6 结论

本文首先阐述了原子钟和气压测高仪辅助卫星导航系统的算法；并提出了一种气压测高仪的校正方法；然后分析了原子钟辅助后接收机钟差噪声类型；最后，进行了遮挡环境下原子钟和北斗卫星导航系统试验，分析了使用原子钟和气压测高仪辅助北斗导航系统在遮挡环境下对定位精度及连续性的改善程度。试验结果表明，通过原子钟和气压测高仪的辅助，接收机在仅双星可见的重度遮挡环境下(高度角大于60°)还可以进行定位解算，使其连续性得到了很大程度地提高；并且垂直方向的定位精度优于开阔环境下的定位精度。虽然水平方向上的定位精度稍逊于垂直方向，但仍可以满足定位需求。

参考文献

- [1] ZHANG Jieying, EZZALDEEN E, ZHOU Junchuan, *et al.* Performance investigation of barometer aided GPS/MEMS-IMU integration[C]. Position Location and Navigation Symposium (PLANS), Myrtle Beach, 2012: 598-604. doi: 10.1109/PLANS.2012.6236933.
- [2] KUBO N, TOKURA H, and PULLEN S. Mixed GPS-BeiDou RTK with inter-systems bias estimation aided by CSAC[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(1): 5. doi: 10.1007/s10291-017-0670-1.
- [3] CALERO D and FERNANDEZ E. Characterization of chip-scale atomic clock for GNSS navigation solutions[C]. International Association of Institutes Navigation World Congress(IAIN), Prague, 2015: 1-8. doi: 10.1109/IAIN.2015.7352264.
- [4] RAMLALL R, STREETER J, and SCHBECKER J F. Three satellite navigation in an urban canyon using a chip-scale atomic clock[C]. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, 2011: 2937-2945.
- [5] ZHOU Weili, HUANG Chao, SONG Shuli, *et al.* Characteristic analysis and short-term prediction of GPS/BDS satellite clock correction[C]. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2016 Proceedings, Changsha, 2016, 3: 187-200. doi: 10.1007/978-981-10-0940-2_17.
- [6] MISRA P N. Clock-aided satellite navigation receiver system for enhanced position estimation and integrity monitoring[P]. USA Patent, 1997, US5623414A.
- [7] LIU Chang, XU Feng, QU Yongsheng, *et al.* Analysis on factors influencing frequency drift of rubidium clocks for

表4 1个小时内各个方向上的定位误差

	RMSE (m)		Std (m)	
	开阔环境	遮挡环境	开阔环境	遮挡环境
东西方向	2.9	6.6	1.5	4.1
南北方向	1.9	4.5	1.9	4.3
垂直方向	8.2	5.2	4.6	0.8

- satellite navigation[C]. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2016 Proceedings, Changsha, 2016, 3: 645–652. doi: [10.1007/978-981-10-0940-2_56](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0940-2_56).
- [8] KRAWINKEL T and SCHON S. Benefits of receiver clock modeling in code-based GNSS navigation[J]. *GPS Solutions*, 2015, 20(4): 1–15. doi: [10.1007/s10291-015-0480-2](https://doi.org/10.1007/s10291-015-0480-2).
- [9] 孙健. GPS和高精度气压高度表的组合导航定位技术研究[D]. [硕士论文], 南京航空航天大学, 2008.
- SUN Jian. Research on GPS and high precision baro- altimeter integrated navigation and positioning technology[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [10] 李博, 李孝辉. 气压测高仪的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(1): 53–56. doi: [10.3969/j.issn.1002-8978.2017.01.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-8978.2017.01.014).
- LI Bo and LI Xiaohui. Design and implementation of barometric altimeter[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2017, 36(1): 53–56. doi: [10.3969/j.issn.1002-8978.2017.01.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-8978.2017.01.014).
- [11] KAPLAN E D and HEGARTY C. Understanding GPS: Principles and Applications[M]. London: Artech House, 2005: 336. doi: [10.1016/S1364-6826\(97\)83337-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)83337-8).
- [12] KLINE P A. Atomic clock augmentation for receivers using the Global Positioning System[D]. [Ph.D. dissertation], Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997: 55–57.
- [13] ALLAN D W. Should the classical variance be used as a basic measure in standards metrology?[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1987, IM-36(2): 646–654. doi: [10.1109/TIM.1987.6312761](https://doi.org/10.1109/TIM.1987.6312761).
- [14] 李孝辉. 时间频率信号的精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 34.
- LI Xiaohui. Precise Measurement of Time and Frequency Signals[M]. Beijing: Science Press, 2010: 34.
- [15] RILEY W J. Handbook of frequency stability analysis[J]. *NIST*, 2007, 1065: 1–123.
- [16] ALLAN D W. Time and frequency (time-domain) characterization, estimation, and prediction of precision clocks and oscillators[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 1987, 34(6): 647–654. doi: [10.1109/T-UFFC.1987.26997](https://doi.org/10.1109/T-UFFC.1987.26997).
- 李 博: 男, 1989 年生, 博士生, 研究方向为多信息源融合导航方法.
- 徐 超: 男, 1989 年生, 博士生, 研究方向为高精度时间频率测量控制方法与技术.
- 李孝辉: 男, 1974 年生, 研究员, 主要研究方向为卫星导航系统中高精度时间频率测量控制方法与技术.