

伪卫星辅助北斗定位精度改进方法*

徐博¹, 李昊², 欧钢¹

(1. 国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073;

2. 中国人民解放军 94754 部队, 浙江 嘉兴 314013)

摘要: 由于北斗二号一期系统卫星集中分布在赤道附近, 导致国土范围内接收机南北方向定位精度偏低, 且由于可视卫星均为正仰角, 导致接收机垂直方向定位精度也偏低的问题, 提出了利用地面伪卫星改善用户观测几何结构的方法来提高一定区域范围内北斗接收机的定位精度。推导了伪卫星与真实卫星组合的最小二乘定位算法模型, 并给出了用于定位精度评估的南北和垂直方向的精度衰减因子值。仿真结果表明: 在用户使用范围的北部地区布设伪卫星可有效降低用户南北方向以及垂直方向的精度衰减因子值, 从而有效改善定位精度。

关键词: 伪卫星; 北斗; 卫星导航系统; 定位精度

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)05-056-05

BeiDou positioning accuracy improvement based on pseudolites

XU Bo¹, LI Hao², OU Gang¹

(1. College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. The PLA Unit 94754, Jiaxing 314013, China)

Abstract: BeiDou satellites concentrates near the equator, which results in a low positioning accuracy within the homeland in north-south direction. Because the visible satellites are positive elevation, the vertical positioning accuracy is also low. To solve the above problems, a method to improve BeiDou satellites positioning accuracy was proposed, which uses pseudolites to improve the user observation geometry. The least square positioning algorithm based on the combination of pseudolites and satellites was derived. Dilution of positioning in north-south and vertical direction were also proposed to evaluate the positioning precision. Simulation results show that the dilution of positioning in north-south and vertical direction can be reduced effectively by lying pseudolites in the north area of users, thus the positioning accuracy can be effectively improved.

Key words: pseudolites; BeiDou; satellite navigation system; positioning accuracy

由于地球的遮挡, 卫星导航接收机观测到的可视卫星均分布在接收机上方, 即观测仰角均为正仰角, 导致接收机垂直方向定位精度明显低于水平方向定位精度。北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite System, BDS), 目前可提供区域服务, 可用卫星数量为 14 颗, 其中 5 颗为地球同步轨道卫星, 固定分布在赤道上空, 导致国土范围内接收机的可视 BDS 卫星大部分位于南边, 这就导致接收机南北方向定位精度偏低。在上述背景下, 如何提高 BDS 南北方向和垂直方向的定位精度成了目前 BDS 应用的研究热点。

伪卫星也称陆基卫星, 是指布设在已知精确位置的地面或低空平台上的导航信号发射设备, 其功能相当于一颗导航卫星。伪卫星对于卫星导航系统而言是一种非常有效的增强手段, 可解决卫星信号不足的问题^[1-2], 近年来也成为提高卫

星导航可用性的研究热点。

在伪卫星组网方面, 目前相关的研究成果主要集中在组网拓扑结构上, 例如岳亚洲等进行了伪卫星组网后的几何精度因子分析^[3]。在应用伪卫星改善定位精度方面, 针对全球定位系统(Global Position System, GPS)的研究较多, 针对 BDS 的研究较少, 刘娣等提出多种组网方式提高北斗一代双星定位系统定位精度^[4], 然而在北斗系统全面升级到二号一期区域定位服务的条件下, 目前并没有专门针对二号一期系统特点研究定位精度提升方法。此外, 在伪卫星的相关研究中, 主要还包括了时间同步、消除远近效应等^[5-6]。

考虑到伪卫星的特点, 本文提出了利用伪卫星来提高 BDS 接收机定位精度的方法。在接收机作业范围的最北端地面附近布设伪卫星, 对于接收机而言, 相当于增加了北部和近地面的可视

* 收稿日期: 2016-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61403413)

作者简介: 徐博(1982—), 男, 河南洛阳人, 讲师, 博士研究生, E-mail: 48193077@qq.com

卫星,可以有效提高 BDS 接收机的南北方向和垂直方向的定位精度。

目前全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)技术已走入多模多频时代,可用的卫星更多,可以有效解决单 BDS 南北方向定位精度偏低的问题。但是即便如此,多模多频应用也无法解决高程定位精度偏低的问题。因此希望通过在近地面增加伪卫星的方法提高高程定位精度,为现代化多模多频 GNSS 应用提供必要的补充。

1 算法分析

1.1 基于伪卫星的组合定位数学模型

接收机接收导航卫星信号,得到的伪距观测方程为:

$$\rho_s = \sqrt{(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2 + (z_s - z)^2} + e_s + c\Delta t - c\Delta t^s \quad (1)$$

接收机接收伪卫星信号,得到的伪距观测方程为:

$$\rho_a = \sqrt{(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2 + (z_a - z)^2} + e_a + c\Delta t - c\delta \quad (2)$$

其中: ρ_s 为真实导航卫星伪距; (x_s, y_s, z_s) 为卫星几何位置坐标; (x, y, z) 为接收机坐标; e_s 为卫星信号传输到接收机过程中的电离层延迟误差、对流层延迟误差、多径误差、测量噪声等误差的和; c 为光速; Δt 为接收机钟差; Δt^s 为卫星钟差,电离层、对流层误差以及卫星钟差可以通过广播的模型参数进行修正; ρ_a 为伪卫星信号伪距; (x_a, y_a, z_a) 为伪卫星几何位置坐标; e_a 为伪卫星信号传输过程中的误差,主要为多径误差; δ 为伪卫星的钟差,可通过额外的时间同步方法先解算得到。

伪卫星完成时间同步后,将真实卫星与伪卫星伪距观测方程组合起来,并对观测方程进行线性化,得到:

$$Y = GX + E \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \rho_s^1, \rho_s^2, \dots, \rho_a^1, \rho_a^2, \dots \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{-(x_{s1} - x')}{r} & \frac{-(y_{s1} - y')}{r} & \frac{-(z_{s1} - z')}{r} & c \\ \frac{-(x_{s2} - x')}{r} & \frac{-(y_{s2} - y')}{r} & \frac{-(z_{s2} - z')}{r} & c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{-(x_{a1} - x')}{r} & \frac{-(y_{a1} - y')}{r} & \frac{-(z_{a1} - z')}{r} & c \\ \frac{-(x_{a2} - x')}{r} & \frac{-(y_{a2} - y')}{r} & \frac{-(z_{a2} - z')}{r} & c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot$$

$$[\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t]^T + [e_{s1}, e_{s2}, \dots, e_{a1}, e_{a2}, \dots]^T \quad (4)$$

利用最小二乘法对式(4)进行迭代解算,求解4个未知数。完成上述解算至少需要4颗卫星(含伪卫星)的伪距。

1.2 垂直及南北方向定位精度衰减因子值

由式(4)可以得到方程的权系数矩阵^[7]为:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & & & \\ & h_{22} & & \\ & & h_{33} & \\ & & & h_{44} \end{bmatrix} = (G^T G)^{-1} \quad (5)$$

为了定义垂直方向和南北方向的定位精度衰减因子(Dilution Of Positioning, DOP),需要将原采用空间直角坐标系表示的站坐标转换为用大地坐标系表示的站坐标。

转换后的权系数矩阵为:

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{11} & & & \\ & \tilde{h}_{22} & & \\ & & \tilde{h}_{33} & \\ & & & \tilde{h}_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} H \begin{bmatrix} S^T & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 S 为坐标转换矩阵,表示为:

$$S = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\phi\cos\lambda & -\sin\phi\sin\lambda & \cos\phi \\ \cos\phi\cos\lambda & \cos\phi\sin\lambda & \sin\phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: λ 为大地经度; ϕ 为大地纬度。

由转换后的站心坐标系权系数矩阵,即可得到垂直方向的 DOP 值为:

$$VDOP = \sqrt{\tilde{h}_{33}} \quad (8)$$

南北向的 DOP 值为:

$$NDOP = \sqrt{\tilde{h}_{22}} \quad (9)$$

1.3 伪卫星自主时间同步算法

根据导航定位原理可知,卫星之间的时间必须是同步的,否则将会给定位引入时间同步误差。同样地,伪卫星也需要与系统时间保持同步。

目前常用的时间同步方法有双向时间比对、利用专用的地面时间同步网络将伪卫星时间与主控站时间同步等方法^[5]。这些方法都需要单独对伪卫星进行时间同步,增加了系统的复杂性。

采用标准点自时间同步的方法解决伪卫星的时间同步问题。由于伪卫星架设的位置可以事先标定,即伪卫星位置精确已知,则只需要伪卫星具备正常卫星信号接收能力,即可通过单星时间同步的方法实现伪卫星与真实卫星间的精确时间

同步。

伪卫星时间同步原理为：

$$\begin{cases} \Delta t_a^s = \frac{\rho_a^s - e_a^s - \rho}{c} \\ \rho = \sqrt{(x_s - x_a)^2 + (y_s - y_a)^2 + (z_s - z_a)^2} \end{cases} \quad (10)$$

其中： Δt_a^s 为卫星与真实卫星间的钟差； ρ_a^s 为伪卫星观测真实卫星得到的伪距测量值； e_a^s 为伪卫星观测真实卫星时的电离层传播延迟误差等伪距误差； ρ 为伪卫星与真实卫星的距离真值，通过伪卫星和真实卫星的三维位置坐标得到。

利用式 (10) 进行钟差解算只需要观测 1 颗真实卫星即可，然而在接收到多颗卫星的条件下，可以进行多星定位，同时解算出钟差。上述方法的时间同步精度可达到纳秒级。

2 伪卫星组网原则

伪卫星通常架设在地面附近，离地面高度约 50 m^[4]，这样有利于提高用户的垂直方向定位精度，特别是对于机载用户，高程定位精度改善明显。伪卫星架设数量越多，用户观测几何结构越好，越有利于定位精度的提升，但是由于伪卫星存在大小信号、多径等不利影响^[8]。一个区域内不宜布设太多的伪卫星，需合理考虑伪卫星的组网方案。

BDS 目前可提供区域服务，但是对于国内用户而言，北斗卫星主要集中在低纬度地区，高纬度地区分布较少，这就必然会导致南北方向定位精度偏低。

为了解决国内 BDS 用户垂直方向和南北方向定位精度偏低的问题，应该在用户范围的北部近地面位置布置数量适当的伪卫星。

3 算法性能仿真分析

下面对不同组网方式下的定位精度进行仿真分析。卫星星座选择 BDS 二号一期区域系统星座，包含 5 颗地球同步轨道 (Geostationary Earth Orbit, GEO) 卫星，5 颗倾斜地球同步轨道 (Inclined GeoSynchronous Orbits, IGSO) 卫星和 4 颗中地球轨道 (Medium Earth Orbit, MEO) 卫星。

首先分析整个国土范围内接收 BDS 二号一期卫星时的卫星几何分布情况。仿真区域范围为东经 60° ~ 145°，北纬 0° ~ 55°，涵盖了国土范围。在整个区域内隔 5° 经度和纬度划分为一个网格，模拟用户位置，对仿真区域内每个网格点进行 DOP 值仿真计算。用户高程假设为 10 km。

在无伪卫星辅助的情况下，区域内各用户点接收 BDS 二号一期卫星信号时，VDOP 和 NDOP 结果如图 1 所示。

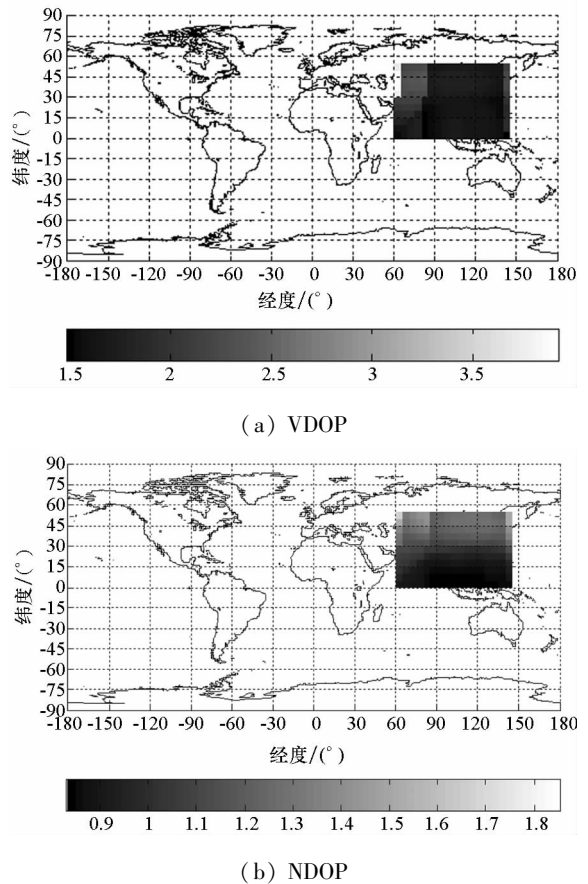


图 1 无伪卫星时仿真区域内平均 VDOP 和 NDOP 值
Fig. 1 Average VDOP and NDOP without the pseudolites

从图 1 可以清晰地看出，整个区域各个位置点的平均 VDOP 和 NDOP，其 VDOP 值明显高于 NDOP 值，这也说明了整个国土范围内，用户垂直定位精度偏低。因此有必要在实际用户使用范围内架设伪卫星以提高垂直方向定位精度。

下面选取北京 (N40°, E116°)、长沙 (N28°, E113°)、西安 (N34°, E108°) 三地作为代表，仿真分析增加伪卫星对三地区域用户接收机定位精度的改进情况。假设用户区域范围为 10 km²，伪卫星的架设按照如下几个场景进行。

1) 2 颗伪卫星：在用户应用区域的最北边架设 2 颗伪卫星，高度均为 50 m，如图 2 所示。

2) 3 颗伪卫星：在用户应用区域的最北边架设 2 颗、在中部架设 1 颗，高度均为 50 m，如图 3 所示。

3) 4 颗伪卫星：在用户应用区域的最北边架设 2 颗、在中部架设 2 颗，高度均为 50 m，如图 4 所示。



图2 用户区域布设2颗伪卫星

Fig. 2 Two pseudolites assisted in user region

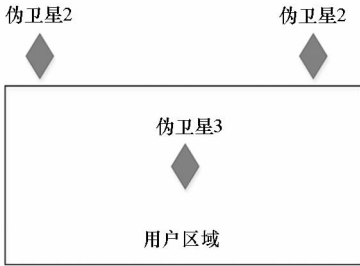


图3 用户区域布设3颗伪卫星

Fig. 3 Three pseudolites assisted in user region

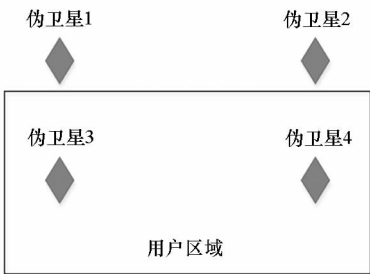


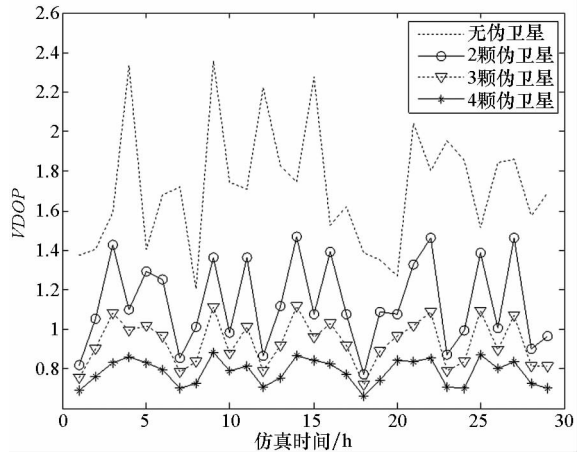
图4 用户区域布设4颗伪卫星

Fig. 4 Four pseudolites assisted in user region

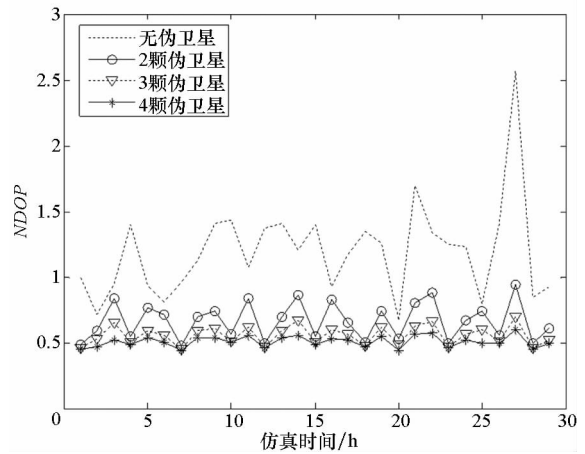
在上述场景下,三地的 DOP 值情况如图 5 所示。

从图 5 可知,增加伪卫星后北京仿真地区用户平均 VDOP 和 NDOP 的性能都有了较大幅度的提升,且随着伪卫星数量的增加,DOP 值逐渐降低。图 5 (b)中无伪卫星辅助时,在横坐标 27 处

出现了 DOP 值跳变,原因是此时真实卫星分布不理想,而此时增加伪卫星辅助的改善效果更为明显。



(a) VDOP



(b) NDOP

图5 有伪卫星辅助条件下北京地区平均 VDOP 和 NDOP 值

Fig. 5 Average VDOP and NDOP of Beijing with the assist of pseudolites

表 1 详细统计了三地仿真时间内平均 DOP 值情况。

表 1 有伪卫星辅助条件下平均 VDOP 和 NDOP 值对比
Tab. 1 Average VDOP and NDOP with assist of the pseudolites

	无伪卫星		2 颗伪卫星				3 颗伪卫星				4 颗伪卫星			
	平均 NDOP	平均 VDOP	平均 NDOP	改进比例	平均 VDOP	改进比例	平均 NDOP	改进比例	平均 VDOP	改进比例	平均 NDOP	改进比例	平均 VDOP	改进比例
北京	1.25	1.75	0.65	48.0%	1.13	35.4%	0.55	56.0%	0.93	46.9%	0.50	60.0%	0.79	54.9%
长沙	1.08	1.67	0.64	40.7%	0.95	43.1%	0.64	40.7%	0.92	44.9%	0.63	41.7%	0.83	50.3%
西安	1.18	1.75	0.67	43.2%	1.07	38.9%	0.54	54.2%	0.86	50.9%	0.58	50.9%	0.80	54.3%

从表 1 仿真结果可以看出,选择的三个地点,定位精度随着伪卫星的增加逐渐提高。北京仿真地区用户平均 NDOP 值由 1.25 降低到了 0.50,这表明该地区南北方向定位精度提高了 60%;同时北京仿真地区用户平均 VDOP 从 1.75 降低到了 0.79,表明该区域用户垂直方向定位精度提升了 54.9%。长沙、西安的仿真结果也有类似结论。除了仿真选择的三个地点外,仿真区域其他地点南北和垂直方向定位精度同样得到了较大提升,由于篇幅关系,这里不再详细论述。

4 结论

本文提出了利用伪卫星提高北斗系统用户定位精度的方法。对于目前北斗二号一期星座条件,在用户应用范围的北部地区近地面布设伪卫星可有效提升用户垂直方向和南北方向定位精度。

实际应用中,要根据用户使用范围、周边环境等因素综合考虑伪卫星的架设位置和数量,可用提出的方法仿真分析不同伪卫星分布情况对定位精度的改进程度。研究成果对于利用伪卫星辅助提升定位精度的工程实践具有一定的指导意义。

参考文献 (References)

[1] Wang J. Pseudolite applications in positioning and navigation: progress and problems [J]. Journal of Global Positioning System, 2002, 01(3): 48-56.

[2] 王晖辉, 战兴群, 翟传润, 等. 伪卫星增强 GPS 定位技术及现状分析[J]. 测绘科学, 2009, 34(3): 11-13.
WAGN Huihui, ZHAN Xingqun, ZHAI Chuanrun, et al. The positioning technology of pseudolite augmenting GPS and actuality analysis [J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(3): 11-13. (in Chinese)

[3] 岳亚洲, 雷宏杰, 高关根. 伪卫星定位的精度分析[J]. 传感技术学报, 2009, 22(10): 1432-1436.
YUE Yazhou, LEI Hongjie, GAO Guangen. Precision analysis of pseudolite positioning system [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(10): 1432-1436. (in Chinese)

[4] 刘娣, 薄煜明, 吴盘龙. 基于伪卫星的北斗双星导航系统 DOP 值[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(7): 136-139.
LIU Di, BO Yuming, WU Panlong. The research on DOP of BeiDou positioning system using pseudolite [J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(7): 136-139. (in Chinese)

[5] 李涛护, 刘建胜, 黄智刚, 等. 一种基于伪卫星信号正交性的远近效应消除技术[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(6): 1366-1369.
LI Taohu, LIU Jiansheng, HUANG Zhigang, et al. A solution of the near-far effect based on the orthogonality of pseudolite signal [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(6): 1366-1369. (in Chinese)

[6] 罗益, 魏海涛. 基于伪卫星的 GNSS 星地时间同步评估仿真研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(2): 38-43.
LUO Yi, WEI Haitao. Study on GNSS satellite-ground time synchronization evaluation based on pseudolite and simulation [J]. Computer Simulation, 2015, 32(2): 38-43. (in Chinese)

[7] Yarlagadda R, Ali I, Al-Dhahir N, et al. GPS GDOP metric [J]. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 2000, 147(5): 259-264.

[8] Stewart C H. GPS pseudolites: theory, design, applications [D]. USA: Stanford University, 1997.