

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.12.008

伪卫星辅助的北斗双星系统军事应用分析

王坦^{1,2}, 刘作学³, 刘博¹, 王智²

(1. 装备指挥技术学院研究生管理大队, 北京 101416; 2. 中国人民解放军 63717 部队, 太原 030031;
3. 装备指挥技术学院信息装备系, 北京 101416)

摘要: 针对目前北斗双星系统在军事应用方面受到限制的问题, 提出采用伪卫星辅助增强双星系统方案实现特定区域内无源定位。分析采用一颗伪卫星时系统的视距范围, 并在视距覆盖范围内对“双星+1颗伪卫星+高度表”的定位方案的定位误差参数进行仿真。仿真结果表明: 采用伪卫星来辅助增强北斗双星系统, 可提高系统应用的隐蔽性, 增强系统的军事应用价值。

关键词: 北斗双星; 伪卫星; 视距范围; 定位精度; 军事应用

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Military Application Analysis of Imitate Satellite Aided Beidou Double-Star System

Wang Tan^{1,2}, Liu Zuoxue³, Liu Bo¹, Wang Zhi²

(1. Administrant Brigade of Postgraduate, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China;
2. No. 63717 Unit of PLA, Taiyuan 030031, China;
3. Dept. of Communication & Equipment, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Aimed at the limitation of the Beidou double-star system's military application value, a local passive position scheme was put forward by using imitate satellite aided to aid Beidou double-star system. The sight-distance range of one imitate satellite aided was analyzed. The location error arguments of the passive position method of “double-star + one imitate satellite aided + altimeter” within the sight-distance were simulated. The simulation results show that this scheme is feasible, which can enhance the security and the military application value of the system.

Keywords: Beidou double-star system; imitate satellite aided; sight-distance range; position accuracy; military application

0 引言

北斗一号卫星定位系统于 2003 年正式开通, 现有 2 颗在轨卫星。北斗一号系统可全天候、全天时提供卫星导航信息, 服务区域为 $70^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$, $5^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, 能覆盖中国及周边地区^[1]。但由于北斗系统独特的定位原理, 导致其存在低纬度地区定位精度低的缺陷, 又由于采用有源定位方式, 使得用户极易暴露自身位置, 大大限制了其应用^[2]。当前, 北斗二代系统现仍处于卫星组网阶段, 尚未投入正式应用。如果在某区域内增加若干颗伪卫星, 则可以弥补北斗一号系统的缺陷, 实现区域无源定位, 增强系统的军事应用价值。因此, 笔者对伪卫星辅助的北斗双星系统军事应用进行研究。

1 伪卫星原理

1.1 伪卫星

伪卫星功能和原理与导航卫星类似, 它能发出

与导航卫星相同格式的电文, 普通的卫星接收机只需在软件上稍作修改即可接收它的信号, 并得到用于导航计算的伪距或载波相位量测。针对北斗双星系统存在的缺陷, 可以利用一颗或多颗伪卫星与北斗双星组合实现高精度的无源定位。

伪卫星具有以下特点: 1) 设置灵活机动。伪卫星可以根据需要方便地设置在适当的位置上, 例如可放置在车上或空中飞行器上; 2) 抗干扰性能强。伪卫星与用户的距离从几十千米到几百千米, 因此信号强度比太空中的卫星强得多, 抗干扰能力明显提高; 3) 成本低。伪卫星本身单价和维护费用要比导航星便宜得多, 而且现有的用户接收机只需对相应的软件稍作升级即可接收伪卫星的信号, 降低了应用成本。

1.2 伪卫星的视距范围

1.2.1 地面伪卫星视距范围

为粗略研究伪卫星的视距范围, 可将地球简化

为一个圆球，半径采用 WGS-84 坐标系，取 $R=6\,378.137\text{ km}$ 。

若伪卫星配置于地面，用户接收机处于空中 $1\,000\text{ m}$ 处，则根据用户接收机对导航卫星和所有伪卫星站可视的前提条件，可得伪卫星基地的视距范围，如图 1。

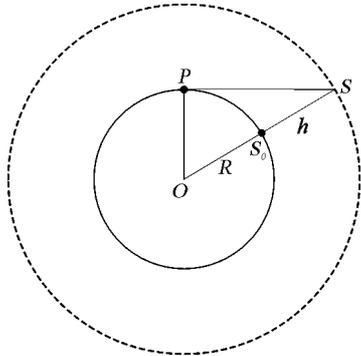


图 1 地面伪卫星覆盖范围

图 1 中， O 点为地心； S 点为用户； P 为地面伪卫星基站； h 为用户高度； S_0 为用户与地心和地面的交点。则对空中用户伪卫星基站所能覆盖的地面半径 PS_0 为：

$$PS_0 = R \times \arccos \frac{R}{R+h} \quad (1)$$

若用户距离地面高度在 10 km 之内，则地面伪卫星视距范围与用户高度之间关系如图 2。

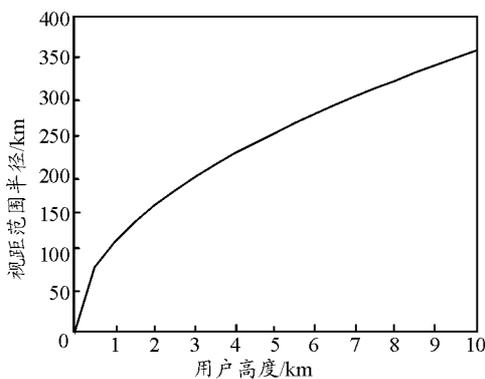


图 2 地面伪卫星对用户视距范围

若 $h=1\,000\text{ m}$ ，则由式 (1) 可得 $PS_0=112.936\text{ km}$ 。即对于在空中距离地面 $1\,000\text{ m}$ 的用户，只有在距离伪卫星基站 112.936 km 范围内，才能够利用地面伪卫星进行导航。从图 2 可见，对于高度越低的用户，地面伪卫星基地的覆盖就越小。当 $h=0$ 时，即用户位于地面， $PS_0=0$ ，因此，它对于地面用户是没有应用价值的。

1.2.2 空中伪卫星视距范围

空中伪卫星对空中用户的覆盖范围如图 3。

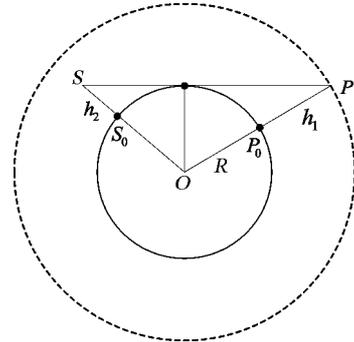


图 3 空中伪卫星对空中用户覆盖范围

其中： O 点为地心； P 为空中伪卫星； S 点为用户； P, S 与地心连线和地面的交点分别为 P_0, S_0 ； h_1 为空中伪卫星距地面的高度； h_2 为用户接收机距地面的高度，此时空中伪卫星所覆盖的地面半径约为：

$$P_0S_0 = R \times \arccos \frac{R}{R+h_1} + R \times \arccos \frac{R}{R+h_2} \quad (2)$$

此时覆盖范围与伪卫星及用户高度的关系如图 4。

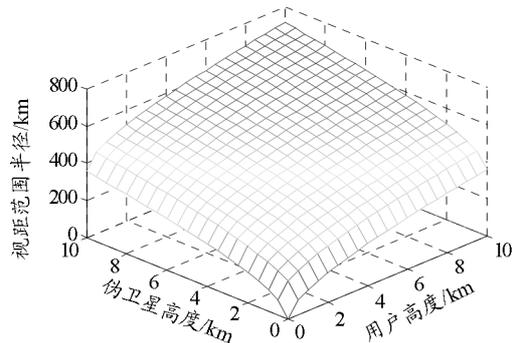


图 4 空中伪卫星对空中用户视距范围

当 $h_1=1\,000\text{ m}$ ， $h_2=500\text{ m}$ 时，由式 (2) 可得 $P_0S_0=192.756\text{ km}$ 。与地面伪卫星相比，其范围明显扩大。

若对于地面用户，由于受卫星最小高度角的限制，其地面覆盖如图 5。

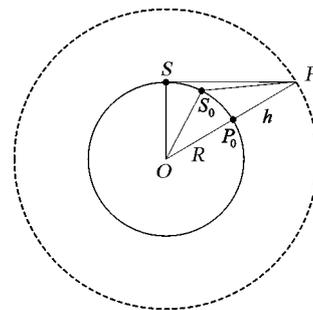


图 5 空中伪卫星对地面用户覆盖范围

设最小高度角为 α , 则此时:

$$P_0S_0 = R \times \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{R \times \sin(\pi/2 + \alpha)}{R + h} - \alpha \right) \quad (3)$$

若 $\alpha = 5^\circ$, 则伪卫星覆盖地面用户范围半径与其配置高度关系如图 6。

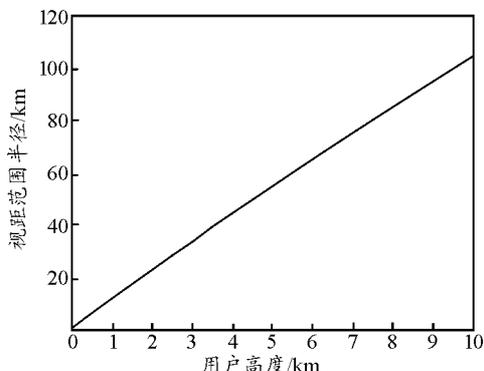


图 6 空中伪卫星对地面用户视距范围

当 $h=1\ 000\text{ m}$ 时, $P_0S_0=11.314\text{ km}$ 。可见空中伪卫星对地面用户的覆盖范围远小于空中用户。

上面分析的是数学意义上的视距范围。在实际的定位导航中, 由于各方面的原因, 并且要保证定位精度, 定位范围可能达不到上面分析的数字。

2 伪卫星辅助的北斗双星定位

2.1 定位原理

采用多球交汇定位原理, 伪卫星发射本站伪码扩频的导航电文, 格式与“北斗”卫星信号相同。在用户处, 只需对原有接收机的软件部分进行一些修改而不必进行硬件改动即可定位, 用户可以既接收双星的信号, 又接收伪卫星的信号, 并进行定位。卫星通过地面控制中心来控制, 伪卫星接收双星系统的信号实现两者的时间同步。中心控制站经两卫星转发包含时间标志的无线电信号, 各伪卫星也向用户发出类似包含时间信息的电磁波。用户通过接收双星和伪卫星的信号得到伪距观测量, 必要时再加上用户高程信息以构造足够的观测量, 由用户终端自身携带的计算机进行解算定位。用户不需要再向中心站发出入站请求信号, 提高了用户的隐蔽性。

2.2 定位精度仿真

笔者对“北斗双星+1 颗伪卫星+高度表”的无源定位方案进行定位精度仿真。文献[3]中提到, 伪卫星若配置在比用户维度低的位置, 则从地面伪卫星出发会存在 2 条大圆弧, 其附近区域定位精度极

低。所以笔者只取伪卫星视距范围内比伪卫星维度低的区域进行仿真。

2.2.1 定位误差参数

“双星+1 颗伪卫星+高度表”方案的定位原理^[4-5]是: 赤道上空合理分布 2 颗地球同步卫星, 用户视距范围内选择合适位置部署 1 颗伪卫星, 则用户接收机能够测得至 3 颗卫星的伪距, 并获得卫星的准确位置坐标, 然后利用用户自带的气压高度测量装置来测量用户的海拔高度以构造第 4 个观测方程。利用 2 颗地球同步卫星、1 颗伪卫星与高度表可实现全天候、高精度、快速实时特点的区域性导航定位。用户接收机测得的伪距量测值可简单地表示为:

$$\begin{cases} \rho_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} + c\Delta t_u \\ \rho_2 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} + c\Delta t_u \\ \rho_s = \sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + (z-z_s)^2} + c\Delta t_u \\ H = \sqrt{(1-f)^2(x^2 + y^2 + z^2)} - R \end{cases} \quad (4)$$

式中: ρ_s 表示用户接收机与伪卫星之间的伪距; $(x_i, y_i, z_i), (i=1,2)$ 和 (x_s, y_s, z_s) 分别表示北斗双星与伪卫星在 ECEF 坐标系中的坐标; Δt_u 为接收机的时间误差; f 为地球偏心率; R 为地球半径。

设 $l = c\Delta t_u$, 将式 (4) 按泰勒级数展开:

$$\begin{bmatrix} \partial\rho_1 \\ \partial\rho_2 \\ \partial\rho_s \\ \partial H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial\rho_1/\partial x & \partial\rho_1/\partial y & \partial\rho_1/\partial z & 1 \\ \partial\rho_2/\partial x & \partial\rho_2/\partial y & \partial\rho_2/\partial z & 1 \\ \partial\rho_s/\partial x & \partial\rho_s/\partial y & \partial\rho_s/\partial z & 1 \\ \partial H/\partial x & \partial H/\partial y & \partial H/\partial z & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta l \end{bmatrix} \quad (5)$$

简记为 $\Delta\omega = G \cdot \Delta r$ 。

采用最小二乘法后, 由 $D = cov(\Delta r) = (G^T G)^{-1} G^T cov(\Delta\omega) G (G^T G)^{-1}$, 可得用户定位误差参数分别为:

总体定位误差 (general location error):

$$E_{GL} = \sqrt{D(1,1) + D(2,2) + D(3,3)} \quad (6)$$

水平定位误差 (horizontal location error):

$$E_{HL} = \sqrt{D(1,1) + D(2,2)} \quad (7)$$

垂直定位误差 (vertical location error):

$$E_{VL} = \sqrt{D(3,3)} \quad (8)$$

2.2.2 地面伪卫星定位精度

北斗双星的工作位置分别为(80°E, 0°, 36 000 km), (140°E, 0°, 36 000 km)。假设伪卫星配置位置为(110°E, 40°N), 用户高程为 1 000 m, 在伪卫星视距范围内仿真后定位误差参数如图 7~9。

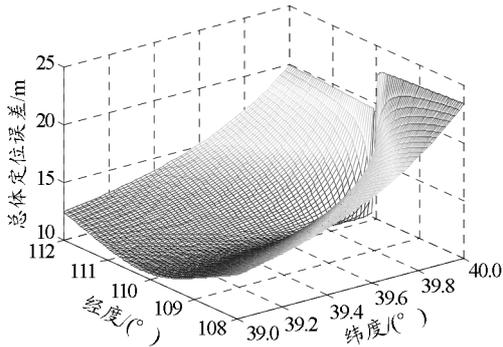


图 7 总体定位精度

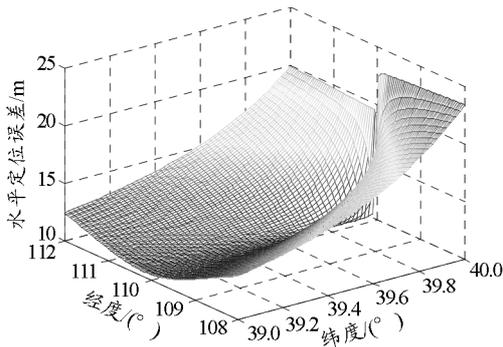


图 8 水平方向定位精度

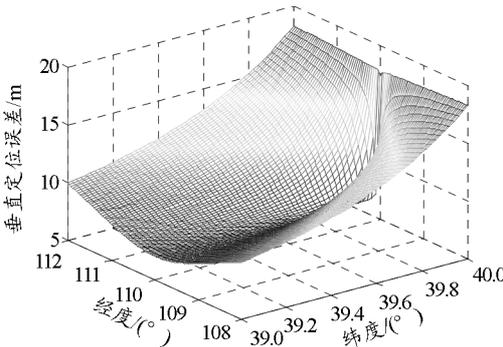


图 9 垂直定位精度

从仿真结果可以看出, 在地面伪卫星视距范围内, 增强后的北斗双星系统对于视距范围内距离伪卫星越远的用户定位精度越高, 在整个视距范围内, 系统保持着较高的定位精度, 完全可以满足一般空中军事用户的定位需求。

2.2.3 空中伪卫星定位精度

2.2.3.1 对于空中用户

若伪卫星配置位置为(110°E, 40°N), 且与用户机均配置于空中 1 000 m 处, 在伪卫星视距范围内仿真后定位误差参数如图 10~12。

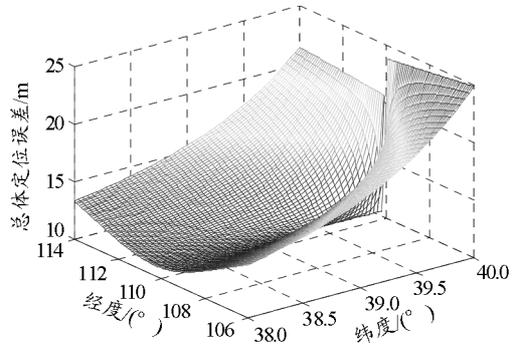


图 10 总体定位精度

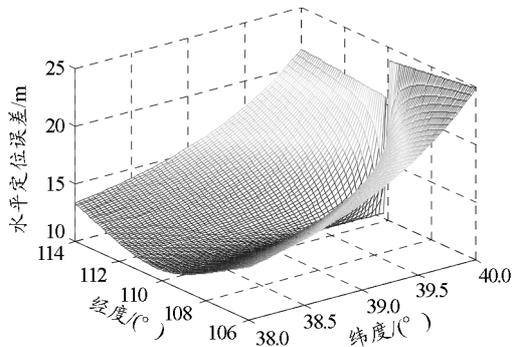


图 11 水平方向定位精度

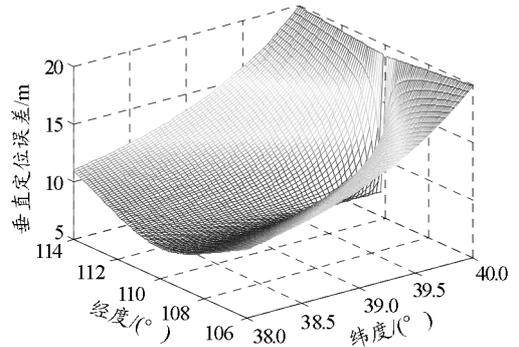


图 12 垂直定位精度

从仿真结果可以看出, 配置于空中的伪卫星对于空中用户仍有着较高的定位精度, 并且覆盖范围相对于地面配置伪卫星有很大提高, 适用于更大区域内的军事行动。

2.2.3.2 对于地面用户

综上所述, 对于地面用户, 如果伪卫星配置高度过低, 则其覆盖范围就很低, 限制了其应用。所以, 在这里取伪卫星配置高度为 10 000 m 进行仿真。

仿真定位误差参数结果如图 13~15。

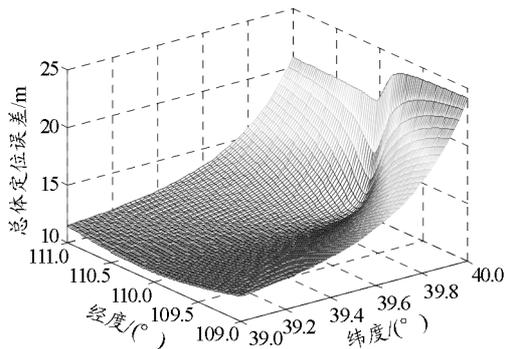


图 13 总体定位精度

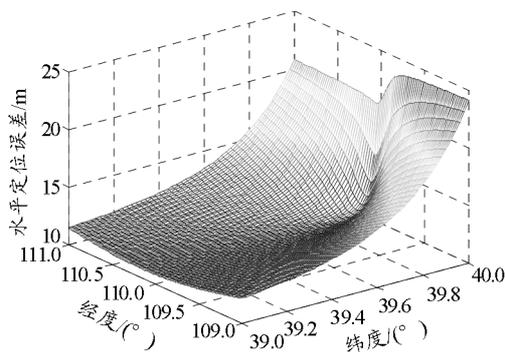


图 14 水平方向定位精度

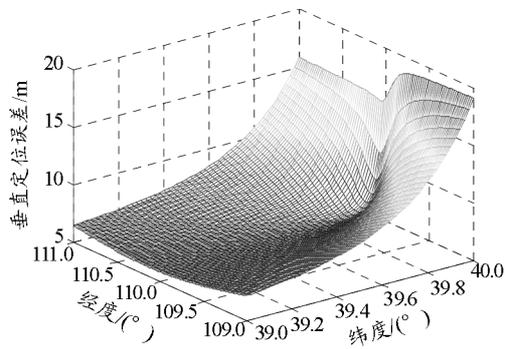


图 15 垂直定位精度

从以上仿真结果可知, 不管对于地面用户还是空中用户, 利用配置于空中的伪卫星辅助增强的北斗双星系统, 仍然能够提供高精度的定位性能。而且, 其工作方式变为无源定位, 提高了用户使用的安全性, 军事应用价值大大提高。

3 结束语

从仿真结果可以看出, 伪卫星配置在空中可同时满足空中用户与地面用户的应用需求。所以, 在一体化联合作战行动中, 可在高空气球、飞艇、无人机、预警机等平台上配置一颗或多颗伪卫星, 合理规划伪卫星配置高度及位置, 保证战场用户对高精度定位的需求。同时, 在具体应用过程中, 要实时监测伪卫星波束状态, 尽量避免遮掩物对卫星信号的影响。

在保证北斗系统定位精度且不影响其他用户正常使用的前提下, 伪卫星辅助北斗双星区域增强系统在一定区域内实现了用户定位模式由有源定位到无源定位的转变, 提高了军事行动中应用北斗实现高精度定位的安全性。

参考文献:

[1] 袁建平, 罗建军. 卫星导航原理与应用[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2004: 334-336.

[2] 李跃. 导航与定位[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 307-308.

[3] 刘瑞华, 张帆. 伪卫星辅助的“北斗”双星系统无源定位方法[J]. 中国空间科学技术, 2010, 30(4): 52-57.

[4] 戴邵武, 马长里, 廖剑. “北斗一代”导航定位系统分析与研究[J]. 计算机与数字工程, 2010, 38(3): 57-59.

[5] 李超. 北斗系统被动定位技术的精度分析与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

(上接第 22 页)

[5] 张国宣, 韦穗. 虚拟现实中的 LOD 技术[J]. 微机发展, 2001, 11(1): 13-16.

[6] 焦培刚, 周以齐, 王灿运, 等. 基于 Creator 可视化仿真建模优化方法的探讨[J]. 机电产品开发与创新, 2006, 19(2): 86-88.

[7] 童小念, 罗铁祥, 等. MultiGen Creator 建模技术的优化与实现[J]. 计算机系统应用, 2008, 17(2): 94-96.

[8] 孟晓梅, 刘文庆. MultiGen Creator 教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

[9] 周剑勇, 王跃峰. Vega Prime 中 DOF 技术的研究和应用[C]//陈宗海. 系统仿真技术及其应用(第 10 卷): 2008 系统仿真技术及其应用学术会议论文集. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 103-105.

[10] 王锐, 钱学雷. OpenSceneGraph 三维渲染引擎设计与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.