

卫星位置偏差对双星 /GIS 组合定位的影响 及组合定位试验^{*}

郑 冲 吴 杰 周伯昭 袁宴波

(国防科技大学航天与材料工程学院 长沙 410073)

摘 要 建立了双星定位和双星/GIS 组合定位的计算模型. 在此基础上研究了星历误差对双星定位结果的影响, 卫星位置偏差对组合定位结果的影响, 在组合定位中, 在经、纬度方向上, 分别给卫星位置加入均方差为 1° 的位置偏差. 结果表明, 给卫星位置加入均方差为 1° 的经、纬度方向位置偏差, 并不会降低组合定位的精度. 对这一重要结论, 从几何上给出了解释. 最后进行了双星/GIS 组合定位的物理试验. 试验结果表明, 双星/GIS 组合定位确实可以大大提高双星定位的精度.

关键词 卫星导航; GIS; 组合导航; 地球静止卫星

中图法分类号 P 412

Influence of Satellite Departure and Experiment Research on Integrated Positioning With Two Geostationary Satellites and GIS

ZHENG Chong WU Jie ZHOU Bozhao YUAN Yanbo

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract A calculate model is presented in this paper, which is used to study both positioning with two Geostationary satellites and integrated positioning with two Geostationary satellites and geographic Information System (GIS). With the model, how the ephemeris error influence the precision of positioning with two Geostationary satellites and how the position of the satellites influence the integrated positioning when they were added 1° departure in longitude and latitude are studied. The result shows it does not debase the accuracy of the integrated positioning with two Geostationary satellites and geographic information system, to add a small departure on the satellites position. Also, the conclusion is explained by geometry. At the end of the paper, an experiment was done which proved the integrated positioning with two Geostationary satellites and geographic information system can surely improve the precision of positioning with Geostationary satellites.

Key words Satellite navigation, Geographical Information System, Integrated navigation, Geostationary satellite

^{*} 国防预研基金资助项目

2004-07-28 收到原稿, 2005-01-18 收到修定稿

1 引言

全球定位系统 GPS 是当前最先进的卫星导航定位系统. 海湾战争中, GPS 系统为美军及其盟军的胜利发挥了前所未有的重大作用. 目前 GPS 广泛应用于军事及经济建设的各个领域. GPS 技术的应用与发展引起了世界各国的普遍关注, 有实力的大国和地区竞相发展自己的卫星导航系统. 20 世纪 90 年代末, 我国建成了第一代卫星导航系统. 该系统利用两颗地球静止轨道卫星为地面、海上甚至空中用户提供导航定位服务^[2]. 双星定位系统具有卫星数目少, 全天候快速定位等优点, 并具备简单报文通信功能, 但与 GPS 定位相比, 双星定位的精度较低. 文献[3]提出了双星/GIS 组合定位的新方法, 进行了初步的仿真试验和精度分析, 指明了双星/GIS 组合定位可以大大提高双星定位精度. 在此基础上, 本文首先利用仿真试验证明了经、纬度变化 1° 的卫星位置偏差不会降低组合定位的精度, 并在几何上作出了解释. 然后进行了双星/GIS 组合定位的物理试验. 试验结果表明, 双星/GIS 组合定位确实可以大大提高双星定位的精度.

2 双星定位和双星/GIS 组合定位计算模型

双星/GIS 组合定位中影响定位精度的误差源主要有测距误差、星历误差、GIS 误差和大地高程误差等. 测距误差包括地面中心站的测量误差, 卫星和用户收发机信号转发延迟误差, 电离层和对流层传播延迟误差等, 加上适当改正后, 此项误差应较小; 星历误差表现为卫星位置误差; GIS 误差表现为道路已知点坐标的误差; 大地高程误差是地面中心站进行定位时使用的数字地图高程误差^[2].

根据双星定位原理^{[1],[2]}和双星/GIS 组合定位原理^[3]进行仿真试验, 首先仿真出一组距离观测值. 获得距离观测值的方法如下: 设定双星的标准位置用大地坐标表示为 $(80^\circ\text{E}, 0^\circ\text{N}, 3.6 \times 10^7\text{m})$, $(140^\circ\text{E}, 0^\circ\text{N}, 3.6 \times 10^7\text{m})$, 用大地直角坐标表示为 $\mathbf{X}_1(x_1, y_1, z_1)$, $\mathbf{X}_2(x_2, y_2, z_2)$; 设定道路上一已知点 P 的标准坐标 $\mathbf{X}_p(x_p, y_p, z_p)$, 由卫星和 P 点的标准坐标可得点 P 到两卫星的准确距离 L_1, L_2 , 和大地高程 H_p ^[6].

将 L_1, L_2 和 H_p 分别加入随机误差, 得观测值 ρ_1, ρ_2 和 H ,

$$\begin{cases} \rho_1 = L_1 + \varepsilon_1, \\ \rho_2 = L_2 + \varepsilon_2, \\ H = H_p + \varepsilon_p. \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为测距误差, ε_p 为高程误差. 在不考虑随机误差项的情况下, 可得观测方程:

$$\begin{cases} \rho_1 = \sqrt{(x'_1 - x)^2 + (y'_1 - y)^2 + (z'_1 - z)^2}, \\ \rho_2 = \sqrt{(x'_2 - x)^2 + (y'_2 - y)^2 + (z'_2 - z)^2}, \\ H = \frac{z}{\sin B} - (1 - e^2)N. \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$\begin{aligned} x'_1 &= x_1 + \Delta x_1, & y'_1 &= y_1 + \Delta y_1, & z'_1 &= z_1 + \Delta z_1; \\ x'_2 &= x_2 + \Delta x_2, & y'_2 &= y_2 + \Delta y_2, & z'_2 &= z_2 + \Delta z_2. \end{aligned}$$

$(\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1), (\Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2)$ 分别为 1、2 号卫星的星历误差; (x, y, z) 为待定点坐标.

$$\begin{aligned} N &= \frac{a_e}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \\ B &= \arccos \frac{x}{(N + H) \cos L}, & L &= \arctan(y/x). \end{aligned} \quad (3)$$

式中, N 为测站点卯酉圈半径, a_e 为地球参考椭球赤道半径, e 为参考椭球偏心率, B 为 P 点纬度, H 为 P 点大地高. 联立 (2)、(3) 式, 迭代求解待定点坐标 (x, y, z) , 即可得 P 点的双星定位坐标 $\mathbf{X}'_p$.

设两颗卫星的近似坐标为 $\mathbf{X}''_1(x''_1, y''_1, z''_1)$, $\mathbf{X}''_2(x''_2, y''_2, z''_2)$. 由 $\mathbf{X}'_p$ 和 $\mathbf{X}''_1, \mathbf{X}''_2$ 计算距离观测值, 得 ρ'_1, ρ'_2 . 列组合定位距离观测方程

$$\begin{cases} \rho'_1 = \sqrt{(x''_1 - x)^2 + (y''_1 - y)^2 + (z''_1 - z)^2}, \\ \rho'_2 = \sqrt{(x''_2 - x)^2 + (y''_2 - y)^2 + (z''_2 - z)^2}. \end{cases} \quad (4)$$

利用 ρ'_1, ρ'_2 和道路地理信息系统 GIS 进行组合定位即可得 P 点的组合定位坐标 $\mathbf{X}''_p$ ^[3]. $\Delta \mathbf{X}_p = \mathbf{X}''_p - \mathbf{X}_p$ 即为双星/GIS 组合定位误差.

3 卫星坐标有偏差条件下双星/GIS 组合定位

双星定位结果是利用已知卫星位置、测站至卫星的距离及测站点大地高计算出来的^{[1],[2]}. 由此可知, 卫星位置的精度对双星定位结果的精度有着重

要影响. 在不考虑测距误差和大地高程误差的情况下, 卫星位置越准确, 双星定位的精度才会越准确.

图 1 是在不考虑测距误差及高程误差条件下, 卫星各坐标分量分别加入均方差为 2m 的随机误差时, 双星定位均方差随经纬度变化的等值线图. 图 2 是卫星各坐标分量分别加入均方差为 4m 的随机误差时, 双星定位均方差随经纬度变化的等值线图. 定位均方差是 300 次双星定位结果的统计均方差. 计算方法为

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |X_{pk} - X_p|^2}, \quad (5)$$

其中, s 为定位均方差, n 为试验次数, X_{pk} 为定位结果, X_p 为待定点的标准坐标.

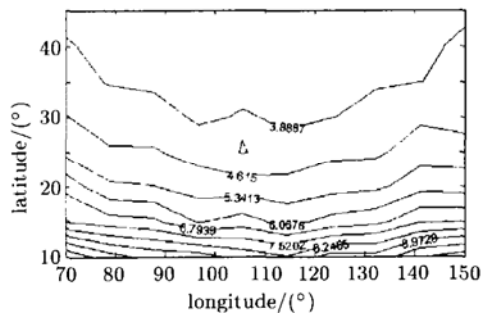


图 1 双星定位均方差随经纬度变化等值线图

Fig.1 Contour of mean square error of positioning with two geosynchronous satellites according as longitude and latitude (unit: m, with 2m ephemeris error)

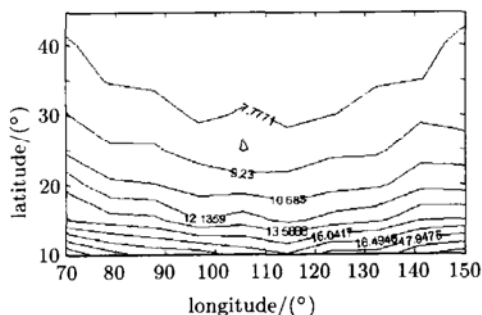


图 2 双星定位均方差随经纬度变化等值线图

Fig.2 Contour of mean square error of positioning with two geosynchronous satellites according as longitude and latitude (unit: m, with 4m ephemeris error)

由图 1 和图 2 可以看出, 对于同一测站而言, 星历误差与其所产生的双星定位误差基本成正比关系. 因此在双星定位中需要尽可能准确的卫星坐标. 下面研究在获得待定点的双星定位坐标后, 双

星/GIS 组合定位所用的卫星坐标与卫星标准坐标的偏差, 对组合定位精度的影响.

为简化起见, 在双星定位中不考虑卫星星历误差和测距误差. 在图 3 中, 设 A 点为道路上一待定的标准点. 以卫星为球心, 且过 A 点的两个球面相交于一条标准大圆弧. 由于高程误差 ΔH 的影响, 双星定位的结果位于标准大圆弧上的 A' 点. 在双星/GIS 组合定位中^[3], 如果卫星位置仍采用其标准坐标, 那么由于道路的约束, 又把 A' 点“拉”回了 A 点, 从而消除了高程误差的影响. 如果卫星位置有偏差, 那么以两卫星为球心, 且过 A' 的球面相交于一条假想的大圆弧, 该圆弧与标准大圆弧不重合, 而是在 A' 相交. 过 A' 的两条大圆弧的切线的夹角 α 就是两条大圆弧的交角. 假想大圆弧与地面相交于 A'' 点. A'' 的位置与交角 α 的大小和方向有关. 当利用有偏差的卫星坐标进行双星/GIS 组合定位时, 道路的约束并不能把 A' 点“拉”回 A 点, 而是把 A' 点“拉”到了地面道路上的另一个点, 偏离了标准点 A , 从而产生了定位误差.

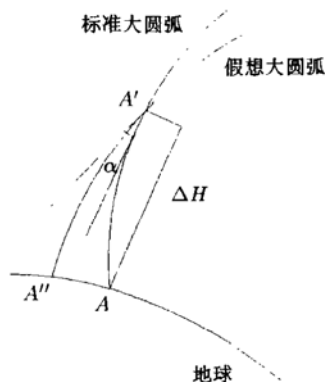


图 3 卫星位置偏差对组合定位精度的影响

Fig.3 Precision of integrated positioning by departure of satellite position

由图 3 可以看出, 组合定位误差与两条大圆弧的夹角 α 以及高程误差 ΔH 有关. ΔH 一定时, 夹角 α 越大, 定位误差也越大; 夹角 α 一定时, ΔH 越大, 定位误差也越大. 夹角 α 的大小、方向与卫星的位置偏差有关. 由于地面点到卫星的距离大于 3.6×10^7 m, 当卫星位置偏差很小时, 假想大圆弧与标准大圆弧会非常接近, 夹角 α 很小, 从而可以忽略卫星位置偏差所带来的组合定位误差. 图 4、图 5 是分别利用卫星的标准位置和假想位置进行组合定位的定位均方差随经纬度变化的等值线图. 在计算待定点的组合定位坐标时, 加入了均方差分别为

2 m 的星历误差、3 m 的测距误差和 4 m 的高程误差。地球静止轨道卫星在地球引力摄动和日月摄动下, 相对于地球的位置并非静止不变的, 而是沿东西方向和南北方向分别有一周期性运动。在有轨道控制的条件下, 卫星在东西方向即经度上的变化幅度一般在 0.01° — 1° , 南北方向即纬度方向上的变化幅度一般在 0.05° 到 1° 之间 [4],[5]。因此在组合定位中给卫星在经、纬度方向分别加入均方差为 1° 的随机偏差, 进行 300 次组合定位, 并由 (5) 式求其定位均方差。

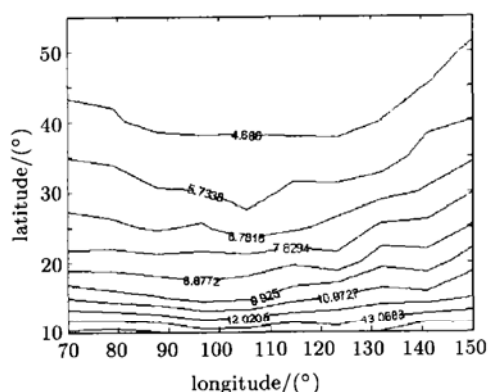


图 4 组合定位均方差随经纬度变化等值线图

Fig.4 Contour of mean square error of positioning with two geosynchronous satellites according as longitude and latitude (unit: m, without departure)

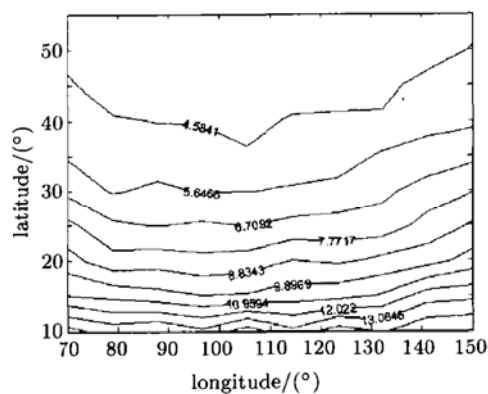


图 5 组合定位均方差随经纬度变化等值线图

Fig.5 Contour of mean square error of positioning with two geosynchronous satellites according as longitude and latitude (unit: m, with 1° random departure in longitude and latitude)

比较图 4 和图 5 可以看出, 给卫星位置加入均方差为 1° 的经纬度偏差并没有降低组合定位的精度, 因此在双星/GIS 组合定位中并不需要卫星的精

确坐标。这在试验当中可以简化系统, 节约成本。

4 双星/GIS 组合定位试验

试验在国防科技大学校园内的一条环形道路上进行, 试验地点的地理位置大约为 (113°E , 28°N)。试验分 3 个步骤完成, (1) 建立道路地理信息系统 (GIS), (2) 进行双星定位, (3) 进行组合定位并分析定位精度。

4.1 道路地理信息系统的建立

组合定位中道路 GIS 的精度高低对定位精度有重要影响, 因此对道路地理信息系统 (GIS) 的精度要求比较高。试验当中利用 GPS 精密相对定位系统, 沿道路中心线测量若干个点的坐标, 然后在这些点之间插值, 得到能够完整表示该条道路的点位坐标数据库。考虑到精密相对定位的基准点坐标在测量过程中存在系统偏差, 因此道路地理信息系统的点位坐标精度为 1 m 的均方差。图 6 是该条道路在基准点处北天东坐标系中的俯视图。图中道路由内外侧边沿和道路中心组成, 道路中心线到道路边沿的距离为 4 m。

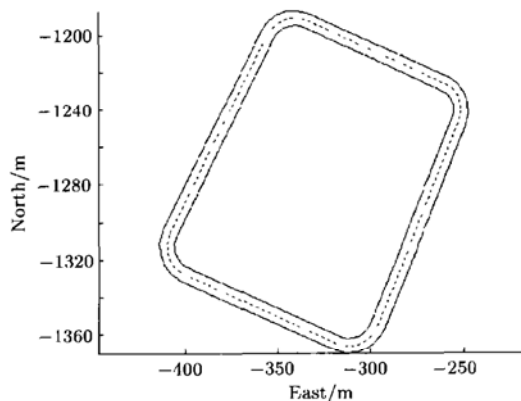


图 6 道路俯视图

Fig.6 Planform of the road

4.2 双星定位数据接收

试验采用双星定位接收机进行双星定位, 并通过计算机串口实时采集双星定位结果。试验数据有动态定位数据和静态定位数据, 动态定位数据的接收是把双星定位接收机天线安放在一辆小汽车的顶部, 汽车沿道路缓慢行驶一周。行驶过程中, 汽车在道路的西、南、东三侧沿中心线, 在北侧距道路中心线 6.2 m。静态定位数据是在道路南侧边沿一个坐标精确已知的点测得, 利用双星定位接收机连续测

量该点坐标. 双星定位接收机每隔 10 s 定位一次, 并把定位结果实时地通过串口发送给计算机, 计算机把接收到的以二进制表示定位结果, 按一定格式转换为十进制并保存到数据文件中.

4.3 组合定位及精度分析

获得双星定位数据后, 分别对静态数据和动态数据进行处理, 并分析定位精度. 组合定位中, 设定两颗卫星的大地坐标为 $(80^\circ\text{E}, 0^\circ\text{N}, 3.6 \times 10^7\text{m})$, $(140^\circ\text{E}, 0^\circ\text{N}, 3.6 \times 10^7\text{m})$.

用双星/GIS 静态组合定位软件对在一已知点上测得的双星定位结果进行处理. 双星定位静态测量结果共有 152 个历元数据, 利用这些数据进行组合定位, 定位结果如图 7 所示. 然后按 (5) 式分别求出双星定位、双星/GIS 组合定位各坐标分量及偏离标准点距离的均方差, 如表 1 所示.

表 1 双星定位、双星/GIS 组合定位精度
Table 1 Precision positioning with two Geostationary satellites and integrated positioning with two Geostationary satellites and GIS

定位形式	σ_x/m	σ_y/m	σ_z/m	σ_d/m
双星定位	4.8644	7.7469	4.3875	9.8321
组合定位	2.2420	1.4542	0.3397	2.5074

由表 1 可以看出, 双星/GIS 组合定位相比于双星定位大大提高了定位的精度. 同样从图 7 中定位结果的散布情况及定位均值相对于标准点位置可以看出, 双星/GIS 组合定位明显提高了定位精度.

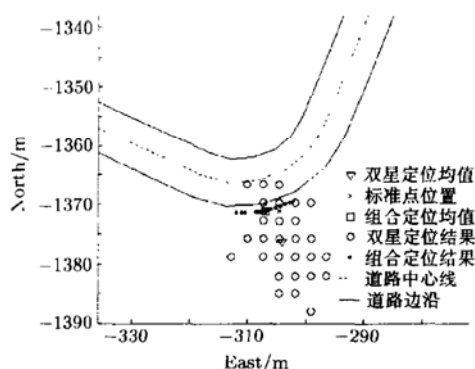


图 7 静态定位结果图
Fig.7 Result of static Positioning

用双星/GIS 动态组合定位软件对沿道路一周测得的动态数据进行处理, 结果如图 8 所示. 从图 8 中可以看出, 组合定位的结果比双星定位结果更符合实际汽车行驶情况.

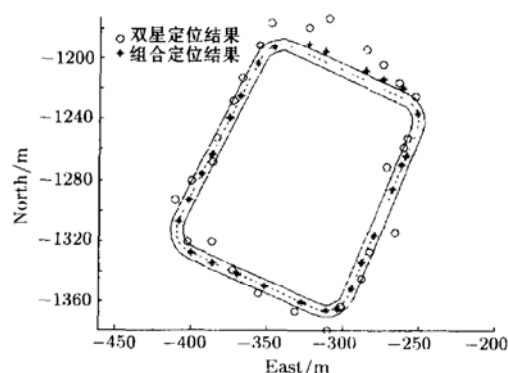


图 8 动态定位结果
Fig.8 Result of dynamic positioning

5 小结

本文首先建立了双星定位和双星/GIS 组合定位计算模型, 进行了 Monte Carlo 仿真试验. 试验结果表明, 卫星位置的偏差对双星定位结果有较大影响, 但对双星/GIS 组合定位结果影响不大. 本文还从几何上论证了这一重要结论, 最后进行了双星/GIS 组合定位的物理试验, 试验结果表明双星/GIS 组合定位确实可以大大提高双星定位精度.

参考文献

- [1] Wang Zhengfan, Hao Yan. Model of positioning by two satellites and test result analysis. *Navigation*, 1991, (1):25-32. in Chinese (王正凡, 郝岩. 双星定位模型及试验结果分析. 导航, 1991, (1):25-32)
- [2] Wu Yanzhong et al. Positioning Using Geosynchronous Satellites. 2nd Edition. Beijing: People's Liberation Army Press, 1992. 54-56. in Chinese (吴延中等. 地球同步卫星定位. 第 2 版, 北京: 解放军出版社, 1992. 54-56)
- [3] Zheng Chong et al. Modelling and simulation of integrated positioning with double satellite and GIS. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, 23(3):212-217. in Chinese (郑冲等. 双星/GIS 组合定位建模与仿真. 空间科学学报, 2003, 23(3):212-217)
- [4] Zhang Renwei. Orbit and Attitude Control of Geostationary Satellites. Beijing: Science Press, 1987. 67-133. in Chinese (章仁为. 静止卫星的轨道和姿态控制. 北京: 科学出版社, 1987. 67-133)
- [5] Wang Zhengcai et al. Geostationary Orbit Manual. Beijing: National Industry Press, 1999. 125-181. in Chinese (王正才等. 地球静止轨道手册. 北京: 国防工业出版社, 1999. 125-181)
- [6] Zhang Shouxin. Theory and Application of Positioning and Survey Using GPS Satellites. Changsha: National University of Defence Technology Press, 1996. 262-264. in Chinese (张守信. GPS 卫星测量定位理论与应用. 长沙: 国防科技大学出版社, 1996. 262-264)