

双星/GIS 组合定位建模与仿真

郑 冲 吴 杰 蒋勤学

(国防科技大学航天与材料工程学院 长沙 410073)

摘 要

双星定位系统具有快速高精度定位和简短报文通信的功能. 为了进一步提高定位精度, 满足特殊用户需要, 文中提出了由双星和道路地理信息系统组合定位的新方法, 并做了计算机仿真试验, 进行了组合定位精度分析. 分析结果表明, 该方法可明显提高双星定位精度, 在适当条件下组合定位均方差小于 10 m.

关键词 卫星导航; GIS; 组合导航

1 引言

利用两颗地球静止同步轨道卫星可以组成双星定位系统, 在地面、海上、甚至空中为用户提供导航定位服务^[1]. 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. 20 世纪 80 年代末, 我国对双星系统的定位和通信原理进行了卓有成效的试验研究^[2]. 90 年代末, 又进行了双星定向的试验研究^{[3],[4]}, 此项研究极大地扩大了双星定位系统的应用范围. 在上述研究工作的基础上本文提出双星定位系统和道路地理信息系统 GIS 组合定位的新方法以提高定位精度. 文中就定位精度受地理位置及道路走向的影响进行了仿真试验和精度分析. 分析结果表明, 应用双星/GIS 组合定位方法进行定位, 在测距均方差为 3 m, 卫星各坐标分量均方差为 2 m, 道路点各坐标分量均方差为 1 m 等假设条件下, 在我国及周边地区组合定位均方差小于 10 m. 由此表明, 双星/GIS 组合定位方法在适当条件下将明显提高双星定位精度, 从而可以进一步扩大双星导航系统的应用范围. 另外, 汽车、火车等用户载体通常沿道路、铁路运动, 所以双星/GIS 组合定位方法具有较强的实用性.

2 双星定位的基本原理

地面中心站测量由用户到两颗卫星的距离 ρ_1, ρ_2 可得出观测方程如下:

$$\begin{cases} \rho_1 = |\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}| + \varepsilon_1, \\ \rho_2 = |\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}| + \varepsilon_2. \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$ 为卫星 1,2 的坐标矢量, 下标 1,2 分别表示卫星 1 和卫星 2, $\mathbf{X}$ 为用户坐标矢量, ε 为测量误差. 此外, 地面中心站利用数字化地图快速查取用户的大地高程 H ,

$$H = f(\mathbf{X}). \quad (2)$$

2002-08-16 收到原稿, 2003-03-12 收到修定稿

其中, $f(\mathbf{X})$ 表示由大地直角坐标 $\mathbf{X}$ 计算大地高程的函数^[1]. 联立方程 (1)、(2) 即可求解用户的坐标^{[1],[2]}. 图 1 为测量用户到卫星距离的示意图, 图中 s 为地面中心站到卫星的距离, ρ 为用户到卫星的距离. 以上即为双星定位的基本原理.

双星定位系统的定位精度, 不能满足某些特殊用户的精密定位的要求. 为此, 必须寻求其他方法解决这一问题. 鉴于道路地理信息系统有高精度的点位信息, 本文提出采用道路 GIS 与双星组合的方法进行组合定位.

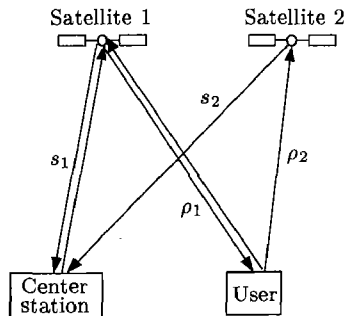


图 1 距离测量示意图

Fig.1 Distances measuring

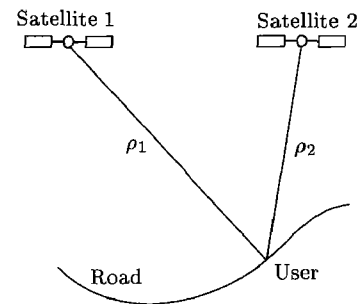


图 2 组合定位示意图

Fig.2 Integrated positioning

3 双星/GIS 组合定位基本原理

如图 2 所示, 道路可由道路地理信息系统 GIS 来描述. 用户天线位于道路上某点处 (未知). 观测用户天线距两颗卫星的距离得观测方程式 (1). 定义

$$\Delta F \triangleq (\varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_2)^2.$$

如果在道路上寻求一点 P , 使其满足 ΔF 为最小, 则 P 点即为用户天线的位置. 这就是双星/GIS 组合定位的基本原理*. 若已知某条道路上某些点的精确坐标存储在道路 GIS 中, 从中选取 $P_0, P_1, P_2, \dots, P_n$ 共 $n+1$ 个点来描述该条道路, 其中 P_i 点三维空间的坐标为 $\mathbf{X}_i, i=0, 1, 2, \dots, n$, 并假设用户天线即在 P_0 至 P_n 的这段道路上. 把道路上的 $n+1$ 个点坐标分别代入观测方程式 (1), 并计算每一个点的 ΔF 值, 选出使 ΔF 最小的点 P_i , 然后在线段 $P_{i-1}P_i$ 和线段 P_iP_{i+1} 上搜索 (假设线段与真实的道路较为吻合), 求得 P 点, 使得 ΔF 最小, P 点即为用户天线的位置.

实际应用中需要考虑到天线不在道路中央的情况, 如图 3 所示. 图中 d 为测架到路中央的水平距离, h 为架高. θ 为用户天线到道路中心线的垂线的方位角. 在搜索 P 点位置之前, 先把道路上各点坐标平移, 得到一条“虚拟道路”, 使天线位于该虚拟道路中央. 在测站北天东坐标系中平移后的虚拟点坐标 (x'_i, y'_i, z'_i) 与原道路点坐标 (x_i, y_i, z_i) 的转换

* 郑冲, 吴杰. 双星/GIS 快速定位定向技术研究. 国防科大首届研究生学术活动周论文集. 长沙: 国防科技大学研究生院 2001. 34—38

关系如公式 (3) 所示.

$$\begin{cases} x'_i = x_i + d \cos \theta, \\ y'_i = y_i + h, \\ z'_i = z_i + d \sin \theta. \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

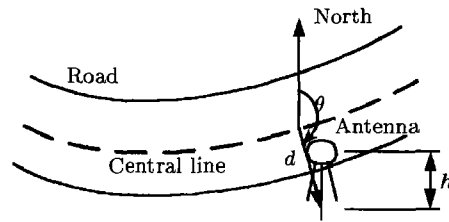
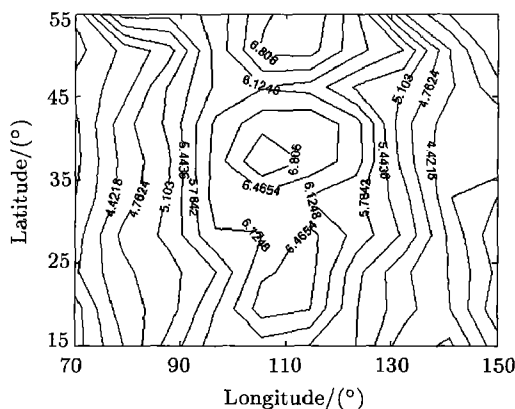


图 3 天线与道路中心线的几何关系

Fig.3 Geometrical relationship between the antenna and the central line of the road

4 组合定位精度分析

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, 此项误差应为较小的值; 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. 本文在仿真试验与定位精度分析中, 假设测距均方差为 3 m, 卫星坐标各分量均方差为 2 m, 道路点坐标各分量均方差为 1 m. 另外, 设两颗地球静止同步轨道卫星的经度分别为 90°E 和 130°E. 对双星/GIS 组合



定位进行 Monte Carlo 计算机仿真试验, 分析不同地理位置、不同道路方向、不同道路坡度对组合定位精度的影响。

设待定点 P 坐标真值为 (X, Y, Z) , 仿真定位结果为 (X', Y', Z') . 定义

$$\Delta \triangleq \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2 + (Z - Z')^2},$$

称 Δ 为定位误差. Monte Carlo 仿真定位 100 次, 取 Δ 平方平均值开根号作为 P 点定位均方差。

(1) 道路为水平东西向时, 组合定位精度受经纬度的影响如图 4 所示. 由图 4 可以看出在我国及周边地区组合定位精度优于 7 m. 从 110°E 向两侧精度有升高的趋势, 组合定位精度受纬度的影响不大。

(2) 道路为水平南北向时, 定位精度受地理经纬度的影响如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 定位均方差受经度影响不大, 但随纬度的升高而减小. 组合定位的精度优于 10 m.

(3) 用户位于 110°E , 40°N 处时组合定位精度受道路坡度及方位角影响的情况如图 6 所示. 可以看出, 当道路由南向北且为最大上坡 (方位角为 0° 、坡度为 30°) 时, 或道路由北向南且为最大下坡 (方位角为 180° 、坡度为 -30°) 时, 定位精度最差。

以上结论是在测距均方差恒定的基础上得出的. 但是测距精度实际上会随地理位置的不同而变化. 因此, 双星/GIS 组合定位的实际精度变化规律与上述结论将有所不同。

综合以上情况可以看出, 双星/GIS 组合定位在提高定位精度上是可行的, 可以满足某些特殊用户较高定位精度的需求, 从而扩大我国双星定位系统的应用范围。

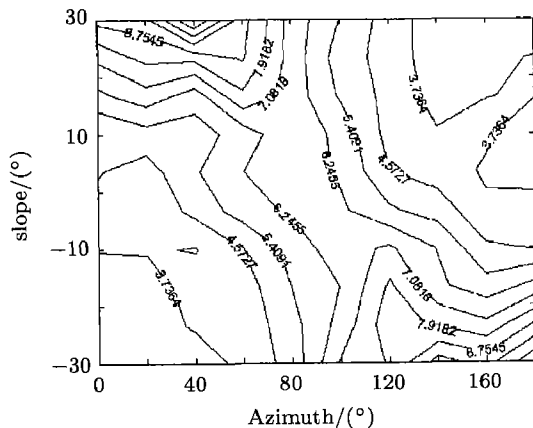


图 6 定位均方差随道路变化等值线图 (单位: m)
Fig.6 Isolines of positioning mean square error according as azimuth and slope (Unit: m)

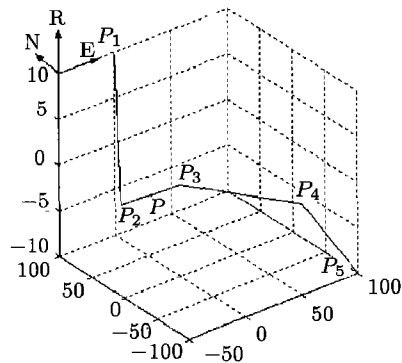


图 7 模拟道路示意图 (单位: m)
Fig.7 Simulated road (Unit: m)

5 组合定位仿真试验及结果分析

如图 7 构造一条道路, 其上有 5 个已知点. 在 P_3 点处建立当地北天东坐标系, P_3 为坐标系的原点, 5 点坐标分别为 (单位: m): $P_1(100, 10, 0)$, $P_2(50, 0, -50)$, $P_3(0, 0, 0)$, $P_4(-100, 0, 50)$, $P_5(-100, -10, 100)$. 组合定位中所用的 GIS 为大地直角坐标系中的坐标,

所以必须把上述点坐标转换到大地直角坐标系中. 测站在道路上 $P(20, 0, -20)$ 点, 即在 P_2P_3 这条线段上. 为检验组合定位算法的准确性和可靠性, 对测站至两颗卫星的距离、表述道路的 GIS 点坐标、卫星的位置各加不同大小的随机误差. 随机误差分别服从正态分布 $N(0, 9)$ 、 $N(0, 1)$ 、 $N(0, 4)$. 其中, $N(\mu, \sigma^2)$ 表示均值为 μ , 方差为 σ^2 的正态分布. 设 P 点在道路中央, 改变道路所处的地理位置进行仿真试验, 对 P 点定位 100 次, 然后求定位均方差. 表 1 中给出了部分计算结果.

表 1 部分不同地理位置的定位均方差

Table 1 Positioning mean square error of different places

经度 / ($^{\circ}$)	纬度 / ($^{\circ}$)	定位均方差 / m
75	30	4.65
75	40	4.24
75	50	3.72
95	30	5.29
95	40	4.74
95	50	4.16
115	20	8.37
115	30	6.85
115	40	5.60
115	50	4.84
135	30	8.19
135	40	6.89
135	50	5.75

仿真试验结果表明, 本文提出的组合定位方法及相应软件是正确可行的. 从上表可以看出, 利用双星/GIS 组合定位在适当条件下可以显著提高双星定位精度, 其精度可优于 10 m.

6 小结

本文提出了双星定位系统和道路地理信息系统 GIS 组合定位的新方法, 以提高双星定位精度, 并对组合定位精度受地理位置及道路走向的影响进行了仿真试验和精度分析. 仿真结果表明, 应用双星/GIS 组合定位方法进行定位以提高定位精度, 在原理上是可行的. 在适当条件下双星/GIS 组合定位精度优于 10 m, 可以满足某些特殊用户的较高定位精度需求, 因此, 双星/GIS 组合定位技术具有较大的研究和应用价值.

参 考 文 献

- [1] Wu Yanzhong, Li Guiqi. Positioning Using Geosynchronous Satellites. 2nd Edition. Beijing: People's Liberation Army Press, 1992. 54—56. in Chinese (吴延中, 李贵琦. 地球同步卫星定位, 第 2 版, 北京: 解放军出版社, 1992. 54—56)
- [2] 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)

- [3] Wu Jie *et al.* Attitude determination using two satellites: modeling and simulation. *Chin. J. Space Sci.*, 1999, **19**(2):154—159. in Chinese (吴杰等. 双星定姿的建模与仿真. 空间科学学报, 1999, **19**(2):154—159)
- [4] Zheng Wei *et al.* An experiment research on technique of attitude determination with double satellites. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**(3):257—261. in Chinese (郑伟等. 双星定姿技术试验研究. 空间科学学报, 2000, **20**(3):257—261)

MODELING AND SIMULATION OF INTEGRATED POSITIONING WITH DOUBLE SATELLITE AND GIS

ZHENG Chong WU Jie JIANG Qingxue

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

Abstract

Local positioning system with only two Geosynchronous satellites can provide not only positioning but also telegram service. In 80 s of 20th century positioning test with two satellites was successfully conducted. In 90 s of 20th century attitude determination using two satellites was also accomplished. A new method of positioning using double satellites and geographic information system (GIS) is presented in this paper. The principle of the method is discussed, and the computer simulation is accomplished. The precision analysis of integrated positioning indicates that the method can improve the positioning precision remarkably. In certain condition, the mean square error can be less than 10 meters.

Key words Satellite navigation, GIS, Integrated navigation