doi:10.11887/j.cn.201405028 http://journal.nudt.edu.cn

合作定位节点选择策略*

常 强,侯洪涛,李 群,王维平
(国防科技大学 信息系统与管理学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:合作定位是指接收机之间通过合作网络交换关键定位信息实现协同定位的新技术,接收机进行合作定位过程中可供使用的辅助节点包括可视卫星和已定位邻居接收机。接收机之间的合作增加定位过程中的可用辅助节点数量,进而增加位置估计的计算量和计算时间,在可用辅助节点较多时,定位实时性很难得到保证。提出改进次优节点选择算法,计算备选节点之间单位向量差作为节点价值,选择拥有最大价值的节点作为辅助节点。将新算法与4种典型的节点选择算法进行了对比,仿真实验证明该算法能够在较短时间内选择出接近最优算法得到的组合,综合性能优于现有节点选择算法。

关键词:合作定位;节点选择;位置精度因子;价值函数
中图分类号:TP39 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)05-168-06

Node selection algorithm in cooperative positioning

CHANG Qiang, HOU Hongtao, LI Qun, WANG Weiping
(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Cooperative positioning refers to a new positioning technique that receivers share critical positioning information with each other by communication system so as to achieve relative localization. The receivers estimated their position with available secondary nodes which included the localized neighbor receivers and the visible satellites. The cooperation of receivers resulted in the increasing of the available secondary nodes for position estimation, so the calculated amount and the computing time were increased. With the increasing of available secondary nodes, the receivers may fail to estimate their position in real-time. A new node selection algorithm called improved quasi-optimal node selection algorithm was proposed. The nodes to be selected obtained an importance value by calculating the unit vector differences between nodes, and the ones with the maximum importance value were selected as the secondary nodes in each iterate. The new algorithm was compared with four typical node selection algorithms. Simulation result shows that the nodes selected by the proposed algorithm are very close to the ones selected by the optimal algorithm, but the former algorithm costs less time. And the comprehensive performance of the new algorithm is better than the typical node selection algorithm.

Key words: cooperative positioning; node selection; position dilution of precision; value function

随着移动互联网时代的到来,基于位置的服务(Location Based Service,LBS)的兴起对定位提出了很高的要求——随时随地快速获取高精度的位置信息。但目前广泛使用的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)定位、基站定位、无线传感网络(Wireless Sensor Network, WSN)定位以及辅助GNSS(Assisted GNSS,AGNSS)定位都难以单独满足LBS用户的定位需求。研究人员提出了一种结合GNSS和WSN定位优点的新技术——混合对等合作定位(Peer-to-Peer Hybrid Cooperative Positioning, P2P-HCP)[1],这种技术能在室内提供与WSN相当的定位性能,在室外能够达到AGNSS的定位精度。采用这种技术的GNSS接收机节点(下文简称节点)之间利用相关设备组成测距系统和通信链路,测距系统用于测量合作节点相互之间的距离,通信链路用于共享定位关键信息,包括合作端位置、卫星捕获辅助信息以及可视卫星信息等。所有合作节点都是按照非结构化的方式与邻近节点共享数据,并按照分布式算法进行合作与计算。由于不需要建设和维护相应的基础设施,用户也不需要支付额外费用,因此混合对等合作定位(下文简称合作定位)拥有其他几类定位技术所不具备的优点,具有较好的发展前景。

由于合作网络的构建以及节点位置信息的共享,用于辅助节点进行定位的节点数目将会增多,

* **收稿日期**:2014-03-01
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61074107, 60974074)
作者简介:常强(1985—),男,云南昆明人,博士研究生,E-mail:cq.nudt@gmail.com;
王维平(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:wang.wp2010@gmail.com

这些节点包括可视范围内的卫星和已定位的邻居接收机。若使用全部节点进行位置估计,将耗费大量的计算时间,实时性难以得到保证;且辅助节点中误差较大的节点会影响定位精度。如果仅使用卫星或者已定位接收机进行位置估计,可定位节点比例将大大下降;因此,在进行合作定位过程中,合适的辅助节点选择算法既能缩短定位时间,又能提高定位精度和定位比例。用户在进行室内定位过程中一般使用的是便携式设备,例如手机、平板电脑等,这些设备电量都有限,合作定位过程中,测距、通信、计算与 GNSS 定位都会需要消耗电量[2]。若使用所有节点进行位置估计,将增加计算过程中的电量消耗;使用复杂的选择算法也将消耗额外的电量。因此需要一种计算简单的节点选择算法,能够快速从卫星与已定位邻居中选择出较优的节点集合辅助定位。

1　研究现状

目前合作定位的研究主要集中在数据融合算法上,尚无节点选择方面研究,本节主要综述 GNSS 和 WSN 定位中的节点选择研究现状。

主要有两种卫星选择策略:最优选择策略和模糊选择策略。

最优选择算法通过计算辅助节点的位置精度因子(Position Dilution Of Precision, PDOP)选择卫星组。其中 PDOP 可以衡量导航卫星的几何分布对定位误差的影响,PDOP 值越小越好,PDOP 的计算方法如下:

$$PDOP = \sqrt{\mathrm{Trace}\left[(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H})^{-1} \right]} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{H} = \left[los_1\ los_2 \cdots\ los_n \right]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

其中,$\boldsymbol{H}$ 是测量矩阵,n 表示所选择的节点个数,los_n表示接收机对卫星的观测向量。最优算法通过搜索可视卫星的所有可能组合,计算每种组合的 PDOP 值,选择最小值对应的组合作为最终的卫星组合,因此是一种时间和计算消耗都非常大的算法。研究人员提出各种简化方法,包括加快 PDOP 计算过程和减小搜索空间。Kihara 等[3]发现 PDOP 值大小和 4 颗卫星构成的四面体体积成反比,因此认为选择使得几何体体积最大的节点组合,得到的 PDOP 值将较小;但是 Zhang 等[4]证明利用体积简化 PDOP 计算的方法只适用于选择 4 颗卫星,若要选择 4 颗以上卫星,体积与 PDOP 并没有一致单调性。Phatak 等[5]利用矩阵求逆相关定理对计算 PDOP 过程中的求逆进行了简化,得到较好的结果,但是这种算法需要对全空间进行搜索,计算量较大。Saraf 等[6]和 Mosavi 等[7]采用神经网络算法计算几何精度因子(Geometric Dilution Of Precision, GDOP)值都取得较好的效果,这些算法仍旧在全空间搜索,在可视卫星较多时,实时性较差。

模糊选择策略是指采用某种算法为每颗卫星赋权,选择权重较大的卫星作为最终组合。Park[8]提出次优卫星选择策略(Quasi-optimal satellite selection algorithm),即使用一种称为费用函数的指标衡量节点好坏,通过不断删除费用值较大的卫星得到最终组合,这种算法能够得到与最优算法几乎相同的卫星组合,同时计算负载较小。Wei 等对次优选择策略进行了改进[9],通过计算卫星两两之间夹角的余弦值和卫星仰角大小不断移除“冗余”的卫星直到剩余所需数目的卫星为止,但是这种算法计算量比较大。

WSN 定位研究中也涉及节点选择,Costa 等[10]根据锚节点(已知位置的节点)误差和距离选择辅助节点集合。Olson 等[11]将异常位置的节点从辅助集合中排除从而得到辅助节点集合。Priyantha 等的 Cricket 系统对比了 3 种节点选择算法,分别是最强信号法,最小距离法和平均最小距离法,前两种比较简单,但是性能不太理想,最后一种所需的计算量较大[12]。Sinha 等[13]通过建立位置估计误差模型,得出节点选择策略,使用所选择出的辅助节点集合进行位置估计,将降低定位误差。Lieckfeldt 等[14]通过排除一些对定位精度影响不大的节点作为辅助节点显著减少了通信负载,采用 CRLB(Cramer-Rao Lower Bound)衡量定位结果。

2　节点选择算法

2.1　节点选择问题形式化

GNSS 合作定位中的地面节点装配有通信模块、GNSS 接收机和测距设备;每个节点通过 GNSS 接收机接收 GNSS 卫星定位信号,通过通信模块交换定位信息,互相辅助定位,过程如图 1 所示。

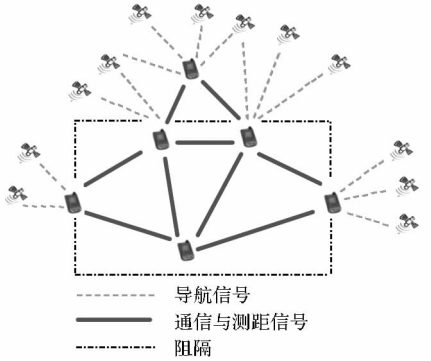


图 1　合作定位示意图

Fig. 1　Cooperative positioning

使用 t_k 表示第 k 个时间点对应的时刻,地面节点 m 在任意时刻 t_k 可视卫星和通信范围内已定位邻居节点集合为 $N_m^{(k)}$,经过 $t_m^{(k)}$ 时间选择出辅助节点集合 $S_m^{(k)}$,$PDOP_m^{(k)}$ 表示集合 $S_m^{(k)}$ 对应的 PDOP 值,采用集合 $S_m^{(k)}$ 估计出的位置为 $P_m^{(k)}$,$P_m^{(k)} = [x_m^{(k)}, y_m^{(k)}, z_m^{(k)}]^{\mathrm{T}}$,各个分量分别是 ECEF (Earth Center Earth Fixed) 坐标系坐标值。位置估计的误差方差是 $\delta_m^{(k)}$,指采用加权最小二乘法估计位置时得到的协方差。

三维定位需要 4 个辅助节点才能解算出节点位置,因此节点的已定位邻居和可视卫星总数必须超过 4 个。本文使用的位置估计算法是加权最小二乘法,权重为辅助节点位置估计的误差方差的倒数。采用这种算法对位置进行估计的时候,辅助节点误差越大,对结果起的作用越小,因此能够有效屏蔽误差较大节点对定位结果的不利影响。

2.2 算法细节

Park[8] 在研究卫星选择过程中提出不通过直接计算 PDOP 的次优卫星选择算法,所得到的卫星集合对应的 PDOP 值接近最优 PDOP 值。本文借鉴该算法,采用 PDOP 作为衡量指标,提出新的节点选择算法。

次优卫星选择算法首先定义任意 2 颗卫星之间的费用值,见式(3)。

$$J_{ij} = \cos 2\theta_{ij} \tag{3}$$

θ_{ij} 表示卫星 i 和 j 观测向量之间的夹角。从该余弦函数几何意义可以看出,2 颗卫星之间夹角为 0°以及正负 180°取得最大值,也就是 2 颗卫星与接收机同时处于一条直线上时,其费用最大;两卫星夹角为 90°时费用最小,也就是 2 颗卫星与用户构成一个直角三角形时费用最小。将某颗卫星与其他所有可视卫星的费用相加作为该卫星总费用:

$$J_i = \sum_{j=1}^{N} \cos 2\theta_{ij} \tag{4}$$

每一步删除一颗费用最大的卫星,直到剩下指定数目的卫星用于辅助接收机进行位置估计。从费用函数的几何意义可以看出,该算法能够有效剔除相互之间夹角很小的卫星,剩下的卫星具有较好的几何分布,相关仿真实验以及本文后续仿真结果表明,该算法选择出来的卫星组合对应的 PDOP 非常接近最优组合的值,是比较好的不通过计算 PDOP 就能选择出较优卫星组合的算法。

为了进一步减小计算时间,降低计算复杂度,本文从费用函数入手,提出价值函数:

$$J_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \tag{5}$$

其中,i 代表任意待入选的节点,j 代表已入选节点,x, y, z 分别是辅助节点与被辅助节点之间单位向量的各个分量值。图 2 给出了 2 个单位向量不同夹角对应的价值变化曲线:

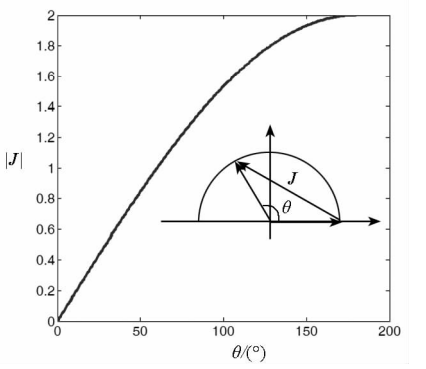


图 2 价值函数

Fig. 2 Value function

从图 2 中可以看出,2 个节点之间夹角越大,其价值也就越大。

每个辅助节点的总价值定义为它与所有已入选节点价值的和,由于入选节点的定位误差会影响最终定位精度,因此为每个节点价值赋予权重,权值是节点定位误差的倒数,当节点误差越大,其价值越小,越不容易被选中,从而保证了定位精度,见式(6)。

$$J_i^w = w_i \sum_{j=1, j\neq i}^{S} J_{ij} \tag{6}$$

其中 s 表示所有已入选节点数目,w_i 表示节点定位误差的倒数。通过计算所有节点之间的价值函数,选择价值最大节点作为第一个选中的节点。之后,每一步迭代,均从所有节点中选出一颗价值最大的加入辅助节点集合,由于夹角越大价值函数越大,其总价值也就越大,因此选出的节点之间夹角都较大,节点较为分散,对应的 PDOP 也较小。步骤见算法 1。

算法 1:改进次优节点选择算法

Alg. 1 Improve Suboptimal node selection algorithm

0:$k=1$, Initialize N, s, m

1: Initialize$N_m^{(k)}, P_i^{(k)}, i \subset N_m^{(k)} S_m^{(k)} = \phi$

2:Select the first node $S_{m,1}^{(k)}$:

1):Calculate $J_{i,k}^w$ with Exp. (6), $i \subset N_m^{(k)}$

2) $J_{mi}^{(k)} = \max_i (J_{1,k}^w, J_{2,k}^w, \cdots, J_{|N_m^{(k)}|,k}^w)$

3) $S_{m,1}^{(k)} = S_{mi}^{(k)} \in N_m^{(k)}$,

delete $S_{mi}^{(k)}$ from $N_m^{(k)}$ add $S_{m,1}^{(k)}$ to $\widehat{S}_m^{(k)}$

3:For $i = 1$ to $s-1$ // Select the rest nodes

1) Calculate $J_{i,k}^{w}$ using(6), $i \subset N_m^{(k)}$, $j \subset S_m^{(k)}$

2) $J_{mi}^{(k)} = \max_i(J_1, J_2, \cdots, J_{|N_m^{(k)}|})$

3) $S_{m,j+1}^{(k)} = S_{mi}^{(k)} \in N_m^{(k)}$, add $S_{m,j+1}^{(k)}$ to $S_m^{(k)}$

delete $S_{mi}^{(k)}$ from $N_m^{(k)}$

4:End for

5: estimate $P_m^{(k)}$ with $S_m^{(k)}$

6:$k = k+1$, back to 1.

3　仿真实验与结果分析

本文将所构造的算法与 4 种典型的节点选择算法通过仿真进行对比,这 4 种算法分别是最优选择算法、最近节点选择算法、最远节点选择算法和随机选择算法。

最优选择算法(简称最优算法)是指选择使得 PDOP 值最小的组合作为最优组合,为了得到最优组合,算法将尝试所有节点组合。最近/远节点选择算法(简称最近/远算法)每次选择距离被辅助节点最近/远的节点作为辅助节点。随机选择算法(简称随机算法)则是完全随机地进行选择。

仿真范围设置在一个边长为 100m 的立方体内。在仿真区域内,均匀分布着 200 个节点,其中有 10% 的节点能够接收到 4 颗或者 4 颗以上的模拟 GPS 卫星信号[15],其余节点只能收到 4 颗以下的卫星信号,所有类型节点均是均匀分布的。对于能够收到 4 颗或 4 颗以上卫星的节点,无需其他节点辅助就能够实现定位,其他节点则需要通过合作实现定位。所有节点测距和通信半径均为 20m,为了实现三维位置估计,每个节点选择 4 颗已定位的邻居节点或者(和)可视卫星辅助定位。采用稳态仿真策略,仿真次数为 100 次。

每次仿真,都对同一种节点分布构型采用 5 种不同节点选择策略进行仿真实验,不同算法之间对比的指标包括定位误差、PDOP 值以及定位时间,3 个指标都是越小越好。

图 3 给出的是选择不同辅助节点个数,定位比例随着时间推进的变化情况。从图中可以看出,由于节点之间的合作,整个网络节点定位比例均有提高,其中,选择 4 个节点提高较大,选择 5 个以及 5 个以上的节点提高较小,后续仿真均选择 4 个节点作为辅助定位节点。

下面的分析将节点分为两组,第一组是原本能够通过 GNSS 设备自行定位的节点,称为组 A,剩下的节点称为组 B。分组原因是 2 组数据初始条件不同,分别进行数据分析更能体现不同类型节点的定位性能变化情况,有利于对比不同算法性能。图 4 给出的是不同类型节点 PDOP 均值随着时间变化趋势。

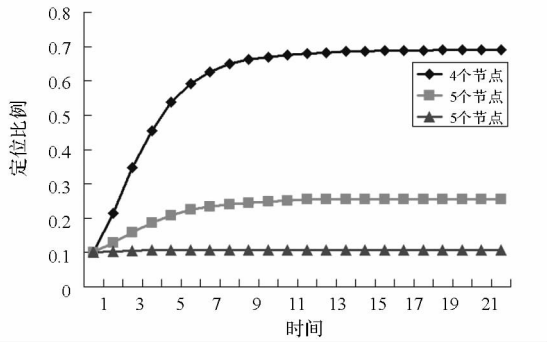
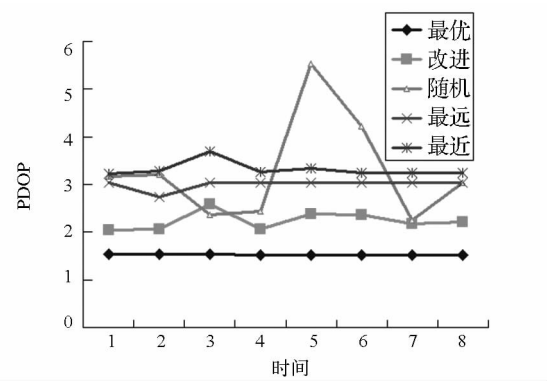
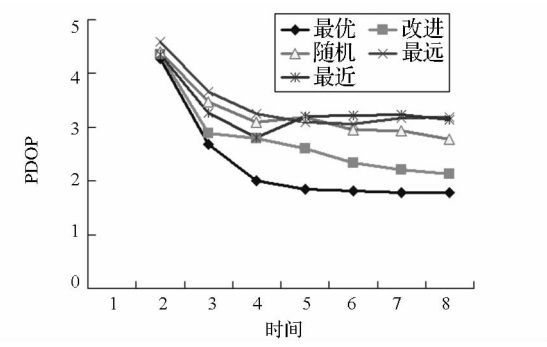


图 3　定位比例曲线

Fig. 3　Localized node proportion



(a)类型 A



(b)类型 B

图 4　PDOP 对比图

Fig. 4　Comparison of PDOP

从图 4 可以看出,对于 A 类节点来说,PDOP 值没有明显下降趋势,改进算法的 PDOP 仅次于最优算法,最远/最近算法的 PDOP 值接近,随机算法变化比较大;对于 B 类节点来说,节点之间的合作使得很多原本无法自行定位的节点能够实现定位,改进算法和最优算法的 PDOP 有不断降低的趋势,表明其定位性能得到不断改善,而最远/最近和随机算法很快趋于稳定,PDOP 值均高于前两种算法。

下面从节点实现定位所使用的时间角度对

比,表1和表2是定位耗时对比,单位是ns:

表1 A类节点不同算法定位耗时

Tab. 1 Time cost of node type A (ns)

t	最优	改进	随机	最远	最近
1	7 781 171	18 346	15 296	17 587	17 587
2	8 718 482	17 993	5894	8227	8227
3	2 053 903	15 421	5587	7431	7431
4	2 613 967	15 560	4483	4155	4205
5	2 924 004	15 407	4008	4092	4092
6	3 023 222	17 439	3869	3380	3380
7	2 968 845	16 957	3673	3603	3603
8	29 688 452	16 957	3673	3603	3603

表2 B类节点不同算法定位耗时

Tab. 2 Time cost of node type B (ns)

t	最优	改进	随机	最远	最近
1	–	–	–	–	–
2	20 071	4684	5114	3019	3019
3	113 417	4934	3512	2821	2821
4	1 102 297	5634	3065	3171	3171
5	1 610 352	5970	2954	3324	3324
6	1 794 923	6368	3108	2955	2955
7	1 767 291	7196	3172	3067	3067
8	1 727 451	7319	3153	3133	3133

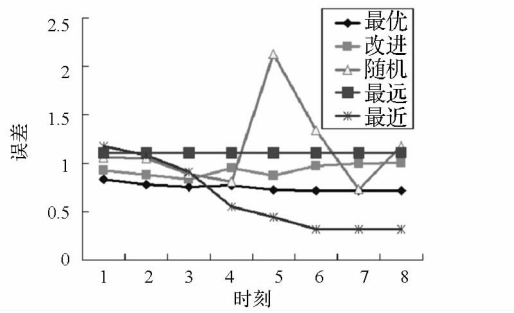
从表中可以看出,无论是A类节点还是B类节点,最优算法定位耗时远远高于其他算法,原因在于最优算法需要搜索所有可能的组合才能确定最小PDOP对应的节点组合。对于A类节点,由于可选节点较多,因此定位耗时达到其他3种算法的3~6倍;B类节点由于可选节点不多,因此时间差异不大。

图5给出了不同算法的定位误差对比曲线。可以看出,对于A类节点来说,最近算法定位误差最小,随机算法性能不稳定,其他算法性能稳定;对于B类节点来说,最优、最远、改进算法定位误差具有相似的减小趋势,且相差不大,其他算法性能不稳定。

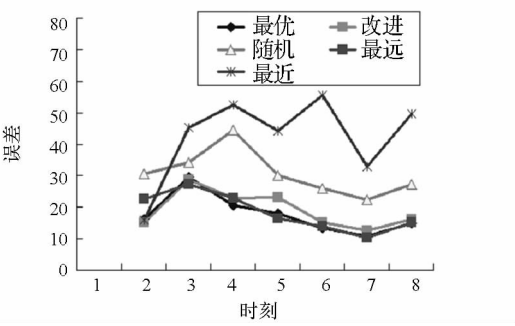
从上述仿真结果可以看出,最优算法虽然在PDOP、定位误差上均取得最好的结果,但是计算时间也非常长,超过其他算法2个数量级,改进算法在PDOP与定位误差上仅次于最优算法,定位时间略高于随机、最远、最近算法。剩下的3种算法虽然耗时较少,但是性能得不到保证。

4 结论

合作定位是一种新的室内定位技术,不需要提前设置锚节点,不用提前勘测地形,能够通过用户接收机节点之间的测距与通信,动态构建分布式的合作定位网络,定位性能能够达到或者超过AGNSS和WSN定位。本文研究了合作定位过程中选择辅助节点的问题,采用PDOP作为衡量指标,通过解算辅助节点之间向量差作为节点价值,选择拥有最大价值的节点作为辅助节点,能够在较短时间内选择出接近最优PDOP的节点组合。通过仿真与其他4种算法进行了对比,结果显示,本文提出的算法能够在计算时间与定位精度之间取得较好平衡。虽然本文主要针对节点均匀分布情况进行了仿真,但是结论对于一般情况仍是有效的。



(a) 类型A



(b) 类型B

图5 定位误差对比图

Fig. 5 Comparison of location error

参考文献(References)

[1] Garello R, Corazza G E, Samson J. Peer-to-peer cooperative positioning part two: hybrid device with GNSS & terrestrial ranging capability[J]. Inside GNSS, 2012: 56-64.

[2] Lin K, Kansal A, Lymberopoulos D, et al. Energy-accuracy trade-off for continuous mobile device location [C]// Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, 2010:285-298.

[3] Kihara M, Okada T. A satellite selection method and accuracy for the global positioning system[J]. Navigation, 1984, 31(1): 8-20.

[4] Zhang M Y, Zhang J. A fast satellite selection algorithm:beyond four satellites[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal

Processing, 2009, 3(5): 740 - 747.

[5] Phatak M S. Recursive method for optimum GPS satellite selection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2001, 37(2): 751 - 754.

[6] Saraf M, Mohammadi K, Mosavi M R. GMM-Guided gradient descent learning of RBF neural network with its application on robust GPS satellites selection [C]//1st International Conference on Computer and Knowledge Engineering, Mashhad,2011: 139 - 143.

[7] Mosavi M R, Sorkhi M. An efficient method for optimum selection of GPS satellites set using recurrent neural network[C]// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics,2009: 245 - 249.

[8] Park C W. Precise relative navigation using augmented CDGPS[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2001.

[9] Wei M M, Wang J, Li J Q. A new satellite selection algorithm for real-time application [C]. International Conference on Systems and Informatics, YanTai, 2012: 2567 - 2570.

[10] Costa J A, Patwari N, Hero A O. Distributed weighted-multidimensional scaling for node localization in sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2006,2(1): 39 - 64.

[11] Olson E, Leonard J, Teller S. Robust range-only beacon localization[C]. IEEE Autonomous Underwater Vehicles, 2004:66 - 75.

[12] Priyantha N B, Chakraborty A, Balakrishnan H. The cricket location-support system[C]//Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 2000:32 - 43.

[13] Sinha K, Chowdhury A D. A beacon selection algorithm for bounded error localization estimation in ad hoc networks[C]//Proceedings of the International Conference on Computing: Theory and Applications, 2007:87 - 93.

[14] Lieckfeldt D, You J X, Timmermann D. An algorithm for distributed beacon selection[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2008:318 - 323.

[15] 范国清,王威,郗晓宁. 高精度 GPS 观测数据的实时仿真研究[J]. 国防科技大学学报,2009,31(3):60 - 64.
FAN Guoqing, WANG Wei, XI Xiaoning. High precision real-time simulation of GPS measurement[J]. Journal of National University of Defense Technology,2009,31(3):60 - 64. (in Chinese)