

活动受限三维水下传感器网络节点定位算法*

郭 瑛

(青岛科技大学 信息科学技术学院, 山东 青岛 266061)

通信作者: 郭瑛, E-mail: guoying@qust.edu.cn

摘 要: 针对水下传感器网络的部署方式,设计活动受限三维水下传感器网络节点定位算法(localization for active-restricted UWSN,简称LAR).LAR利用水下节点活动受限的特点辅助定位,通过分层定位的实施方式得到部署区域内全部节点的位置,并根据水下传感器网络中的节点移动规律,设计动态环境下的补偿机制.LAR过程简单、易于实现,仿真结果表明其定位误差明显小于现有算法.

关键词: 水下传感器网络;三维;活动受限;定位;动态

中文引用格式: 郭瑛.活动受限三维水下传感器网络节点定位算法.软件学报,2013,24(Suppl.(1)):33-40. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13005.htm>

英文引用格式: Guo Y. Localization for active-restricted 3D underwater sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013,24(Suppl.(1)):33-40 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13005.htm>

Localization for Active-Restricted 3D Underwater Sensor Networks

GUO Ying

(College of Information Science and Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Corresponding author: GUO Ying, E-mail: guoying@qust.edu.cn

Abstract: A localization algorithm for active-restricted 3-dimensional underwater sensor networks called LAR is proposed. It makes use of active-restricted sensor nodes' mobility to assist localization, and implements hierarchical mechanism to localize all the deployed sensor nodes. A compensation method for dynamic environment is also proposed based on the characteristics of mobile underwater sensor nodes. The obtained simulation results indicate that LAR is an effective scheme for underwater sensor network localization.

Key words: underwater sensor network; 3-dimension; active-restricted; localization; dynamic

水下传感器网络节点定位是水下传感器网络的支撑技术,在海洋动态监测、海洋科学研究以及海洋军事安全方面具有重要作用.水下传感器网络采用水声通信,由于其通信介质的不同,表现出了很多不同于陆地无线传感器网络的特点,如传输带宽有限、噪声大、信道受多径传播和衰落影响严重、传播时延长且具有时变性、误码率高等特点^[1].

目前,陆地无线传感器在网络节点定位方面已经取得较多的研究成果^[2],但由于水下传感器网络具有不同于陆地无线传感器网络的特点,使得这些研究成果不能直接应用于水下传感器网络之中.此外,水下节点由于受洋流的影响,具有移动性,现有的定位算法大都针对静态传感器网络,周期性地更新节点位置的机制极大地增加了节点的能耗^[3],不适用于水下环境.水下传感器网络节点定位技术的研究仍处于起步阶段,受到国内外学术界越来越多的关注.

现有的水下传感器网络节点定位算法都忽略了一个重要因素,就是水下节点活动受限的特性.为了防止水

* 基金项目: 国家自然科学基金(61103196, 61170258); 山东省优秀中青年科学家奖励基金(BS2012DX011); 青岛市科技计划(12-1-4-3-(16)-jch)

收稿时间: 2013-05-02; 定稿时间: 2013-08-22

下节点被海流冲走,水下节点多数采用固定或者半固定的部署方式,节点的移动范围受限^[4].而这种活动受限的特点可以用来辅助对节点进行定位.本文基于活动受限的三维水下传感器网络模型,设计了LAR(localization for active-restricted UWSN)算法,提出了分层定位的实施方案,分析了算法对于动态环境的适应性,并通过仿真对比表明了LAR的优越性.

本文第1节介绍传感器网络定位技术研究现状.第2节设计LAR算法以及分层定位的实现方式,并提出动态环境下的补偿机制.第3节通过仿真验证LAR算法的性能.第4节对本文进行总结和展望.

1 研究现状

传感器网络节点定位技术始终是传感器网络研究的热点问题^[5].水下传感器网络节点定位算法主要分为三大类:① 基于距离的定位算法;② 与距离无关的定位算法;③ 水下定位导航技术.

① 基于距离的定位算法

针对水下传感器网络的DNR算法^[6],利用信标节点在水中的起伏发送位置变化的定位信息,未定位节点通过监听定位信标节点的信息实现定位.DNR假设节点是同步的,从而增加了通信成本.Silent Positioning^[7]提出一种不需要时间同步的被动定位算法,但需要4个大功率锚节点.这些定位算法都需要额外的硬件支持,节点成本较高.

Auv-Aided Localization^[8]利用自控水下航行器(autonomous underwater vehicle,简称AUV)周期性地发送位置信息进行定位.AUV漂浮时接收GPS信号,然后在一定深度按照预设轨迹进行移动.当AUV到达水下传感器网络覆盖区域时,广播信标信号,未定位节点监听到信标后立即发送消息给AUV.这些消息中包含传播延迟,用来测量距离.利用AUV辅助的定位算法,定位精度依赖于测距精度.在水下环境中利用传播延迟测距的误差较大,定位精度较低.

SLMP算法^[9]利用节点的移动模型降低节点定位频度,适合大规模水下传感器网络.该算法通过预测水下传感器网络节点的移动模式,在定位精确度、定位范围和通信成本间达到平衡.USP算法^[10]利用投影把三维定位降为二维的稀疏网络进行定位.SLMP和USP算法需要一定数量的锚节点才能得到较为满意的定位精确度,由于锚节点本身成本高且部署困难,所以定位成本很高.此外,还可能产生更高的通信能量消耗,降低网络的吞吐量.

② 与距离无关的定位算法

在水下传感器网络中,与距离无关的定位算法的研究较少.ALS算法^[11]通过改变锚节点的发射功率,将大的区域分割成许多小区域以实现节点区域定位.ALS算法不能确定节点的准确位置,只能确定节点所在区域,且区域大小决定了ALS算法的定位精度.文献[12]将二维区域定位算法扩展到了水下三维区域定位算法.

Luo等人提出利用水声换能器的方向角进行水下定位的算法UDB^[13],它通过节点听到的第1个和最后一个信标确定节点的位置.还有利用移动信标节点进行定位、适用于三维稀疏网络的定位算法LDB^[14].这两种定位算法都不依赖于节点的部署密度,比较适合稀疏部署的海洋监测传感器网络,但是它们都依赖于具有方向角的水听器,对边界处理较为理想化,难以在实际环境中实施.

③ 水下定位导航技术

目前,水下定位导航技术可分为3个不同类别^[15]:惯性定位导航;声学定位导航;地球物理学定位导航.

惯性定位导航技术是利用陀螺仪探测AUV的加速度,结合多普勒速度计测量AUV与海床的相对速度,从而进行航迹推算的一种定位导航方法.航迹推算(即AUV自身位置的估计)主要用到卡尔曼滤波算法.其中,基于扩展卡尔曼滤波的航迹推算在无GPS定时辅助修正的条件下,精度会随时间降低;基于无迹卡尔曼滤波的航迹推算精度较高,但计算量大.此外,粒子滤波也是用于航迹推算的另一种算法,但计算更为复杂.目前,已经有基于粒子滤波的位置推算方法^[16]用于陆上车辆,通过减少基于当前位置不确定性的粒子数量,降低计算量,同时提供较高的精度.

声学定位导航是指AUV通过水下声学通信,利用作业区域内的锚节点进行定位的方法.根据锚节点部署方

式的不同,可分为长基线与超短基线两种方式,但锚节点的准确安装与定期维护十分困难.SLAM(即时定位与地图构建)算法^[17]通过将锚节点映射成网络图进行辅助定位,该算法是在锚节点位置预先不可知的条件下进行定位时使用的主要算法.目前,该算法不仅能将人为设置的锚节点作为路标进行映射,还能用于无路标的环境中.

地球物理学定位导航(也称为地形定位导航)是利用可观测的自然特征估计 AUV 位置的一种算法.可观测的自然特征包括地磁、重力加速度、进潮口、深海热泉等.地球物理学定位导航算法的难点在于如何利用 AUV 自身携带的声纳和其他传感器采集的数据进行自然特征的提取,以及如何对提取到的自然特征进行分类.通过在 AUV 上装载地图的方法,可以将复杂的分类问题转换为检测自然特征的变化上.目前,已经提出基于 SLAM 算法,通过增加状态卡尔曼滤波(ASKF)识别已访问区域的方法^[18].此外,基于粒子滤波算法的方法也正在研究中,用于提高定位精度.

水下定位导航技术虽然可以取得较好的定位效果,但是多数算法较为复杂,有的还需要额外的硬件支持,不适合能量有限、成本较低的水下传感器网络使用.本文设计的 LAR 算法与原有的定位算法不同,它针对活动受限的三维水下传感器网络,利用水下传感器节点部署的特点辅助定位,算法简单且定位效果好.

2 算法设计

本节介绍活动受限的三维水下传感器网络模型,设计移动信息辅助的 LAR 算法和相应的分层定位实施机制,并分析算法对于动态环境的适应性,提出动态环境下的补偿算法.

2.1 基本原理

在大多数水下传感器网络的应用中,为了防止水下传感器节点被海流冲走,传感器节点通过线缆与锚连接,部署在水中.锚重量较大,沉入海底后,静止在海底,不再运动,而与之相连的传感器节点漂浮在水中,随海流运动.也就是说,水下传感器节点可以在一定范围内运动,是活动受限的节点.假设海流的力量使线缆总能被拉直,那么水下节点的移动范围就是以锚为圆心,以线缆长度为半径的半球体的表面,如图 1 所示.

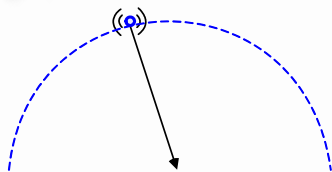


Fig.1 Model of active-restricted sensor node

图 1 活动受限节点模型

在水下部署有一个能够确定自身位置的信标节点,这个信标节点可以是提前部署的位置已知的节点,也可以是具备自己定位能力的 AUV.节点在部署时,还需要提前确定锚的位置(也就是节点移动范围的球心)和绳长.如图 2 所示,信标节点 S 的坐标 (X_S, Y_S, Z_S) ,节点 A, B 的当前坐标为 $(X_A, Y_A, Z_A), (X_B, Y_B, Z_B)$,球心坐标为 $(X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0}), (X_{B0}, Y_{B0}, Z_{B0})$,绳长为 L_A, L_B .球心坐标和绳长是已知量,球心坐标可以根据部署规划得到,绳长可以通过精确测量得到,它们不会影响计算精度.

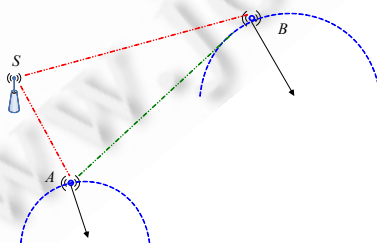


Fig.2 Message exchange in localization process

图 2 定位中的信息交换

根据三维坐标系下两点间距离公式,可得:

$$\begin{cases} (X_A - X_{A0})^2 + (Y_A - Y_{A0})^2 + (Z_A - Z_{A0})^2 = L_A^2 \\ (X_B - X_{B0})^2 + (Y_B - Y_{B0})^2 + (Z_B - Z_{B0})^2 = L_B^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, Z 轴坐标可以通过节点自身的压力传感器得到.

节点 S 广播发送自己的位置,节点 A, B 节点收到后,根据现有的测距算法^[19],计算出其与节点 S 之间的距离,分别为 d_{SA}, d_{SB} .可以得到如下等式:

$$\begin{cases} (X_A - X_S)^2 + (Y_A - Y_S)^2 + (Z_A - Z_S)^2 = d_{SA}^2 \\ (X_B - X_S)^2 + (Y_B - Y_S)^2 + (Z_B - Z_S)^2 = d_{SB}^2 \end{cases} \quad (2)$$

然后,节点 A 广播其球心坐标和 d_{SA} ,节点 B 收到后,计算出其与与节点 A 之间的距离 d_{AB} .可以列出下列方程式:

$$(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2 = d_{AB}^2 \quad (3)$$

联立方程组(1)、(2)和(3),可以解出节点 A, B 的当前坐标.

2.2 算法设计

本算法分层次进行定位,由信标节点主动发送自己的位置信息,开始第 1 次定位过程.能够直接收到信标节点信息的节点先定位,定位后的节点作为新的信标节点,发送其计算得到的节点位置,其他节点收到这些信标节点的位置信息后,通过计算实现自身的定位.这个过程依次进行,直到所有节点都确定了自己的位置.

如果待定位节点只能直接收到一个信标节点的信息,就需要利用其周围任意一个邻居节点的信息,采用公式(1)~公式(3)计算出自己以及邻居的位置.

如果待定位节点能够收到两个信标节点的信息,就可以直接计算出自己的位置,使算法大大简化.

如图 3 所示,信标节点 $S1$ 和 $S2$ 的坐标为 $(X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}), (X_{S2}, Y_{S2}, Z_{S2})$,待定位节点 A 的当前坐标为 (X_A, Y_A, Z_A) ,球心坐标为 (X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0}) .节点 A 收到信标节点 $S1$ 和 $S2$ 发送的位置信息后,计算出它与信标节点间的距离 d_{S1A} 和 d_{S2A} ,得到如下方程组:

$$\begin{cases} (X_A - X_{A0})^2 + (Y_A - Y_{A0})^2 + (Z_A - Z_{A0})^2 = L_A^2 \\ (X_{S1} - X_A)^2 + (Y_{S1} - Y_A)^2 + (Z_{S1} - Z_A)^2 = d_{S1A}^2 \\ (X_{S2} - X_A)^2 + (Y_{S2} - Y_A)^2 + (Z_{S2} - Z_A)^2 = d_{S2A}^2 \end{cases} \quad (4)$$

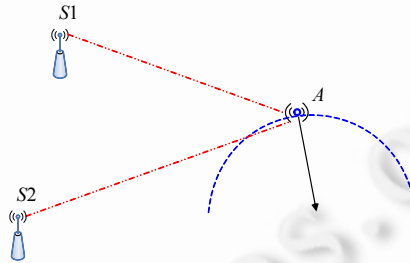


Fig.3 Two beacon nodes help localization

图 3 两个信标节点辅助定位

解该方程组,即可解得节点 A 的坐标.可见,采用两个信标节点的信息将减少计算量和信息交换次数.

因此,待定位节点不是一收到信标节点的信息就进行定位计算,而是等待一定时间间隔 T ,如果能收到其他信标节点的信息,就直接用公式(4)定位;如果没有收到其他信标节点的消息,就利用周围节点的信息,采用公式(1)~公式(3)来定位.

节点定位算法如下所示:

```
1:Receive (S1); //start location
2:while ((t<T)& (!Receive (S2))) //waiting for another beacon
```

```

3:if (Receive (S2))
4:   Location with equation (4); //two beacon nodes
5:else //one beacon node
6:   if (Receive (A));
7:     if (Receive (B))
8:       Location with equations (1~3); //as node C
9:     else
10:      Send (B); // as node B
11:   endif
12: else
13:   Send (A); //as node A
14: endif
15:endif

```

2.3 动态网络分析

在静态传感器网络中,该算法的定位误差来源主要为节点间测距带来的误差,与采用的测距方法相关,可以通过采用多次测量取平均值等方式来减少误差。

在动态传感器网络中,由于节点的移动,会导致计算得到的位置与节点实际位置不符.节点在水下的运动主要受水流的影响,研究表明,水流的运动并不是随机的、无规律的,在一定时间和空间里,水流的运动具有一定的 consistency.在LAR定位算法中,能够直接通信的节点间的距离有限,而且一次定位过程仅需要两次信息广播,几秒之内就可以完成.因此,可以假设节点 A, B 的移动方式具有一致性,而信标节点固定不动。

节点 A, B 的移动不仅收到水流的影响,还受到其固定的锚的拉力的影响,在线绳总是拉紧的情况下,节点只能在一个固定的半球运动,如图4所示.信标节点 S 发送定位信息,节点 A, B 在位置 A_1, B_1 处收到相关信息.节点 A 发送信息的位置为 A_2 ,节点 B 接收到节点 A 的信息位置为 B_2 .假设节点发送信标信息间的时间间隔远大于信息传输的时间,那么 $A_1A_2 \approx B_1B_2$,且方向一致,可得 $A_1B_1 \approx A_2B_2$.因此,采用公式(1)~公式(3)计算得到的节点位置是 A_1, B_1 ,而不是节点当前位置 A_2, B_2 。

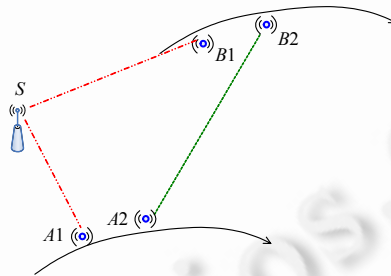


Fig.4 Localization analysis of dynamic network

图4 动态网络定位分析

为了得到节点的当前位置,连续运行两次定位过程,每次信息发送的时间间隔相同,那么用这两次定位得到的位置,可以得出动态水下传感器网络的移动补偿量。

以节点 A 为例,第1次得到的节点位置为 (X_A, Y_A, Z_A) ,第2次得到的节点位置为 (X'_A, Y'_A, Z'_A) ,则在一次定位过程中节点的位置改变 $(\Delta X_A, \Delta Y_A, \Delta Z_A)$ 如下:

$$\begin{cases} \Delta X_A = (X'_A - X_A)/2 \\ \Delta Y_A = (Y'_A - Y_A)/2 \\ \Delta Z_A = (Z'_A - Z_A)/2 \end{cases} \quad (5)$$

由于在一定的时间和空间里,节点的移动具有一致性,在短时间内可以把 $(\Delta X_A, \Delta Y_A, \Delta Z_A)$ 作为节点定位的补偿量,其对应的时间间隔就是定位需要的时间长度.在补偿的同时要综合考虑公式(1),如果补偿后节点位置与球心的距离超过绳长,就认为节点已经移动到极限位置,不再补偿.

3 仿真及结果分析

本节通过仿真实验分析 LAR 的性能,假设绳长为 20m,相邻节点间的距离在 60m~180m 之间,节点的通信范围为 200m.节点利用收到的信号强度计算节点间的距离,距离估算误差符合均值 5%的正态分布,在仿真部署区域的 4 个角落放置 4 个固定的信标节点.为了比较 LAR 的性能,仿真中把 LAR 与最常用的三边定位算法(trilateration)相比较.之所以选择 Trilateration 定位算法作为比较对象,是由于其同样不需要辅助设备和特殊部署.

首先,在 500m×500m×20m 区域里随机部署 25 个活动受限的节点.如图 5 所示,圆圈代表节点的初始位置,X 代表 Trilateration 定位得到的节点位置,*代表 LAR 定位的节点位置.从图上可以看出,LAR 定位的结果比 Trilateration 定位更加接近实际位置.

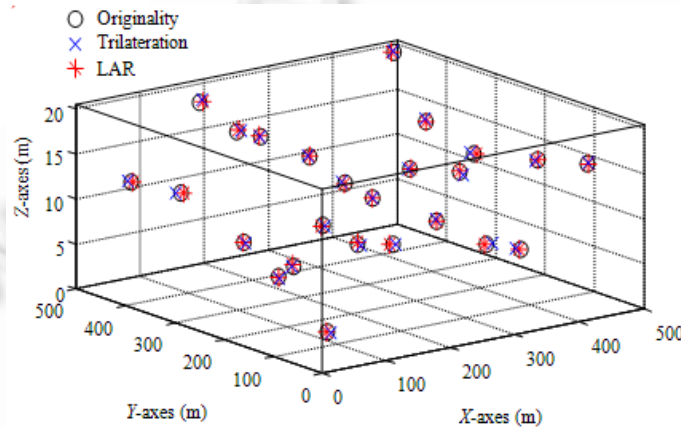


Fig.5 Localization result

图 5 定位结果图

图 6 比较了节点用 LAR 定位算法和 Trilateration 定位算法的定位误差.Trilateration 定位的平均误差是 6.18m,标准误差为 2.51m;LAR 定位的平均误差是 3.28m,标准误差为 1.38m.可以看出,LAR 定位算法的精度比 Trilateration 定位算法提高了 46.93%.

接下来,研究 LAR 算法在大规模水下传感器网络中的性能.随机部署 100 个活动受限的水下传感器节点,节点定位误差如图 7 所示.LAR 定位算法和 Trilateration 定位算法都可以定位全部节点,采用 Trilateration 定位方法,大约 80%的节点的定位精度小于 8.2m,而采用 LAR 定位算法,大约 80%的节点定位精度小于 4.6m,可见,LAR 定位算法的误差远小于 Trilateration 定位算法.

在三维空间里,Trilateration 定位算法至少需要 4 个不同面的信标节点的信息才能确定自己的位置,因此,定位每个节点至少需要 4 次信息发送.而 LAR 定位算法每定位 1 个节点仅需要 3 次信息发送,比 Trilateration 定位算法更加节省能量,具有精度高、能耗低的特点.

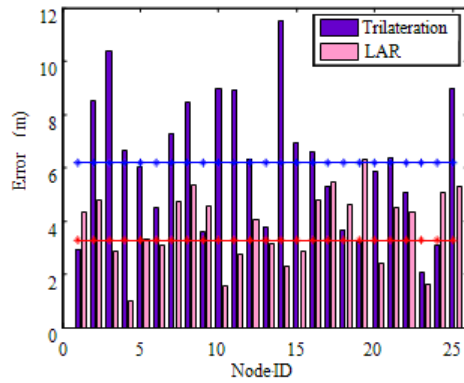


Fig.6 Comparison of localization accuracy

图 6 定位精度比较图

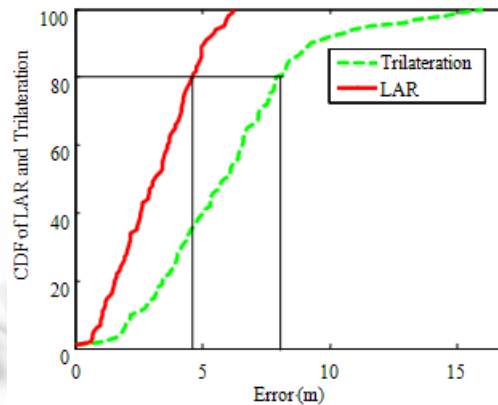


Fig.7 CDF of localization error

图 7 定位误差 CDF 图

4 结束语

本文针对水下传感器网络节点活动受限的特点,设计了基于信标节点的活动受限三维水下传感器网络节点定位算法 LAR,提出了分层定位的实施机制,并针对动态环境设计了相应的补偿方法,LAR 算法实现简单,定位效果好.在今后的工作中,要进一步研究算法对不同环境的适应性,改善动态补偿的效果,提高定位精度,并通过海洋实验验证算法的性能.

References:

- [1] Akyildiz F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. *Ad Hoc Networks*, 2005,3(3): 257-279.
- [2] Han GJ, Xu HH, Duong TQ, Jiang JF, Hara T. Localization algorithms of wireless sensor networks: A survey. *Telecommunication Systems*, 2013,52(4):2419-2436.
- [3] Zhou Z, Peng Z, Cui JH, Shi ZJ, Bagtzoglou A. Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2011,10(3):335-348.
- [4] Guo Y, Liu YT. Localization for anchor-free underwater sensor networks. *Computers and Electrical Engineering*, 2013,39: 1812-1821.
- [5] Guo ZW, Guo Y, Hong F, Jin ZK, He Y, Feng Y, Liu YH. Perpendicular intersection: Locating wireless sensors with mobile beacon. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2010,59(7):3501-3509.

- [6] Erol M, Vieira L, Gerla M. Localization with dive and rise (Dnr) beacons for underwater acoustic sensor networks. In: Proc. of the 2nd ACM Int'l Workshop on Underwater Networks. 2007. 97–100.
- [7] Chen X, Shu H, Liang Q, Du DHC. Silent positioning in underwater acoustic sensor networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2008,57(3):1756–1766.
- [8] Erol M, Vieira LFM, Gerla M. Auv-Aided localization for underwater sensor networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Wireless Algorithms Systems and Applications. Washington, 2007. 44–54.
- [9] Zhou Z, Cui J, Bagtzoglou A. Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks. In: Proc. of the Annual IEEE Int'l Conf. on Computer Communications. Washington, 2008. 2198–2206.
- [10] Cheng W, Teymorian AY, Ma L, Cheng XZ, Lu XC, Lu ZX. Underwater localization in sparse 3d acoustic sensor networks. In: Proc. of the Annual IEEE Int'l Conf. on Computer Communications. Washington, 2008. 236–240.
- [11] Chandrasekhar V, Seah W. An area localization scheme for underwater sensor networks. In: Proc. of the OCEANS 2006. Washington, 2006. 1–8.
- [12] Zhou Y, He JH, Chen K, Chen JB, Liang AL. An area localization scheme for large scale underwater wireless sensor networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Communications and Mobile Computing. Washington, 2009. 543–549.
- [13] Luo HJ, Zhao YY, Guo ZW, Liu SY, Chen PP, Ni LM. UDB: Using directional beacons for localization in underwater sensor networks. In: Proc. of the 14th IEEE Int'l Conf. on Parallel and Distributed Systems. Washington, 2008. 551–558.
- [14] Luo H, Guo Z, Dong W, Hong F, Zhao Y. LDB: Localization with directional beacons for sparse 3d underwater acoustic sensor networks. Journal of Networks, 2010,5(1):28–38.
- [15] Stutters L, Liu H, Tiltman C, Brown DJ. Navigation technologies for autonomous underwater vehicles. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2008,38(4):581–589.
- [16] Gustafsson F, Gunnarsson F, Bergman N, Forssell U, Jansson J, Karlsson R, Nordlund P. Particle filters for positioning, navigation and tracking. IEEE Trans. on Signal Processing, 2002,50:425–437.
- [17] Dissanayake MWMG, Newman P, Clark S, Durrany-Whyte HF, Csorba M. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. IEEE Trans. on Robot. Automat, 2001,17:229–241.
- [18] Garcia R, Puig J, Ridao P, Cufi X. Augmented state Kalman filtering for AUV navigation. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation. 2002. 4010–4015.
- [19] Bahl P, Padmanabhan VN. RADAR: An in-building rf-based user location and tracking system. In: Proc. of the Annual IEEE Int'l Conf. on Computer Communications. Tel Aviv, 2000,2:775–784.



郭瑛(1981—),女,山东青岛人,博士,主要研究领域为传感器网络,物联网。
E-mail: guoying@qust.edu.cn