面向海洋监测的水声传感器网络节点定位算法

陈秋丽[1] 何 明[1] 王 琰[2,3] 陈希亮[1] 王立辉[4]
(解放军理工大学指挥信息系统学院 南京 210007)[1] (解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)[2]
(解放军第61研究所 北京 710004)[3] (东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)[4]

摘 要 为解决面向海洋监测应用的大规模水声传感器网络的节点定位问题,首先,采用整数线性规划理论,提出了多目标约束的水面网关优化部署策略;其次,针对水声传感器网络不同节点的特点,设计不同的定位方案,提出了有预测性的水声传感器网络节点部署算法。仿真实验验证了该方法的可行性与有效性,结果表明,该算法能明显提升节点的定位范围,降低通信能耗,减小定位误差,为水声传感器网络的海洋大规模部署提供相应技术指导。

关键词 水声传感器网络,水面网关部署,节点部署,移动预测
中图法分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.2.006

Localization Algorithm of Underwater Acoustic Sensor Network Oriented to Marine Monitoring

CHEN Qiu-li[1] HE Ming[1] WANG Yan[2,3] CHEN Xi-liang[1] WANG Li-hui[4]
(College of Command Information System, PLA Science and Technology University, Nanjing 210007, China)[1]
(College of Communication Engineering, PLA Science and Technology University, Nanjing 210007, China)[2]
(The 61th Research Institute of PLA, Beijing 710004, China)[3]
(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)[4]

Abstract To solve the nodes location problem of large-scale underwater acoustic sensor networks (UASNs) for marine monitoring application, firstly, the integer linear programming theory was used to create the water gateway optimization deployment strategy based on multi-objective constraint. Secondly, a predictive algorithm of UASNs nodes deployment was put forward through the layered orientation. Simulation proves the feasibility and effectiveness of the method. The experimental results show that the localization algorithm with predictability can significantly improve the nodes positioning range, decrease the energy consumption of communication, reduce the positioning error, and research achievements can provide the corresponding technical guidance for ocean large-scale deployment of UASNs.

Keywords UASNs, Surface-level gateways deployment, Nodes deployment, Mobility prediction

1 引言

在海洋权益逐渐被世界各国所重视的同时,引发了一股发展海洋经济、开展水下资源探测的热潮。而水声传感器网络(UASNs)已经成为水下监控和勘探中各类应用程序运行的基础,凭借其在科学、商业和军事等诸多方面的应用越来越被人们所关注[1]。与遥感相比,UASNs可以提供本地化、精确化的数据采集[2]。然而,UASNs也面临诸多挑战。由于电磁波在水中会被快速吸收,不能将其运用于水声传感器网络,因此水声传感器网络采用声波进行通信。相对于电磁波传播速度,水下声速低了5个数量级,大大限制了水声通信效率,同时,压力、温度和盐度等多种水下因素的变化也对水下网络的传播性能造成一定影响。

因而,人们想到了通过部署多个水面网关来有效减轻声学通信传播延迟的问题[3]。在传感器网络中,每个传感器节点可以监视和检测环境中的本地事件,然后通过网络将监测到的数据传输到水面网关节点(也称为UASNs的一个汇聚节点),再由网关节点将数据传输到控制站。不同于单一汇聚节点的网络,在多个汇聚节点的水声传感器网络中水下传感器节点可以向离其最近的水面网关发送数据包从而实现通信。然而,拥有多个水面网关和多个位置持续变化的水下节点在大规模水声传感器网络的环境下如何合理地定位部署成了亟待解决的问题。许多为固定传感器网络设计的定位规划运用到水下时,需要定期更新位置结果,相应地增加了通信开销。而为小规模水下声学网络设计的分布式定位规划,却由于收敛速度缓慢和通信开销巨大,使得大规模水声传感器网络不能采用。

在文献[4]中,Seah和Tan研究了使用多汇聚节点架构来提高水声传感器网络的可靠性,虽然提及到采用多个水面网关节点进行架构,但没有正式研究其水面网关部署:既没有分析使用多个水面网关对网络能源消耗或延迟造成的影响,也没有在已构建的多汇聚节点架构部署中提供指导方针。文

到稿日期:2014-03-18 返修日期:2014-07-17 本文受国家自然科学基金项目(61203192),江苏省自然科学基金项目(BK2012326)资助。
陈秋丽(1990-),女,硕士生,主要研究方向为水声传感器网络,E-mail:review_paper@126.com;何 明(1978-),男,博士后,副教授,主要研究方向为水声传感器网络、物联网;王 琰(1983-),女,博士生,工程师,主要研究方向为无线通信;陈希亮(1985-),男,硕士,讲师,主要研究方向为建模与仿真;王立辉(1979-),男,博士,副研究员,主要研究方向为电力系统自动化。

献[5]采用启发式的算法，有效地解决了水面网关部署的优化问题，但没有探讨针对水下多种部署情况的适应性能。文献[6]采用自顶向下的方法探究了大型移动水声无线传感器网络设计的挑战，详细分析了水声移动传感器网络每一层的架构，但其对水下节点构建自组织网络的方法阐述太少。

本文首先针对网络的整体性能，研究讨论了水面网关节点数量及位置对 UASNs 性能的影响问题。重点在于优化水面网关的部署成本，通过寻找最低数量的水面网关节点的部署位置，达到一个给定的设计目标，以解决通信延迟、能源消费、系统误差等一个或多个问题；随后提出一种名为 LOMPL (Layered Orientation with Mobility Prediction in Large-scale) 的定位方案，在 LOMPL 中，定位过程分为 3 个部分：水面网关节点定位、锚定节点定位和普通节点定位。每一个节点根据其过去已知位置信息预测未来的移动模式，从而估计其未来的位置。仿真结果显示：在保持相对高的定位覆盖范围和定位精度的同时，LOMPL 能够极大地减少通信能耗。

本文第 2 节对水面网关部署的优化问题进行了讨论；第 3 节重点描述 LOMPL 的定位细节；第 4 节，仿真验证了 LOMPL 的广泛适用性，并与相关成熟定位算法进行对比；最后进行了总结与展望。

2 水面网关部署的优化策略

水面网关部署问题可模拟为一个 3D 图形的优化问题。水声传感器网络的整体架构包括水面网关节点、锚定节点、自移动节点和普通节点。由于自移动节点能够在水下自由移动，增强网络的稳定性，因此不考虑其定位问题。而水面网关节点能够直接与近岸基地进行通信，并装备 GPS 来直接获得其位置信息，故其定位相对简单却又十分重要，决定了整个水声传感器网络的部署与性能的优劣[7]。因此本文首先给出候选水面网关位置所需要满足的连通性约束，以保证每个水下节点都具有一条路径，能够到达至少一个水面候选网关的位置。

为了降低问题的复杂性，规定一个节点只有未从其相邻节点接受任何信息时才可以发送数据，同时忽略信息传播中的排队延迟，这符合当前声学调制解调器中的半双工状态。网络可抽象为一个图，图中节点代表了水下传感器节点和水面候选网关位置，而图中的边则代表一对通信链路。

具体参数含义如表 1 所列。

表 1 参数含义

符号	含义
V	水下所有传感器节点的集合
W	水面网关候选位置集合
R	传感器节点的通信范围
E	表示所有的边的集合
B	通信链路的最大容量
l(e)	表示边 e 上总的数据流量
$p(v_i)$	节点 $v_i \in V$ 数据包的产生速率
$U(t_i)$	水面网关在位置 t_i 的部署情况，值为 1 时表示该位置有网关，值为 0 时表示没有

规定各种约束条件[5]如下：

1)干涉约束：对任意一个节点上，总的发送和接收的传输速率不能超过 B。

$$\sum_{e_{out} \in E_{out}(v)} l(e_{out}) + \sum_{e_{in} \in E_{in}(v)} l(e_{in}) < B \tag{1}$$

由于水面网关只能接受数据，不具备转发功能，因此：

$$\sum_{e_{out} \in E_{out}(w)} l(e_{out}) = 0 \tag{2}$$

2)流量守恒约束：对于水下传感器节点来说，流出一个节点的流量之和等于流入这个节点的流量之和加上这个节点的本地数据产生速率，即：

$$\sum_{e_{out} \in E_{out}(v)} l(e_{out}) - \sum_{e_{in} \in E_{in}(v)} l(e_{in}) = p(V) \tag{3}$$

数据只可以被部署的水面节点所接收，因而对于水面网关节点来说，总的数据产生速率必须和总的水面节点数据吸收速率相等，即：

$$\sum_{e_{in} \in E_{in}(w)} l(e_{in}) = \sum p(V) \tag{4}$$

3)部署成本约束：由于在二维空间中，确定一个节点的位置需要知道其到 3 个参考节点的距离，而三维空间中则需要该节点到 4 个位置已知的参考节点距离，故对水面网关节点数量 N 有：

$$N \geqslant 4 \tag{5}$$

为了优化网络性能，得到最小延迟和最低能耗，在水面网关节点 N 数量有限的情况下，应该包含以下约束：

$$\sum_{t_i \in W} U(t_i) \leqslant N \tag{6}$$

通过解方程组(1)－(6)，根据时延、能耗等网络性能参数制定相关目标函数，从而得到一个最优化的部署，这个部署可以用二进制变量 $U(t_i)$ 的集合形式来表示。

3 定位算法 LOMPL

在使用线性规划方法得到最优网关应部署的位置后，针对水声传感器网络架构，定位过程分 3 部分进行。

3.1 水面网关节点定位

首先，通过 GPS 或者其它方法获取第 2 节所阐述的水面网关部署的最优位置信息。这些网关节点像“卫星节点”一样为整个网络工作，帮助锚定节点通过这些水面网关来定位。锚定节点具有更加强大的功能，能够在每个定位周期中直接通过水面网关测算其自身位置，同时能够运用一些复杂的移动预测算法，从而使得普通节点实现进一步定位。

3.2 锚定节点定位

为解决锚定节点的定位问题，采用逐一迭代预测方法进行节点的移动预测。

步骤 1 划分时间为多重预测窗口，设其长度为 τ，一个窗口是一个预测单元。τ 应当定为周期 T 的整数倍，这里用 $\tau = kT$ 来表示。

对于每一个节点，在每一个预测窗口中使用速度矢量 $\vec{v} = [\vec{v}_1, \vec{v}_2 \cdots \vec{v}_k]$ 来代表移动行为。$\vec{v}_i$ 表示在第 i 个定位周期中的平均移动速度。考虑受到水下洋流影响，节点沿着一个坐标方向的加速度是摆动的，为了预测 $\vec{v}_i$，受目标跟踪算法启发[8]，使用如下的预测方法：

$$\vec{v}_i = F_\alpha \vec{v}_{i-1} \tag{7}$$

$$F_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & T & (\alpha T - 1 + e^{-\alpha T})/\alpha^2 \\ 0 & 1 & (1 - e^{-\alpha T})/\alpha \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix} \tag{8}$$

其中，T 为定位周期，$\alpha = 1/\tau$，依赖于预测窗口的长度。

步骤 2 设定节点在每个窗口的速度矢量 $\vec{v}$ 来代表移动行为。一个锚定节点在知道其目前位置 s_{old} 后，计算其预测位置 s_{new} 如下：

$$s_{new}(i) = s_{old}(j) + \sum_{m=j}^{i} T_i \cdot \vec{v} \tag{9}$$

如果预测的位置与真实位置之间的误差在规定范围内，则表明预测速度矢量效果很好，没有必要进行更多的计算；否则，需要更新锚定节点的速度矢量来重新预测。

步骤 3　发送定位消息，包括节点编号、发送时刻、当前位置、速度矢量、可信度值。其中速度矢量是下一个窗口的预测速度矢量；可信度值是消息发送者的可信度值，用于确定定位的精度。对于水面网关节点，该值定为 1，普通节点其值的计算将在下文中进行阐述。

3.3　普通节点定位

普通节点复杂性低，不能直接与水面网关通信。它们造价低廉，能量较低。通常，普通传感器节点只能联系其邻近节点。通过它们之间以及邻近锚定节点的定位信息，普通传感器节点才能够定位自身[9]。由于其记忆及计算能力有限，且不能运行复杂的短期预测算法，在 LOMPL 中，我们充分利用空间联系的优势，通过水下实体的联系简化移动预测。

步骤 1　确定节点移动速度。通过搜寻周围定位完成的节点个数，根据它们的速度，计算当前节点的速度。

如：节点 i 的邻近节点有 n 个，与节点 j 之间的欧氏距离为 r_{ij}，干涉系数 θ 为

$$\theta_{ij}=\frac{\frac{1}{r_{ij}}}{\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{r_{ij}}} \tag{10}$$

则经 n 个节点干涉后，节点 i 的预测速度为

$$\vec{v}(i)=\sum_{j=1}^{n}\theta_{ij}\vec{v}(j) \tag{11}$$

步骤 2　更新位置信息。所有网关节点标记自身是参照节点，并且设置可信度值为 1。越来越多的普通节点在定位过程中逐一被定位，遂成为参照节点。每个普通节点维持一个参照列表来记录所有已知的参照节点。通过递归定位的方法，维护其位置信息。故

$$s(i)=s(i-1)+T\cdot\vec{v}(i) \tag{12}$$

步骤 3　发送定位信息。包括参照节点编号、收到参照定位信息的时刻、参照节点的位置、速度矢量、到参照节点的距离和参照节点的可信度值。

普通节点定位完成以后，将在每一个定位周期更新维护其已知的参照列表，更新过程如下：

1）检查每一个已知参照节点最近发出的定位消息的到达时刻，如果当前时刻和最近到达时刻的间隔大于 q 倍定位周期，则说明这个参照节点已经过期，应该在列表中删除。

2）如果没有接收到从参照节点发出的新的定位信息，可信度值应当随时间逐步减少。减少依据为：

$$\sigma_{new}=\frac{q-\frac{(t_{new}-t_{old})}{T}}{q}\cdot\sigma_{old} \tag{13}$$

在一个定位周期中，对于随机部署情况下任一未定位的普通节点，如果它没有收到任意定位信息，则参照锚定节点的定位过程，进行速度矢量预测来更新其当前位置。如果它接收到从一个参照节点发出的定位信息，则通过更新参照列表来进行新的位置更新。

4　仿真实验

4.1　仿真设置

在仿真中，将每 150m 海域内候选网关部署为 5×5 的网格间隔。定义节点密度是一个节点所有邻近节点数目的期望值，因此节点密度等于节点度数。在保持相同的部署区域下，通过改变每个节点的通信范围 R 来控制节点密度。500 个传感器节点随机分布在 100m * 100m * 100m 的区域。仿真中采用成熟预测的定位算法 SLMP[10] 与 LOMPL 进行对比实验。移动节点模式采用运动学模型，文献[11]中有对该模型的详细解释。

参数定义如下：定位周期 T 定为 1s，锚定节点的预测误差范围设置为 $0.05R$ 以内，预测步数定为 15，预测窗口大小设置为 60s。普通节点的可信度临界值 σ 设置为 0.98。

4.2　仿真结果和分析

针对定位范围、平均通信能耗和平均定位误差这 3 个关键因素进行仿真对比。定位范围是指已定位节点的数目同所有节点数目之比；平均通信能耗则为网络所有交互信息的数量除以已定位的传感器节点数目。这里以传递数据包的个数为度量标准；定位误差是所有节点的位置估计和真实位置之间的平均差距。仿真中，将节点通信范围的定位误差绝对值进行标准化。

仿真中，设置锚定比例为 10%，通过调整 R 的大小，使其平均节点密度在 10 到 18 之间变更。

很显然，图 1 显示了定位范围随节点密度的增加而单调递增，而且，因为具有逐一迭代预测，LOMPL 的定位范围比 SLMP 算法相对较大一些，且每个周期内的定位过程相对独立，可推广应用于定位范围更大的环境中。

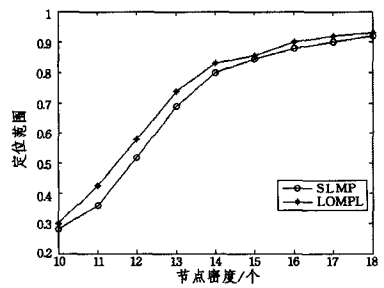

图 1　定位范围随节点密度变化的情况

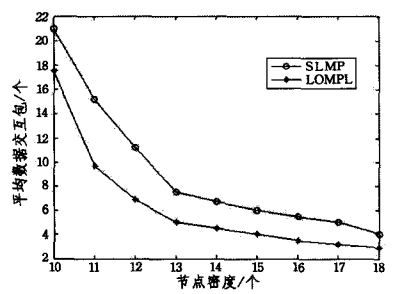

图 2　平均通信能耗随节点密度变化的情况

图 2 清楚地显示随着节点密度的增加，平均数据交互包的数量，即节点通信能耗开始迅速减少，这是因为节点密度的增加使得定位范围急剧增加，因此导致平均通信能耗减少。同时，当节点密度增加到某一个点（如图 2 所示）、邻近节点超过 13 以后，平均通信能耗将趋于稳定。图 2 也显示出 LOMPL 能够相对减少通信能耗。这是因为在 LOMPL 的每个定位周期中，锚定节点不需要发送定位信息，因而限制了定位信息的洪泛概率，使得相应的总的通信能耗也减少了，从而能够有效降低水声传感器网络中带宽和能量的消耗。

图 3 显示随着节点密度的增加，LOMPL 中平均定位误差会先增加一些，然后单调递减。节点密度较低的区域中，误

差的增加是由于相应的定位范围急剧增加所致。然而当节点密度到达某一个点后，大部分能定位的节点获得定位。随着节点密度的进一步增加，未定位的节点获得更多的参照节点，有更多的选择来计算位置，因此定位误差会大大减少。而LOMPL中的逐一迭代定位稍精准于SLMP的累加迭代定位，平均误差差距不大。

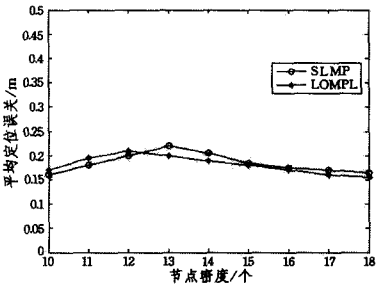

图3 平均定位误差随节点密度变化的情况

结束语 针对大规模水声传感器网络，本文首先对水面网关部署的优化问题进行了研究，采用最低数量的网关节点进行最优位置的部署以确保网络的良好性能，并实现了多种目标的约束优化。随后提出了一种新的有移动预测定位的定位规划LOMPL。运用水下移动模式的空间关联特点，使节点之间能够获得移动信息，从而预测出其位置。仿真结果显示了LOMPL能够在保持一个相当高的定位范围和定位精度的同时极大地减少通信能耗。下一步将在应用领域实现进一步拓展，增加更多的干扰模型，规划MAC协议的影响，进一步完善LOMPL所带来的定位优势。

参考文献

[1] 何明，梁文辉，陈国华，等. 水下移动无线传感器网络拓扑[J]. 控制与决策，2013，28(12)：1761-1770

[2] Petrioli C，Petroccia R，Spaccini D. Time synchronization and localization for underwater acoustic sensor networks with the SUNSET framework[C]// Proceedings of the 8th ACM international workshop on Wireless network testbeds，experimental evaluation & characterization. ACM，2013：99-100

[3] Lloret J. Underwater Sensor Nodes and Networks[J]. Sensors，2013，13(9)：11782-11796

[4] Seah W K G，Tan H P. Multipath virtual sink architecture for wireless sensor networks in harsh environments[C]// Proceedings of the first international conference on integrated internet ad hoc and sensor networks. ACM，2006：19

[5] Ibrahim S，Cui J H，Ammar R. Efficient surface gateway deployment for underwater sensor networks[C]// IEEE Symposium on Computers and Communications，2008 (ISCC 2008). IEEE，2008：1177-1182

[6] Cui J H，Kong J，Gerla M，et al. The challenges of building mobile underwater wireless networks for aquatic applications [J]. Network，IEEE，2006，20(3)：12-18

[7] Guan J，Huang J，Lu J，et al. Topology structure design for underwater acoustic Wireless Sensor Network[C] // TENCON 2013-2013 IEEE Region 10 Conference (31194). IEEE，2013：1-4

[8] Pan Quan，Zhao Chun-hui，Liu Liu. A probability hypothesis density filter with Singer model for maneuver target tracking[C]// Control Conference (CCC). 2013：4778-4782

[9] Climent S，Sanchez A，Capella J V，et al. Underwater Acoustic Wireless Sensor Networks：Advances and Future Trends in Physical，MAC and Routing Layers [J]. Sensors，2014，14(1)：795-833

[10] Peng Zheng，Cui Jun-hong，Shi Zhi-jie，et al. Scalable Localization with Mobility Prediction for Underwater Sensor Networks [J]. IEEE Computer Society，2011，1(17)：335- 348

[11] Beerens S P，Ridderinkhof H，Zimmerman J T F. An analytical study of chaotic stirring in tidal areas [J]. Chaos，Solitons & Fractals，1994，4(6)：1011-1029

(上接第6页)

[19] Andersen S，Duric A，Astrom H，et al. RFC 3951：In-ternet low bit rate codec (iLBC)[S]. IETF，2004

[20] Valin J M，Vos K，Terriberry T. RFC 6716：Definition of the opus audio codec[S]. IETF，2012

[21] Bankoski J，Wilkins P，Xu Y. Technical overview of VP8，an open source video codec for the Web [C]// 2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). Barcelona，2011：1-6

[22] Rosenberg J. RFC 5245：Interactive connectivity estab-lishment (ICE)：A protocol for network address translator (NAT) traversal for offer/answer protocols[S]. IETF，2010

[23] Petit-Huguenin M. RFC 5928：Traversal Using Relays around NAT (TURN) Resolution Mechanism[S]. IETF，2010

[24] Rosenberg J，Mahy R，Matthews P. RFC 5389：Session traversal utilities for NAT (STUN)[S]. IETF，2008

[25] 竹洪涛. 一种基于SIP和WebRTC的实时可视对讲方案设计[D]. 成都：西南交通大学，2013

[26] Mahy R，Matthews P，Rosenberg J. RFC 5766：Traversal using relays around NAT (TURN)：relay extensions to session traversal utilities for NAT (STUN)[S]. IETF，2010

[27] Perkins C，Westerlund M，Ott J. Web Real-Time Com-munication (WebRTC)：Media Transport and Use of RTP[S/OL]. 2012. https：//tools. ietf. org/html/draft-ietf-rtcweb-rtp-usage-06

[28] 郭远威. P2P流媒体关键算法的研究[D]. 长沙：中南大学，2012

[29] Becke M，Rathgeb E P，Werner S，et al. DataChannel considerations for RTCWeb[J]. Communications Mag-azine，IEEE，2013，51(4)：34-41

[30] 张春红，裘晓峰，弭伟，等. P2P技术全面解析[M]. 北京：人民邮电出版社，2010：149-164

[31] Pouwelse J，Garbacki P，Epema D，et al. The BitTorrent P2P file-sharing system：Measurements and analy-sis[M]// Peer-to-Peer Systems IV. Springer Berlin Hei-delberg，2005：205-216

[32] Johnston A B，Burnett D C. WebRTC：APIs and RTCWEB Protocols of the HTML5 Real-Time Web[M]. Digital Codex LLC，2012：9-11

[33] Johnston A，Yoakum J，Singh K. Taking on WebRTC in an Enterprise[J]. Communications Magazine，IEEE，2013，51(4)：48-54

[34] Nurminen J K，Meyn A J R，Jalonen E，et al. P2P media streaming with HTML5 and WebRTC[C]// IEEE International Conference on Computer Communications. Turin：IEEE，2013：63-64

[35] Xu Y，Yu C，Li J，et al. Video telephony for end-consumers：Measurement study of Google+，iChat，and Skype[C]// Proceedings of the 2012 ACM conference on Internet measurement conference. ACM，2012：371-384