

MFALM:一种水下动态传感器网络主动定位方法

杨奎武¹ 郭渊博¹ 韦大伟¹ 金永岗²

(解放军信息工程大学电子技术学院 郑州 450004)¹ (解放军 72506 部队 河南 463200)²

摘 要 针对水下动态传感器网络定位的特点及问题,提出了一种基于到达时间差(TDoA)的多频率主动定位方法MFALM(multi-frequency active localization method base on TDoA)。该方法将网络节点分为3组:信标节点、中继节点和普通节点。节点之间通过高、低两种频率分别进行近、远距离通信。为减少通信开销,定义了精简的报文格式和有效的通信方式。分析表明,该定位方法由于采用事件驱动、多频通信、精简报文,因此在定位过程中不但能够减少节点的定位开销,延长网络生存时间,而且还有定位精度高、节点密度可调等优点。

关键词 传感器网络,水下定位,TDoA

中图分类号 TP393 文献标识码 A

MFALM: An Active Localization Method for Dynamic Underwater Wireless Sensor Networks

YANG Kui-wu¹ GUO Yuan-bo¹ WEI Da-wei¹ JIN Yong-gang²

(Electronic Technology Institute of Information Engineering University, Zhengzhou 450004, China)¹

(PLA 72506, Henan 463200, China)²

Abstract We studied several fundamental key issues of localization in underwater sensor networks(UWSNs), then proposed an multi-frequency active localization method(MFALM) based on the time difference on arrival(TDOA) for UWSNs. The method, which is event-driven, divides all the nodes into three groups: buoy nodes, relay nodes, and ordinary nodes. To guarantee the low-power and effectiveness of communication, the nodes communicate with each other by two types of frequencies: low frequency and high frequency, the former is used in long distance communication, while the latter is used in short distance. In addition, package formats for communication between nodes were defined, which make the packages short and can reduce the costs of sensor nodes in localization. Analysis shows that our method, which has the characteristics of event-driven, reduced packages and multi-frequency, has low communication cost and can extend the network lifetime.

Keywords Wireless sensor network, Underwater localization, TDoA

1 引言

水下传感器网络^[1,2](UWSNs, Underwater Wireless Sensor Networks)作为一种非常理想的分布式监测系统被广泛应用于水域环境的科学探索、商业开发和水体保护等很多领域。近几年关于UWSNs的研究也逐渐成为热点,并取得了许多研究成果。对于UWSNs,定位服务通常是一个重要内容,比如对水下潜艇的跟踪监测就需要实时地将潜艇的位置信息进行上报。虽然在陆基传感器网络中定位技术已经做了大量卓有成效的研究,但是由于UWSNs与陆基传感器网络所处的应用环境不同,使得已有的定位技术很难应用在UWSNs系统当中^[3]。本文在对UWSNs的特点及已有的定位方法进行分析研究的基础上,给出了一种水下动态传感器网络主动定位方法。该方法不但能够减少节点的定位开销,延长网络生命,同时能够适应节点动态移动的场景。

2 UWSNs的特殊性

水域环境占地球表面的79%,因此UWSNs有着广阔的应用前景。然而之所以UWSNs定位技术的研究较陆地定位技术迟缓,主要是由水域环境相对于陆地环境的特殊性造成的。这些特殊性主要有:

1)无线电不适用性。水下信息的传送主要是通过声音信号来完成的,这主要是因为无线电信号在水中传播时会产生快速的衰减^[4],因此类似于GPS的定位系统无法在水下应用,也使得水下传感器各节点间的时间同步很难实现。

2)信道的恶劣性。声音信号的水下传播会受到很多影响,比如水面和海床对信号的反射会产生多径效应,加大信号接受难度;海洋深处环境噪声会对信号产生严重干扰;节点移动速度相对于声音信号传播的速度(1500m/s)较快,从而产生多普勒效应;声波传送时延较大,不利于动态的定位;同

收稿日期:2009-02-18 返修日期:2009-04-22 本文受 863 高科技研究发展计划(2007AA01Z405),国家自然科学基金(60503012)资助。

杨奎武(1978-),男,硕士,讲师,主要研究方向为无线通信系统安全,E-mail: yangkuiwu@yahoo.com.cn;郭渊博(1975-),男,博士,副教授,主要研究方向为信息安全;韦大伟(1965-),男,副教授,主要研究方向为计算机应用。

时信号在水中严重衰落也使得 DV-distance^[5]等信号处理技术很难应用。

3)节点的移动性。在水流、洋流的影响下,UWSNs节点处于位置不固定状态,因此节点的定位计算需要不断地进行,这就使得能量受限的传感器网络不适合布置于水下,也使得一些适用于非移动场景的定位技术(如 APIT)无法在水下应用。

4)布置的松散性。由于 UWSNs 节点在设计及封装过程都需要一些较高的技术,从而使得其成本往往要高于陆地上的传感器节点,因此不宜在水下密集部署,从而使得一些适用于密集部署的定位算法(如 DV-hop)也不适用于水下应用。

5)带宽的有限性。由于声音信号频率越高,在水中的衰减越严重,因此在水下进行高速数据传送要受到传送距离的限制。表 1^[6]给出了信号带宽与传输距离的对应关系,可见随着频率降低,传送的距离越远。

6)能量消耗特殊性。无线电信号的发送和接收所需要消耗的能量基本上相同,而水下声信号在发送时消耗的能量常常近百倍于接收信号所需的能量^[11],因此频繁的广播式的被动定位方式^[7]不适合水下应用。

表 1 水下声信号带宽和传送距离的关系

	Range[km]	Bandwidth[kHz]
Very long	1000	<1
Long	10~100	2~5
Medium	1~10	~10
Short	0.1~1	20~50
Very short	<0.1	>100

3 TDoA 定位算法介绍

TDoA 定位算法具有精度高、定位快的特点,并广泛应用于传感器网络定位技术当中。从图 1 可以看到,空间中有 A, B, C, D, E 5 个点,其中 A, B, C, D 4 个点的坐标已知,分别为 $(x_a, y_a, z_a), (x_b, y_b, z_b), (x_c, y_c, z_c), (x_d, y_d, z_d)$; E 点坐标 (x, y, z) 未知,但 $z > \max(z_a, z_b, z_c, z_d)$ 。设空间中信号传播速度为 v , A, B, C, D 4 个点同一时刻向 E 发送信号, E 接收到来自各点信号的时间分别为 t_a, t_b, t_c, t_d ($t_a < t_b < t_c < t_d$)。由此可得

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 + (z-z_a)^2} - \\ & \sqrt{(x-x_b)^2 + (y-y_b)^2 + (z-z_b)^2} = v(t_b - t_a) \\ & \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 + (z-z_a)^2} - \\ & \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 + (z-z_c)^2} = v(t_c - t_a) \\ & \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 + (z-z_a)^2} - \\ & \sqrt{(x-x_d)^2 + (y-y_d)^2 + (z-z_d)^2} = v(t_d - t_a) \end{aligned}$$

$$z > \max(z_a, z_b, z_c, z_d)$$

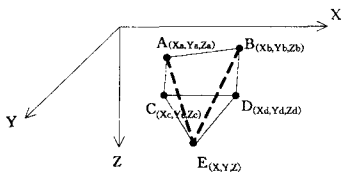


图 1

由上面 4 个条件即可求出 E 点的坐标。白^[8]给出了详细的计算方法。

4 MFALM 网络模型

图 2 是水下动态主动定位方法传感器网络模型。在一个传感器网络感应区域内(sensor field)随机分布着多个普通节点(ordinary nodes)和少量的中继节点(relay nodes),水面上分布着一些能够提供定位信息的信标节点(buoy nodes)(最少 4 个)。

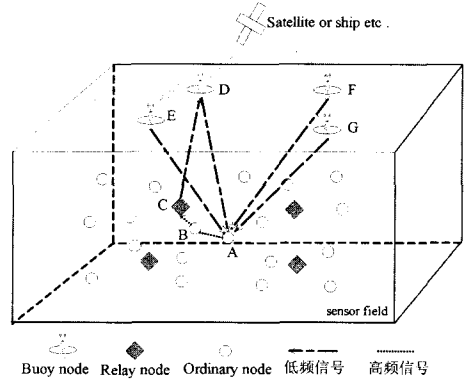


图 2 水下传感器网络模型

在网络模型中假设:(1)整个系统以两种声波频率进行通信,低频率用于远距离定位信息的收发(如 3.5kHz 条件下通信距离可达十几公里),其通信范围覆盖整个感应区域;高频率用于节点间的信息转发(如 44.62kHz 条件下通信距离仅有近百米),通信范围小。(2)buoy 节点漂浮于水面上方,自身具有 GPS 定位系统和发电系统,其水下部分带有声波信号收发器;GPS 定位系统为 buoy 节点提供即时的定位信息和严格的时间同步信号;发电系统(如太阳能发电装置)为其提供不间断的能量来源;声波信号收发器可以实现低频率的声波信号的收发,所以 sensor field 内所有节点都可以接收到 buoy 节点的定位信息。(3)relay 节点具备较强的能量储备,不但可以以低频声波信号与 buoy 节点和其它 relay 节点通信,还可以与 ordinary 节点利用高频声波信号进行通信。relay 节点在完成 ordinary 节点报告信息转发的同时,也完成与 ordinary 节点一样的监测功能。(4)ordinary 节点可以接收低频信号和发送高频信息,它主要完成网络的监测。平时 ordinary 节点处于睡眠模式,一旦有事件发生,ordinary 节点便打开低频接收机,接收 buoy 节点的定位信息,并采用 TdoA 方法进行自身位置的运算,最后将自身位置和事件用高频广播出去。彼此相邻的 ordinary 节点之间可以用高频声波信号直接通信,不相邻的节点之间以 hop-by-hop 方式交换数据。(5)系统布置时使 relay 节点和 ordinary 节点都具有精准的同步时钟。

5 MFALM 定位方法

动态传感器网络不同于静态传感器网络,其网络中各节点的位置是随时变化的,某一时刻的位置信息不能作为下一时刻的参考,且通常情况下只有网络中监测到事件发生的传感器节点的位置信息对系统来说是有用的,从而定位方法只需确定监测到突发事件的传感器节点的位置,没有必要对网络中所有的节点进行定位,因此很多先应式定位方式^[9,10]不能有效地应用于动态传感器网络。为此提出一种基于到达时间差(TDoA)的多频动态传感器网络主动定位方法。下面给

出该定位方法的详细设计并对其进行分析说明。定位过程主要分为以下几步：

1) relay 节点和 ordinary 节点位置的确定。系统部署完成后, buoy 节点根据 GPS 信号首先确定自身位置。由于各 buoy 节点之间可以达到严格的时间同步, 因此接下来所有 buoy 节点周期性地同时向感应区域利用低频声波信号发送系统定位数据包, 系统定位数据包 (SLP, system localization package) 格式如图 3 所示。信源域 (SID) 标识信息发送节点的全局唯一身份; 类型域 (Type) 标识该数据包的类型 (此处是系统定位数据包 SLP); 信宿域 (DID) 标识信息接收者的全局唯一身份 (对于广播信息可以将该域置全 0 或全 1 等特定值); 时间戳域 (TimeStamp) 标识数据包发送的准确时间; 位置信息域 (Position Info) 给出 buoy 节点的 GPS 位置信息。relay 节点和 ordinary 节点接收到来自各 buoy 节点的系统定位数据包后, 利用 TDoA 算法即可求得自身的物理位置。如果接收到来自更多 buoy 节点的系统定位数据包, 则可以对多个计算结果进行平均, 从而更加精确地求得自身物理位置。通常为了节约能量, 位置信息的计算只有在事件发生时才进行。

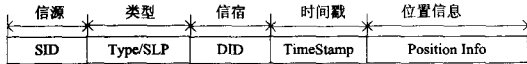


图 3 SLP 数据包格式

2) 最大跳数 (Max Hops) 值的估计。所有 relay 节点通过低频交换彼此的位置信息, 然后通过图算法把监测区域分为多个定位参考域, 每个域以一个 relay 节点为中心, 每个定位参考域的体积除以 ordinary 节点的平均密度作为该定位参考域的最大跳数 (Max Hops)。relay 节点计算出该值后把它广播出去, ordinary 节点把自己归入最早收到的 Max Hops 值的定位参考域中。由于水下是动态环境, 因此最大跳数的广播需要定期进行, 以便于 ordinary 节点进行修正。最大跳数广播数据包 MHN (Max Hops Number) 格式如图 4 所示。

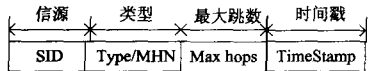


图 4 MHN 数据包格式

3) 信息上报。监测到突发事件的 ordinary 节点, 打开低频接收设备, 接收来自 buoy 节点的定位信息, 并根据定位信息利用 TdoA 算法完成自身位置的计算, 同时打开高频发送设备将事件和自身位置信息 (信息报告数据包) 进行广播。信息报告数据包 (MRP, message report package) 格式如图 5 所示。信源域 (SID) 标识检测到事件发生的 ordinary 节点的全局唯一身份; 类型域 (Type) 标识该数据包的类型 (此处为信息报告数据包 MRP)。最大跳数 (Max Hops) 域为信息上报数据包设置一个传递的最大跳数, 具体值由上一步得到。信息上报数据包以广播的方式在网络中扩散, 所有接收到 MRP 的 ordinary 节点都需要中继该包, 并将 Max Hops 值减 1。当 MRP 在网络中传播时, Max Hops 值为 0 或遇到 relay 节点时 MRP 的传递被终止。时间戳域 (TimeStamp) 给出信息上报的时刻; 信息域 (Info) 包含一些对监测到的事件的描述和位置信息的描述, 它随应用的不同而变化, 这个域是可选的。

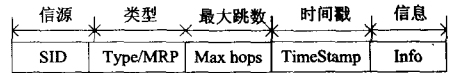


图 5 MRP 数据包格式

4) 信息确认。接收到 MRP 数据包的 relay 节点, 将这一定位请求通过低频广播送给 buoy 节点, 从而对信息进一步处理。最先接收到该信息的 buoy 节点将上报信息的节点发送应答 (ACK) 包。上报信息的节点收到应答包后恢复睡眠状态, 直到再次被事件唤醒。应答包格式如图 6 所示, 类型域标识该包是 ACK 定位确认包, DID 域给出信息的目的 ordinary 节点, 其它节点丢弃该包。TimeStamp 给出 buoy 节点发送 ACK 包的准确时间, Info 给出 buoy 节点对报告的确认信息 (比如声明是对哪个报告的应答)。



图 6 ACK 数据包格式

5) 结束。发送 MRP 数据包的 ordinary 节点在接收到 buoy 节点送来的 ACK 包后, 转换到睡眠状态, 直到被事件再次唤醒。详细的事件报告和定位过程用图 1 中所示的 A->B->C->D 这一过程表示。

6 MFALM 定位方法性能分析

1) 能耗。为了降低 ordinary 节点能耗, 延长网络寿命, 该定位方法采用以下措施降低节点能耗: (1) 事件驱动的定位方式, 也就是只有在需要进行定位的情况下才进行定位计算, 与先应式定位方式相比大大降低了节点的能耗; (2) 由于水下环境中发送功率要远远大于接收功率, 因此为了节约 ordinary 节点功耗, 在整个定位过程 ordinary 节点仅发送一条 MRP 数据包即可进行事件报告。 (3) 为了限制 MRP 包的传播范围, 利用 Max Hops 设置一个最大跳数, 从而使得数据包不能无限制传播, 延长了网络寿命。 (4) 时间戳域 (TimeStamp) 的设定使得各转发节点可以放弃已经转发过的报文, 防止对同一报文的重复响应, 从而节约转发节点的能量。 (5) 可以通过调节 Max Hops 的值来对系统的功耗进行优化。图 7 给出了在均匀分布条件下每一个定位请求信息被转发的次数同 Max Hops 之间的关系。可见 Max Hops 越大, 节点在转发报文过程中耗费的能量就越多。因此, 在实际设计过程中, 要在 relay 节点密度和 Max Hops 值之间进行综合考虑。

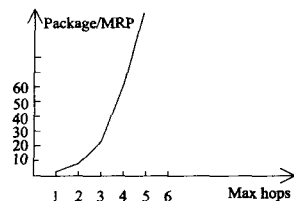


图 7 Max Hops 和转发报文 Package 关系图

2) 定位精度。由于 ordinary 节点的定位信息直接来自具有准确位置信息的 buoy 节点, 在精确测得水下声波传递速度和温度、盐度等关系后, 该定位方法可以达到较高的定位精度, 且在 buoy 节点越多的情况下定位精度越准确。

3)节点密度。为了能够使得网络容易部署,系统采用了两种通信频率,因此只需要对通信频率进行调节(就是调节通信距离)就可以使得网络节点密度达到可调节的效果,可以针对不同的应用场合进行网络部署。

结束语 MFALM 定位方法是一种适用于水下部署的动态传感器网络定位算法,具有能耗低、网络寿命长、定位精确度高、节点密度可调节等优点,可以应用于诸如生物科学、潜艇探测等多种水下定位场景。需要注意的是,Max Hops 的取值与节点密度和 relay 节点的数量有关,较好地设置 Max Hops 的取值,可以有效地提高网络寿命。同时,水下环境的反射、多径、噪声、多普勒效应等现象会对定位精度产生较大影响,因此需要考虑对这些不良情况的克服方法。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks[J]. ACM SIGBED Review, 2004; 3-8
- [2] Cui J-H, Kong J, Gerla M, et al. Challenges: building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications[J]. IEEE Network, Special Issue on Wireless Sensor Networking, 2006; 12-18
- [3] Chandrasekhar V, Seah W K G, Choo Y S, et al. Localization in Underwater Sensor Networks- Survey and Challenges [C] //

- Proc. ACM WUWNet. Los Angeles, CA, USA, Sep. 2006; 33-40
- [4] Heidemann J, Ye W, Wills J, et al. Research challenges and applications for underwater sensor networking [C] // Proc. IEEE WCNC. Las Vegas, NY, USA, 2006, 1: 228-235
- [5] Niculescu D, Nath B. DV Based Positioning in Ad Hoc Networks [J]. Telecommunication Systems, 2003, 22(1-4): 67-280
- [6] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks; research challenges [J]. Ad Hoc Networks (Elsevier), 2005, 3(3): 257-279
- [7] He T, Huang C, Blum B M, et al. Range - Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks [C] // Proc. ACM MOBICOM. San Diego, CA, USA, Sep. 2003; 81-95
- [8] 白菊蓉. 第五站对空间四站 TDOA 定位中的模糊影响 [J]. 西安邮电学院学报, 2007, 12(1): 12-15
- [9] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices [J]. IEEE Personal Communications Magazine, March 2000; 28-34
- [10] Niculescu D, Nath B. DV based positioning in ad hoc networks [J]. Journal of Telecommunication Systems, 2003, 22(1-4): 267-280
- [11] Partan J, Kurose J, Levine B N. A survey of practical issues in underwater networks [C] // WUWNet '06: Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks. 2006; 17-24

(上接第 110 页)

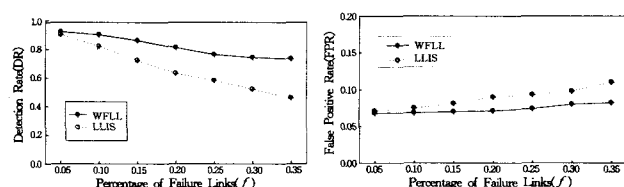


图2 f 变化时 DR 性能变化趋势 图3 f 变化时 FPR 性能变化趋势

结束语 故障管理的机制和方法是无线传感器网络管理中的重要组成部分。失效链路是无线传感器网络中故障的主要形式,研究其发现与定位的机制和方法有着重要意义。本文采用二元分离模型描述链路失效现象,基于简单网络断层扫描技术将失效链路定位问题归类为最大后验估计问题,通过分析、推导将失效链路定位问题映射为加权最小集合覆盖问题,提出了一种基于启发式策略的失效链路定位算法。通过仿真实验证明了算法的有效性。

参考文献

- [1] Paradis L, Han Qi. A survey of fault management in wireless sensor networks [J]. Journal of Network and Systems Management, 2007, 15(2): 171-190
- [2] Hartl G, Li Baochun. Loss inference in wireless sensor networks based on data aggregation [C] // Proceedings of the Third IEEE/ACM International Symposium on Information Processing in

- Sensor Networks (IPSN 2004). April 2004
- [3] Mao Y, Kschischang F R, Li Baochun, et al. A factor graph approach to link loss monitoring in wireless sensor networks [C] // IEEE JSAC, Special Issue on Self-Organizing Distributed Collaborative Sensor Networks. April 2005
- [4] Coates M, Hero A, Nowa K R, et al. Internet tomography [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19
- [5] Padmanabhan V N, Qiu L, Wang H J. Server-based inference of internet performance [C] // Proceedings of the IEEE INFOCOM'03. San Francisco, CA, April 2003
- [6] Nick D. Simple network performance tomography [C] // Proceedings of the IMC'03. Miami Beach, Florida, October 2003
- [7] Duffield N G. Network tomography of binary network performance characteristics [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12): 5373-5388
- [8] Nguyen H X, Thiran P. Using end-to-end data to infer lossy links in sensor networks [C] // Proc. of IEEE INFOCOM. 2006
- [9] Karp R M. Reducibility among combinatorial problems [M]. Complexity of Computer Computations. New York: Plenum Press, 1972
- [10] Zhao Jerry, Govindan R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks [C] // SenSys'03: Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. 2003