

三维水声传感器网络中高效路由协议的研究

徐 明 刘广钟

(上海海事大学信息工程学院 上海 201306)

摘 要 近年来,三维水声传感器网络在学术界和工业界引起了极大的关注。在被监测海域部署三维水声传感器网络,可以解决二维水声传感器网络节点无法充分观测的问题。为了实现三维水声传感器网络在新环境中的水下监测,需要解决一系列的问题。其中,由于监测区域环境的限制以及水声传感器节点的特殊性,需要设计高效的路由协议来保证数据包在各节点之间正确转发。首先提出一种基本地理位置路由协议。在此基础上,设计一种自适应路由协议,以较好地适应三维水声传感器网络中部分节点失效的情况。通过仿真实验发现,自适应路由协议可以在数据包传送率、端到端延时和网络吞吐量指标上达到平衡,而基本地理位置路由协议在端到端延时指标上可获得更好的性能。

关键词 水声传感器网络,三维,路由协议

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Research on Efficient Routing in Three-dimensional Underwater Acoustic Sensor Networks

XU Ming LIU Guang-zhong

(College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract The area of three-dimensional (3D) underwater acoustic sensor networks (UW-ASNs) have attracted significant attention recently from both academia and industry due to its applications in detecting and observing phenomena that cannot be adequately observed by means of two-dimensional ocean bottom underwater acoustic sensor nodes. Many problems arise with 3D UW-ASNs that need to be solved in order to enable underwater monitoring in the new environment. Among them, providing efficient routing is very challenging due to the unique characteristics of 3D UW-ASNs. We proposed a geographic based routing protocol and a self-adaptive routing protocol which is adaptative to 3D UW-ASNs with incomplete sets of failure nodes. The simulations demonstrate that our self-adaptive routing protocol can achieve a good trade-off among packet delivery ratio, end-to-end delay and network throughput, while our basic geographic routing protocol can get a good performance in average end-to-end delay.

Keywords Underwater acoustic sensor networks, Three-dimensional, Routing protocol

1 引言

水声传感器网络是一门新兴的网络技术,是无线传感器网络在水下的一种应用。目前,水声传感器网络在海洋环境监测、水下导航和水下预警等领域有着广泛的应用^[1,2]。为了适应水下环境,水声传感器网络节点用自组织和自制的方式组网,通过节点之间的协同工作来完成给定的监测任务。由于地面传感器网络中使用的高频无线电信号进入水下以后会迅速被水吸收,因此,水声传感器网络主要依靠水声的方式进行通信。从拓扑结构上来说,水声传感器网络可以分为二维网络和三维网络^[3,4]。二维水声传感器网络主要由固定在同一深度(例如海底)的传感器节点构成,用来监测某一特定的水平面,其拓扑结构更接近于陆上传感器网络。三维水声传感器网络中的节点存在于不同的深度,用来探测和观察二维水声传感器网络不能充分观察到的现象。文献[5]研究了

三维网络图的探测范围和通信范围问题。可达网络图的直径、最小度、最大度与节点的通信距离有关,三维网络空间环境的覆盖度与节点的探测距离有关。在三维结构中,漂浮在不同深度的水声传感器在观测过程中会遇到节点的连续移动以及三维拓扑结构改变等问题^[6,7]。此外,由于水下信道的复杂性,传感器节点之间的链路质量受到环境噪声等干扰,严重影响了水声传感器网络的数据传输速率、通信信道的可靠性和网络吞吐量^[8]。因此,陆上传感器网络以及传统的 Ad hoc 网络中,许多研究成果无法直接应用于水声传感器网络中,这就要求必须针对水声传感器网络的新特性来设计新的路由协议,以保证在数据包传送率、端到端延时和网络吞吐量等指标上达到符合实际需要的性能要求。

传染性路由(Epidemic Routing, ER)协议^[9]采用“存储-携带-转发”的模式,即节点存储接收到的数据包,并在移动时携带,当遇到新节点时转发数据包。与传染性疾病的传播类

到稿日期:2011-12-11 返修日期:2012-04-18 本文受上海市科学技术委员会浦江人才计划项目(11PJ1404300),上海海事大学科研基金项目(20110049),上海市智能信息处理重点实验室开放课题(IPL-2011-008)资助。

徐 明(1977-),男,博士,讲师,主要研究方向为 P2P 网络、水声传感器网络、Agent 理论与技术, E-mail: mingxu@shmtu.edu.cn; 刘广钟(1962-),男,博士,教授,主要研究方向为计算机网络技术、水声通信技术、网格计算、CIMS 技术、分布式数据库等。

似,每次携带数据包的节点遇到新的不包含该数据包的节点时,携带节点就传送一份数据包来“感染”新节点。然后,新感染的节点用同样的模式继续感染其它节点。目的节点第一次遇到感染节点时,接收数据包。传染性路由协议可以利用每一个机会将数据包转发到目的节点。在不受约束的网络环境下,可以达到最大的数据包传送率。但是,由于传染性路由消耗的资源过多,使得该协议无法适用于资源有限的网络,例如水声传感器网络。定向扩散路由协议(Directed Diffusion)^[10]是一种基于数据的、查询驱动的路由协议。为建立路由,汇聚节点向网络广播一个兴趣包(包含属性列表、上报间隔、持续时间、地理区域等信息),沿途节点按需对各兴趣包进行缓存与合并,并根据兴趣包计算、创建包含数据上报率、下一跳等信息的梯度(Gradient),从而建立多条指向汇聚节点的路径。然后,根据收到数据包的质量,确定一条从汇聚节点到源节点的优化路径。定向扩散路由协议适用于动态性较小的网络环境,这种网络中大多数节点是静止的,因此转发路径相对稳定。但是,如果把定向扩散应用到水声传感器网络中,由于水声通信网络节点的移动性,它将会消耗大量的资源来维持转发路径。并且,数据聚合过程中需要采用时间同步技术,因此会带来较大的网络时延。此外,定向扩散路由协议中梯度建立的开销也很大,不适合包含多汇聚节点的水声传感器网络。文献[11]提出一种基于矢量的转发协议(Vector-Based Forwarding, VBF)。在VBF中,路径被指定为一个矢量,靠近路由矢量的节点将转发数据包。算法具有开销少、能量有效、传输成功率高和端到端传输延时低等特点。但是该算法需要事先确定一个路由“管道”半径,这使得算法在具体的应用中,要求由用户来设置路由“管道”半径,很不方便。

本文提出一种基本地理位置路由协议(BGR)和自适应路由(SAR)协议。在基本地理位置路由协议中,每个传感器节点将三维的水下空间划分为8个区域。每个节点根据与各自邻居节点之间连线的夹角以及目标节点的地理位置信息来决定转发数据包的候选节点。然后,本文在基本地理位置路由协议基础上设计了一种自适应路由协议,其可以较好地适应三维水声传感器网络中部分节点失效的情况。

2 系统体系结构

本文假设所有的传感器节点都可以通过某种定位服务得知该节点的三维位置信息,这种假设在水声传感器网络中是合理的^[12]。首先,通过将一部分水声传感器节点固定在水底可以得到这些节点的位置信息。其次,对于移动的水声传感器节点可以通过配备内置的导航系统来获取位置信息。由于节点会发生漂移现象,因此节点的位置信息会随着时间的改变而发生变化。本文假设每个水声传感器节点只保存本地节点和目标节点的位置信息,而这些目标节点就是分布在水面上的一个或者多个汇聚节点。

本文的路由协议构建在文献[13]提出的基于P2P的水声传感器网络协作平台基础上。该协作平台包含水声传感器节点、中继节点、汇聚节点和P2P节点。水声传感器节点部署在监测区域,负责数据采集、处理和通信等工作。每个水声传感器节点拥有两个数据通讯接口,其中一个接口是水声通信接口,通过水声换能器与其它水声传感器节点进行数据通信;另一个接口可以通过CAN(Controller Area Network,控

制器局域网)总线或者UART(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter,通用异步接收/发送装置)连接中继节点。水声传感器节点在进行正常水声通信传输数据的同时,将节点的状态和水声通信的数据交付给中继节点。中继节点的使用使得水面监控设备和水下节点之间摆脱了线缆的束缚,方便了水声传感器的布放与控制,提高了水声传感器网络的结构完整性和鲁棒性,并扩大了监测范围。中继节点通过无线通信的方式将信息发送到汇聚节点上。最后,汇聚节点通过串口方式与P2P节点进行通信,将各个水声传感器节点采集到的数据信息连续不断地汇总到P2P节点上,形成数据流。数据流到达P2P节点后将被调度器放入相应的队列,由多线程操作处理器进行处理,并把处理结果送到路由选择器,由其决定数据的走向;传给存储管理器进行归档处理或者输出。性能检测器不断地对输出性能进行检测,如果性能过低,则通知负载均衡器,负载均衡器就采取措施减轻系统负载直到达到标准。由于数据流到达P2P节点上的速率是动态变化的,因此即使某一节点的平均负载不是很高,但在峰值期间,一个节点将有可能遇到暂时的负载峰值,其数据处理的等待时间会受到影响。故,为了使数据处理时间最小化,需要使用负载均衡策略来避免暂时过载。

考虑一个由 n 个分布在监测区域的水声传感器节点组成的三维水声传感器网络 $G(V, E)$,其中 V 是节点集, E 是边集。这些水声传感器节点相对于水声信号传播速度而言具有较低的移动性。给每个水声传感器节点都分配一个三维坐标 (x, y, z) ,并且这些节点都具有相同大小的水声通信半径 r 。

定义1 三维欧拉空间中任意两个节点 n_u 和 n_v 之间的距离由函数 $\delta(u, v)$ 给出:

$$\delta: N \times N \rightarrow \Gamma; \delta(u, v) = \sqrt{(u_x - v_x)^2 + (u_y - v_y)^2 + (u_z - v_z)^2} \quad (1)$$

当 n_u 和 n_v 之间的欧拉距离小于 r 时,则 n_u 和 n_v 成为邻居节点,并且 n_u 和 n_v 之间存在一条链路。考虑用相关邻近图(Relative Neighborhood Graph, RNG)^[14]来构造网络拓扑结构,则节点 n_u 和 n_v 相邻的充分必要条件是:对RNG中任一节点 n_p ,都有 $\delta(u, v) \leq \max\{\delta(p, u), \delta(p, v)\}$ 。对于一个三维欧拉空间嵌入,如果由两个以 n_u 和 n_v 为中心的球体(半径为 $\delta(u, v)$)的交集形成的弓形区域为空,则 n_u 和 n_v 相邻。RNG算法简单,可以看作寻找相对较近的节点配对,易于用分布式方法构造。如果按照定义构造RNG,需要的时间复杂度为 $O(n^3)$ 。而从三角剖分图(Delaunay Triangulation Graph)构造RNG需要的复杂度下界为 $O(n \log n)$ ^[15]。文献[16]还给出了三维空间的RNG计算方法,其复杂度为 $O(n^2)$ 。

考虑两个最小跳数距离 h 上的节点 n_u 和 n_v ,存在阈值 $u(h)$ 和 $v(h)$ 使得 $u(h) \leq \delta(u, v) \leq v(h)$ 。其中,阈值的大小依赖于水声传感器网络的节点密度 ρ ,并且对任意 $h > 0$ 存在:

$$\lim_{\rho \rightarrow \infty} v(h) - u(h) = r \quad (2)$$

定义2 给定源节点 n_u 和目标节点 n_v ,则传感器模型定义为:

$$s(u, v) = \frac{\lambda}{\delta(u, v)^k + \epsilon} \quad (3)$$

式中, $\lambda > 0$ 并且 $\epsilon > 0$ 。 λ 代表水声信号幅值, k 是传感器参数, ϵ 是一个预定义参数,用来处理源节点和目标节点位置相

同的情况。

水声传感器节点发出的数据包用以下的六元组来表示： $\langle \text{SenderID}, \text{SeqNo}, \text{State}, \text{Hops}, \text{DestID}, \text{Data} \rangle$ 。其中， SenderID 是创建该数据包的水声传感器节点的标识符； SeqNo 代表数据包的序列号，由创建该数据包的水声传感器节点分配； State 表示数据包的当前状态；包括初始状态、转发状态和终止状态； Hops 用来定义数据包的生命周期，当消息从一个节点传递到另一个节点时， Hops 的值增加 1，为了控制数据包的传递次数，避免带来过大的带宽消耗，需要设定数据包生命周期的上限值； DestID 表示目标节点的标识符； Data 域包含该数据包中所存储的数据信息。

图 1 描绘了一个虚拟的三维坐标系。图中的黑色实心圆圈代表水声传感器节点。从水声传感器节点的视角将三维空间分为 8 个区域，名称分别为 D_1, D_2, \dots, D_8 。图中节点 n_s 的邻居节点包括 n_i, n_j 和 n_k ，而 n_t 则是目标节点。在实际的路由过程中，可以根据当前节点、邻居节点以及目标节点在三维空间中的位置来决定路由方向。每个水声传感器节点都存储了邻居节点的位置信息和度数信息，接收到数据包的节点将建立本地虚拟三维坐标系来指导路由。

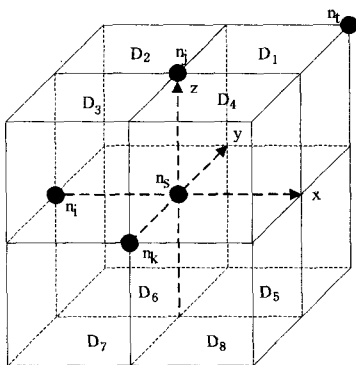


图 1 虚拟三维坐标系

3 路由协议

由于监测区域环境的限制，针对水声传感器网络的路由协议具有自身的特殊性。首先，水声传感器网络节点的计算能力、存储能力和通信能力相对较弱，因此，在其上不能实现非常复杂的路由协议。其次，水声传感器网络以数据为中心，这与传统网络根据节点编址选择路径不同。最后，水声传感器网络的路由协议最好能够处理因节点失效、节点移动以及节点能量耗尽而引起的链路中断。

算法 1 基本地理位置路由协议

输入：源节点 n_s ，目标节点 n_t ；

输出：优化路由路径 p ；

1. $p \leftarrow \Phi$ ；// 路由路径 p 初始化
2. $p \leftarrow n_s$ ；
3. $\delta_{\max} \leftarrow \max\{\delta(s, i) | (n_i \in \text{NE}(n_s))\}$ ；
4. if $\cos(\angle \text{T SJ}) \cdot (\delta(s, j) / \delta_{\max}) \cdot d_j$ 最大 then
5. $p \leftarrow n_j$ ；
6. 重复步骤 3、步骤 4 直到 n_t 被选作转发路由的候选节点；
7. $p \leftarrow n_t$ ；
8. return p ；

算法 1 描述了本文提出的基本地理位置路由协议。每个节点的传送半径取默认值。其中，第 3 行中的 $\text{NE}(n_s)$ 代表 n_s

的邻居节点集。第 4 行中的 $\cos(\angle \text{T SJ})$ 代表 n_s 到 n_t 之间的连线与 n_s 到 n_s 的邻居节点 n_j 之间连线夹角的余弦值， d_j 代表节点 n_j 的度数。该算法首先计算 n_s 到 n_s 各邻居节点之间的距离，并由此得到最大距离 δ_{\max} ；然后，计算 n_s 到 n_t 之间的连线与 n_s 到 n_s 邻居之间连线夹角的余弦值；最后，考虑将邻居节点的度数作为决定转发路由的候选节点的因素之一。算法 1 虽然可以建立一条较为优化的路由路径，但是并没有涉及到水声传感器网络中节点失效的情况。

算法 2 自适应路由协议

输入：源节点 n_s ，目标节点 n_t ；

输出：优化路由路径 p ；

1. $p \leftarrow \Phi$ ；// 路由路径 p 初始化
2. $p \leftarrow n_s$ ；
3. 执行算法 1(基本地理位置路由协议)；
4. bool flag=false；
5. for all ($n_i \in \text{NE}(n_s)$ and $n_i \in \text{Dt}$) do
// $\text{NE}(n_s)$ 是 n_s 的邻居节点集， Dt 是 n_t 所在的区域
6. if n_t 可以到达 then
7. flag=true；
8. break；
9. end if
10. end for
11. if flag then
12. 将数据包转发给 n_i ；
13. $p \leftarrow n_i$ ；
14. 执行 n_i 到 n_t 的路由；
15. else 将 n_s 的传送半径调至最大值；
16. 计算 $\delta(s, t)$ ；
17. if $\delta(s, t) \leq n_s$ 的最大传送半径 then
18. $p \leftarrow n_t$ ；
19. return p ；
20. else if $n_i \in \text{NE}(n_s)$ and n_i 是 n_s 的“邻居的邻居”节点 then
21. 将数据包转发给 n_i ；
22. $p \leftarrow n_i$ ；
23. else 执行 n_s 到 n_j 的路由；
24. end if
25. end if
26. 执行 n_i 到 n_t 的路由；
27. return p ；
28. else return Φ ；
29. end if

算法 2 描述了本文提出的自适应路由协议。在该协议中，节点可以根据需要调整传送半径。此外，还在成功路由路径中的每个节点存储一个“邻居的邻居”节点位置信息。算法 2 的第 1 行至第 3 行，根据基本地理位置路由协议来建立一条较为优化的路由路径。如果在路由过程中某个待转发节点发现该路径上的邻居节点失效，则将数据包转发给该邻居节点所在区域的其它节点；如果该邻居节点所在区域的节点全部失效，则将待转发节点的传送半径调至最大值，如第 4 行至第 15 行所示。算法 2 的第 16 行至第 19 行根据节点调整后的传送半径来决定将数据包转发给目标节点还是“邻居的邻居”节点。如果目标节点和“邻居的邻居”节点都无法直接到达，则先执行该节点到“邻居的邻居”节点之间的路由，然后执行“邻居的邻居”节点到目标节点的路由，如算法 2 的第 20 行至第 29 行所示。

从本质上来说,自适应路由协议是通过增强数据包持有节点传送半径的方式或者将数据包转发给失效节点的“邻居的邻居”节点从而改变路由路径的方式来绕过失效节点的。

图2是描绘通过增强节点的传送半径来绕过失效节点的示意图。其中, n_s 是当前持有数据包的节点, n_i 、 n_p 和 n_u 是 n_s 的邻居节点, n_s 可以通过路径 (n_s, n_i, n_j, n_t) 、路径 (n_s, n_p, n_j, n_t) 或者路径 (n_s, n_u, n_v, n_t) 到达目标节点 n_t , 对于不同的成功路径, n_s 可以有不同的“邻居的邻居”节点。当节点 n_i 、 n_p 和 n_u 失效后, n_s 将传送半径调至最大值。如果调至最大值后的传送半径可以增大为原传送半径的 $\sqrt{2}$ 倍, 则节点 n_j 、 n_v 和 n_q 成为 n_s 的新邻居节点, n_s 可以通过路径 #1 (n_s, n_j, n_t) 、路径 #2 (n_s, n_v, n_t) 或者路径 #3 (n_s, n_q, n_t) 将数据包转发到目标节点 n_t 。如果调至最大值后的传送半径可以增大为原传送半径的 $\sqrt{3}$ 倍, 则 n_s 可以将数据包直接传送到目标节点。

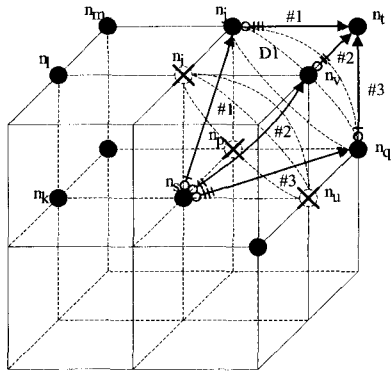


图2 通过增强节点传送半径来绕过失效节点

图3是描绘通过改变路由路径来绕过失效节点的示意图。当节点 n_s 的邻居节点 n_i 、 n_p 和 n_u 失效后, 如果 n_s 将传送半径调至最大值后还无法达到目标节点或者“邻居的邻居”节点, 则 n_s 需要先执行到“邻居的邻居”节点 n_j 的路由, 然后执行 n_j 到目标节点 n_t 的路由, 即通过图中的路径 #4 $(n_s, n_k, n_l, n_m, n_j, n_t)$ 到达目标节点。

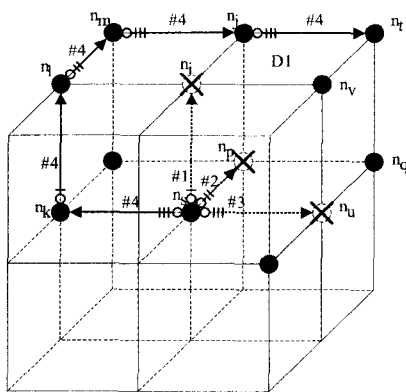


图3 通过改变路由路径来绕过失效节点

4 模拟实验与性能分析

本文采用 Aqua-Sim^[17] 作为评测路由协议的模拟器。Aqua-Sim 是构建在 NS-2 网络平台基础上的水声传感器网络模拟器, 它可以模拟水声信号的传播与衰减以及水声传感器网络中数据包的转发与碰撞。

表1给出了本文的实验参数与默认值。此外, 本文将根

据以下指标来评价传染性路由协议(ER)、基本地理位置路由协议(BGR)和自适应路由协议(SAR)的性能。

(1)数据包传送率, 即汇聚节点成功接收到的不同数据包的数量与源节点发送的数据包总数之间的比率。如果一个数据包多次到达汇聚节点, 则视为成功接收一个不同数据包。

(2)平均端到端延时, 即数据包从源节点发出并到达汇聚节点的平均时间。

(3)网络吞吐量, 即汇聚节点在单位时间接收到的数据总字节数。

表1 实验参数与默认值

参数	默认值
水声传感器节点数量	100~600
三维水域大小	5千米×5千米×5千米
汇聚节点数量	6
数据发送率	5数据包/秒
数据包大小	40字节
节点传送半径	100米(默认值)/500米(最大值)
失效节点发生率	20%

在第1组实验中, 本文比较了不同路由协议中数据包传送率与节点数量之间的关系。如图4所示, SAR的数据包传送率超过了其它两种路由协议。BGR的数据传送率比ER平均高出10.3%, SAR的数据传送率比ER平均高出20.1%。这说明SAR在遇到失效节点时能够重新建立有效的路由路径将数据包传送到目标节点。

在第2组实验中, 本文比较了不同路由协议中平均端到端延时与节点数量之间的关系。如图5所示, BGR的路由性能在3种路由协议中表现最好。与ER相比, SAR可以降低17.5%的端到端延时, 而BGR可以降低28.1%的端到端延时。这是因为SAR在路由过程中遇到失效节点时需要采取额外的措施来建立新的路由路径, 所以其在平均端到端延时指标上性能低于BGR。

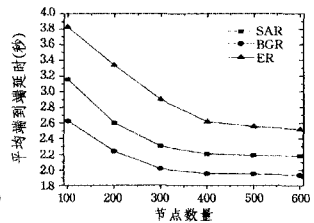
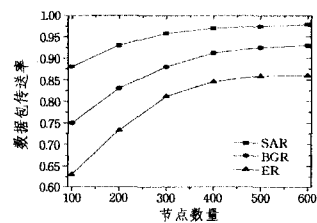


图4 数据包传送率与节点数量的关系 图5 平均端到端延时与节点数量的关系

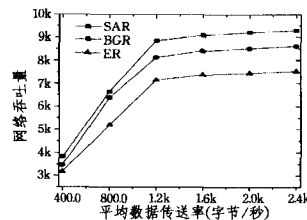


图6 网络吞吐量与平均数据传送率的关系

在第3组实验中, 本文比较了不同路由协议中网络吞吐量与平均数据传送率之间的关系。如图6所示, 与其它两种路由协议相比, SAR在节点数量相同的情况下网络吞吐量最大。其中, 与ER相比, BGR平均可以提高14.1%的网络吞吐量, 而SAR的网络吞吐量比ER平均高出22.7%, 两者的

(下转第124页)

2011 33rd International Conference on [C]. Honolulu HI; IEEE Conference Publication, 2011; 431-440

- [7] Ge Hai-long, Ma Xiao-xing, Xu Chang. Constructing Self-adaptive Software Systems; A Case Study with An Obstacle-Avoiding Mini-Car[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2012(6)
- [8] Clarke M, Blair G S, Coulson G, et al. An efficient component model for the construction of adaptive middle-ware [A] // Guerraoui R. Proceedings of the IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms Heidelberg (Middle-ware '01)[C]. London, UK; Springer-Verlag, 2001; 160-178
- [9] Henriksen K, Indulska J. A software engineering framework for context-aware pervasive computing[A]//Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Pervasive Computing and Communica-

tions (PerCom '04)[C]. Washington, DC, USA; IEEE Computer Society, 2004; 77-86

- [10] Zachariadis S, Mascolo C, Emmerich W. The SATIN component system - a metamodel for engineering adaptable mobile systems [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2006, 32(11):910-927
- [11] Dobson S, Denazis S, Fernandez A, et al. A survey of autonomic communications[J]. ACM Transactions Autonomous Adaptive Systems (TAAS), 2006, 1(2):223-259
- [12] Edwards G, Garcia J, Tajalli H. Architecture-driven self-adaptation and self-management in robotics systems[A]// Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2009. SEAMS '09. ICSE Workshop on[C]. Vancouver, Canada; IEEE Conference Publication, 2009; 142-151

(上接第 93 页)

增长幅度都超过了数据包传送率的增长幅度。这是由于网络吞吐量考虑的是单位时间内汇聚节点接收到的数据总字节数,因此该指标与数据包传送率成正比而与平均端到端延时成反比。

结束语 三维水声传感器网络用来探测和观察二维水声传感器网络不能充分观察到的现象。为了提高三维水声传感器网络的路由效率,本文提出了基本地理位置路由协议(BGR)和自适应路由协议(SAR)。在基本地理位置路由协议中,每个传感器节点将三维的水下空间划分为 8 个区域。每个节点根据与各自邻居节点之间连线的夹角以及目标节点的地理位置信息来决定转发数据包的候选节点。然后,在基本地理位置路由协议基础上,设计了一种自适应路由协议,其可以较好地适应三维水声传感器网络中部分节点失效的情况。通过仿真实验发现,自适应路由协议可以在数据包传送率、端到端延时和网络吞吐量指标上达到较好的平衡,而基本地理位置路由协议在端到端延时指标上性能最好。

参 考 文 献

- [1] Manjula R, Sunilkumar S. Issues in Underwater Acoustic Sensor Networks[J]. International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2011, 3(1):101-110
- [2] Akyildiz I, Pompili T. Underwater Acoustic Sensor Networks; Research Challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3):257-279
- [3] Partan J, Kurose J, Levine B. A Survey of Practical Issues in Underwater Networks [C]// Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks. Los Angeles, USA; IEEE Computer Society, 2006; 17-24
- [4] Jornet J, Stojanovic M, Zorzi M. On Joint Frequency and Power Allocation in a Cross-Layer Protocol for Underwater Acoustic Networks[J]. IEEE Journal of Oceanic engineering, 2010, 35(4):936-947
- [5] Ravelomna V. Extremal Properties of Three dimensional Sensor Networks with Applications[J]. IEEE Transactions in Mobile Computing, 2004, 3(3):246-257
- [6] 李宇, 黄海宁. 基于水声传感器网络的多路径协同多跳通信研究

[J]. 应用声学, 2010, 29(5):324-329

- [7] Teymorian A, Cheng W, Ma L, et al. 3D Underwater Sensor Network Localization[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(12):1610-1621
- [8] Jiang Z. Underwater Acoustic Networks Issues and Solutions [J]. International Journal of Intelligent Control and Systems, 2008, 13(3):152-161
- [9] Vahdat A, Becker D. Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Networks [R]. TR CS-200006. 2000
- [10] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion; A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks [C]// Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston, Massachusetts, USA; ACM, 2000; 56-67
- [11] Xie P, Cui J, Lao L. VBF: Vector-based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks [C]// Proceedings of Networking 2006. LNCS 3976, Heidelberg; Springer-Verlag, 2006; 1216-1221
- [12] Zhou Z, Cui J, Bagtzoglou A. Scalable Localization with Mobility Prediction for Underwater Sensor Networks [C]// Proceedings of IEEE INFOCOM. Phoenix, Arizona, USA, 2008; 2198-2206
- [13] Xu M, Liu G. Design of a P2P based Collaboration Platform for Underwater Acoustic Sensor Network [C]// Proceedings of 11th IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies. Hangzhou, China, 2011; 136-141
- [14] Toussaint G. The Relative Neighborhood Graph of A Finite Planar Set[J]. Pattern Recognition, 1980, 12(4):261-268
- [15] Bose P, Devroye L, Evans W, et al. On the Spanning Ratio of Gabriel Graphs and Beta-Skeletons [C]// Proceedings of the Latin Theoretical Informatics Conference. Berlin, Springer-Verlag, 2002; 479-493
- [16] Supowit K. The Relative Neighborhood Graph with An Application to Minimum Spanning Trees [J]. Journal of Association for Computing Machinery, 1983, 30(3):428-448
- [17] Xie P, Zhou Z, Peng Z, et al. Aqua-Sim: An NS-2 Based Simulator for Underwater Sensor Networks [C]// OCEANS 2009, MTS/IEEE Marine Technology for Our Future, Global and Local Challenges. Biloxi, USA; IEEE Computer Society, 2009; 1-7