基于层级的水下传感器网络自适应地理路由协议*

兰胜林, 杜秀娟[†], 柳 凡, 冯振兴 (青海师范大学 计算机学院, 西宁 810008)

摘 要: 针对水下传感器网络(UWSN)需要专门的路由协议满足适应性、鲁棒性、高能效和能量均衡等要求,提出了基于层级的UWSN 自适应地理路由协议 LB-AGR,不同流量采用不同路由决策,根据节点层级、剩余能量、节点密度和位置信息,为候选下一跳节点计算复合转发因子,从而确定最佳路由,并将上行流量单播传送,减少了碰撞和能耗。仿真表明,LB-AGR 在降低能耗、缩短端到端延时的同时,延长了网络生存期。
 关键词:水下传感器网络;层级路由;邻居表;路由协议
 中图分类号: TP393.04
 文献标志码: A
 文章编号: 1001-3695(2014)01-0236-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.01.055

Level-based adaptive geo-routing for underwater sensor network

LAN Sheng-lin, DU Xiu-juan[†], LIU Fan, FENG Zhen-xing

(School of Computer, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

Abstract: Underwater sensor network (UWSN) calls for specialized routing protocols to address adaptability, robustness, energy efficient and balanced energy-consuming. This paper proposed level-based adaptive geo-routing (LB-AGR) protocol in which traffics were divided into four categories, and routed different types of traffic in accordance with different decisions. It forwarded traffics upstream to sink unicast to the best next-hop instead of broadcasting to all neighbor nodes as in present UWSN routing protocols. It used an integrated forwarding factor to determine the best next-hop from multiple qualified candidates based on available energy, density, location, and level difference between neighbor nodes. The simulations show that LB-AGR can prolong the lifetime of the whole networks greatly by reducing and balancing energy consumption. Moreover, the end-to-end delay is also shortened under different environments.

Key words: UWSN; level-based routing; neighbor table; routing protocol

近年来无线传感器网络(WSN)由于能够提高人类获取和 控制信息的能力引起人们的普遍关注,而将传感器用于水下环 境的水下传感器网络(UWSN)的研究也呈现快速地增长趋 势^[1-8]。水下传感器网络的独有特性使传统的陆上传感器网 络协议在水下暴露出许多弊端,路由协议是水下传感器网络亟 待解决的主要问题之一。

由于水的吸收作用,无线电在水下传输衰减严重,传输距 离很短。实验证明,IEEE 802.11b/g或 IEEE 802.15.4 协议的 节点水下传输距离只有 50~100 cm。因此,UWSN 采用声波通 信。水声信道具有高误码率(10⁻³~10⁻⁷)、长传播延时(秒 级)和低带宽(几十 kbps)特性。此外,水下节点部署稀疏,节 点随水流移动导致高度动态的网络拓扑,这给资源有限的 UWSN 网络路由协议的设计带来较大的挑战。UWSN 需要适 应于动态、稀疏拓扑的节能、健壮的自适应路由协议。本文提 出了一种基于层级的水下传感网络自适应地理路由协议 LB-AGR。节点在执行路由之前,需要预先获取位置和层级信息, 这可以通过网络初始化完成。在网络初始化阶段,sink 节点定 向泛洪包括层级和定位信息的控制包,包头的层级字段用来指 明发送节点的层级,该字段逐跳更新。当节点接收到目的为 sink 节点的数据包时,根据包头的层级信息在邻居表中搜索具 有转发资格的下一跳节点(候选节点),基于剩余能量、节点密 度和位置信息为每个候选节点计算转发因子,从而确定最佳的 下一跳节点。因此 LB-AGR 倾向选取那些剩余能量较高的节 点作为下一跳,能够适应、甚至在某种程度上优化动态拓扑,均 衡网络的能耗,从而延长整个网络的寿命。由于取消了 VBF 等路由协议中的抑制时间,LB-AGR 缩短了端到端的延迟。大 量的仿真实验证实了 LB-AGR 协议的优异性能。

1 相关工作

目前现有的传感器网络路由协议大致分为查询路由和地 理路由两类。查询路由使用查询泛洪发现数据的传输路径,导 致很大的通信开销、较低的能量效率和较长的端到端的延时。 定向扩散^[9]就是这样一个查询路由,汇聚节点发送感兴趣的 消息指明查询的任务,该消息在整个网络中泛洪。在泛洪的过 程中,该协议逐跳地建立反向的从数据源到汇聚节点的数据传 输梯度(gradient),并将采集到的数据沿着梯度方向传送到汇 聚节点。地理路由基于传感器节点的位置或深度等信息执行 路由转发,而节点定位对于陆上/水下传感器网络是必不可少 的过程。基于矢量的路由转发协议 VBF 是水下传感器网络仅

收稿日期: 2013-04-01; 修回日期: 2013-05-26 基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET -11-1025);国家自然科学基金资 助项目(61162003);青海省自然科学基金资助项目(2012-Z-902);国家"973"计划前期研究专项资助项目(2011CB311809)

作者简介:兰胜林(1979-),男,湖南岳阳人,硕士研究生,主要研究方向为无线网络;杜秀娟(1970-),女(通信作者),教授,博士,主要研究方向 为无线网络(124111397@qq.com);柳凡(1986-),女,陕西榆林人,硕士研究生,主要研究方向为无线网络;冯振兴(1986-),男,山东菏泽人,硕士研 究生,主要研究方向为无线网络.

有的少数几个路由协议之一,VBF 定义了一个从源节点到汇 聚节点的路由管道作为路径转发矢量,接收包将在这个管道内 进行泛洪。VBF 引入了一个转发因子用来计算节点执行转发 之前的抑制时间,用于镇压过多的转发,从而在一定程度上提 高密集网络的能量效率,降低冲突。DBR 协议基于节点深度 信息执行路由,也能够处理动态的网络。VBF 和 DBR 执行分 布式路由和带抑制时间的广播转发机制,导致大量的冲突、冗 余转发和额外的延时。此外,无论是 VBF 或 DBR 都采用贪心 算法,容易导致如 GPSR 协议中实际上连接的节点失去路由。 相比而言,LB-AGR 协议通过使用层级和 2 跳邻居的位置信 息,在很大程度上解决了空旷区域问题。

2 基于层级的自适应地理路由

在 LB-AGR 协议中,每个传感器节点为每个 sink 节点维护 一张邻居表,记录两跳以内的邻居节点的信息。其中包括邻居 节点的 ID、层级、位置、剩余能量、中介节点、老化时间、节点状 态、最小接收功率等信息。水下传感器网络的流量通常可以分 为以下四类:目的为 sink 节点的上行流量、到指定区域内的节 点的下行流量、到特定节点的下行流量(不管该节点处在什么 位置)和到所有传感器节点的下行广播流量。LB-AGR 基于节 点间的层级差、剩余能量、密度、位置等信息执行路由。在执行 路由之前,首先根据包的头部字段信息确定包所属的流量类 型,不同类型的流量采用不同的路由决策。

2.1 节点层级、邻居表及包格式

与传统的计算机网络不同的是,UWSN 具有定向通信特 点,上行流量的目的为 sink 节点,下行流量源自 sink 节点。 sink 节点作为整个网络的枢纽。而靠近 sink 的传感器节点,除 了感知和产生数据外,还负责中继和转发来自其他节点的包。 当数据包沿上行路径向 sink 节点传输时,网络的负载也越来 越重,容易在 sink 节点附近形成漏斗效应。所以 sink 节点和 它附近的传感器节点对网络的正常运行具有重要的影响。本 文为每个节点指定一个层级,用来表示节点的重要程度。这里 的层级被定义为传感器节点到 sink 节点的跳数。如前所述, 每个传感器节点为每个 sink 节点维护一张如表1 所示的邻居 表,其中记录了两跳以内邻居节点的 ID、层级、位置、剩余能 量、中介节点、老化时间、节点状态、最小接收功率等信息。这 些信息可在网络初始化阶段初次获取并实时动态更新。在网 络初始化阶段,sink 节点定期向网络泛洪包括定位、能量、一跳 邻居等信息在内的控制消息,用来对节点进行定位和邻居表的 学习。网络收敛后,节点可通过监听各种控制及数据报文更新 邻居表。

水下传感器网络以数据为中心,对于大多数 UWSN 应用, 没有附带位置信息的数据就没有任何意义。因此,每个 UWSN 节点首先需要获取各自的位置信息,这可以通过由 sink 节点 发起的定位过程来完成。Sink 节点定期广播一种包括定位和 其他捎带信息的控制报文,便于传感器节点通过某种定位算法 计算或更新自己的位置。由于篇幅所限,定位算法在本文中不 再赘述。控制报文的头部格式如图 1 所示。其中层级字段填 充发送(上一跳)节点的层级信息,该字段被 sink 节点初始化 为零。数据字段填充发送节点的 ID、位置、剩余能量、最小接 收功率等信息,这些字段随着控制报文的定向泛洪而逐跳发生 改变。

表1 邻居信息表

节点 ID	层	级背	制余 指量	中介 节点		位置		老化 时间	码索	刋	状态		最小接
ID3	1	1	AP3	ID4		$\{x_3, y_3, z_3\}$			5				
ID4	1	1	AP4	ID4		$\{x_4, y_4, z_4\}$			3	1:	1:unknow		
ID7	2		AP7	ID7, ID14		$\{x_7, y_7, z_7\}$			3	0	0:sendin		
ID13	3	A	P13	ID13,ID14		$\{x_{13}, y_{13}, z_{13}\}$				1:	1:unknow		
ID14	3	A	P14	ID14	ID14, ID13		$\{x_{14}, y_{14}, z_{14}\}$		5.	3	3:evading		
ID1	0	1	AP1		ID4		$\{x_1, y_1, z_1\}$		3	5:	receiv	ing	
ID5	1	1	AP5		ID4, ID7		$\{x_5, y_5, z_5\}$		6				
ID15	3	A	AP15		ID14		$\{x_{15}, y_{15}, z_{15}\}$						
比特:8	8	8	2		1	8	1	16	4	16	8	变长	16
层级	发送 节点 ID	目的 节点 ID	类型= (0:DAT 1:AC 2:RT	0 TA K	流向 0:下行 1:上行	sink 节点 ID	(源节点/ 目的) 0:位置 1:节点 ID	位置或 ID (源/目的) 全"1" 为广播	应用优 先级 (应用 协议类	包 ID	负载 长度	数据	校验
此节	点	跳节点	3:CTS	5)		Ű	原或目的	节点	型)				
头部												负载	尾部



2.2 基于层级的定向泛洪

在LB-AGR协议中,对于目的为指定 ID 的节点(位置未知)或广播至所有节点的下行流量,采用基于层级的定向泛 洪。当第一次接收到控制报文时,接收节点在报文头部提取层 级字段信息,即发送节点(上一跳)的层级,记为 L_{pre}。将 L_{pre}加 1 后作为节点自己的层级,记为 L_{eur},并将该分组头部的源节点 ID、层级连同数据字段的位置信息、剩余能量及源节点的一跳 邻居等信息,插入到邻居信息表中,之后分别更新报文的层级、 源节点 ID 及数据字段为接收节点自身信息并进行转发。

当一个已经获取自身层级,且该层级信息未过期的传感器 节点接收到一个控制分组时,它将对分组中的层级字段的值同 自身的层级进行比较。如果分组中的级别 L_{pe}较小,那么节点 将更新自己的层级以及邻居表信息,并用节点的自身信息来替 换分组头部中的层级、源节点 ID 和数据字段后,转发该分组。 否则,节点只更新其邻居表不转发分组。

基于层级的定向泛洪机制保证了控制分组沿着从 sink 节 点到向远处传感器节点延伸的下行路径传输,确保广播控制分 组能够传输到整个网络,却不会像传统泛洪那样引入过多的开 销。因此,对于广播报文或目的为指定 ID 的节点的控制分组, 定向泛洪是一个很好的路由策略。

2.3 上行流量自适应路由

对于上行流量,LB-AGR 根据节点的层级、密度和剩余能量 执行自适应路由算法。当接收到一个上行分组时,预期的接收 节点将在邻居表中搜索那些具备转发资格的候选下一跳节点, 即层级为 L_{eur} -1 的邻居节点。其中 L_{eur}为接收节点的层级。对 于拓扑动态变化的水下传感器网络,可能会存在多个候选的下 一跳节点,如果这些候选节点都参与转发同一个分组,将会导致 大量的冲突与重传。因此,为了减少冲突和能耗,代替 VBF 或 DBR 中的广播转发,LB-AGR 从候选节点 node_i 中找出最佳的下 一跳节点 NH_{best}。为了使节点能量均衡,最大限度地提高网络的 寿命,LB-AGR 将节点密度和剩余能量因素考虑在内,以避免部 分节点能量耗尽,同时尽可能地选择密度较大的节点作为下一 跳,以此对网络拓扑进行某种程度的修剪。在这里为每一个候 选的节点 node_i 引入了一个综合转发因子 αⁱdesim,如式(1)所示。

$$\alpha_{\text{desira}}^{i} = \alpha_{1} \times \frac{\text{Density}_{i}}{\sum_{i} \text{Density}_{i}} + \alpha_{2} \frac{AP_{i}}{AP_{\text{init}}}$$
(1)

其中:
$$\begin{cases} \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \alpha_1, \alpha_2 \in [0, 1] \\ \alpha_2 = \frac{\max_i (AP_i) - \min_i (AP_i)}{AP_{\text{init}}} \end{cases}$$

这里 i 表示候选节点 node_i; Density_i 表示节点 i 的上行邻 居节点数,即级别为 $L_i - 1$ 的邻居节点的个数; AP_i 表示节点 node_i 的剩余能量; AP_{init} 表示节点的初始能量。因此,如果候选 节点的综合转发因子 α_{desira} 等于 max { α_{desira}^i },那么它将当选为 最佳的下一跳节点 NH_{best} 。

在 LB-AGR 协议中,每一个与 sink 节点连通的传感器节点 都会得到一个层级,具有层级的节点至少有一个上行的邻居节 点(父节点),基于层级的上行流量路由机制完全解决了贪心 路由协议的空旷区域(void area)问题。

2.4 基于层级和位置的下行路由机制

对于目的为指定区域的节点的下行控制报文,LB-AGR 执 行有能量意识的地理路由决策。当节点收到这样的下行分组 时,将从包头中提取层级字段值 L_{pre} ,并与自己的 L_{eur} 进行比 较。若 $L_{eur} < L_{pre}$ 则判断该分组来自下游邻居,接收节点将更新 邻居表后丢弃该分组;否则,接收节点提取包头中的目的位置 字段,记为 Pos_{tar},并在邻居表中查找比上一跳节点更接近目的 节点的两跳邻居节点。匹配的节点记为 node_i,node_i 到目的的 距离记为 Dis_i,则 Dis_i < Dis_{pre}。把从当前接收节点到达 node_i 所经由的直接邻居节点记为 node_i,则 node_i 表示候选的下一跳 节点。当接收节点无法找到一个匹配的两跳邻居时,它将在邻 居表中查找比上一跳节点更接近目的的一跳邻居节点,匹配的 节点同样记为 node_i。无论哪种情况,node_i 都是有资格转发的 候选下一跳节点。分别为两种情况下的每一个候选下一跳节 点 node_i 定义一个转发因子 α^i_{desira} ,如式(2)(3)所示。

$$\alpha_{\text{desira}}^{i} = \alpha_3 \times \frac{\text{Dis}_{\text{pre}} - \text{Dis}_{j}}{3R} + \alpha_4 \frac{\min[AP_i, AP_j]}{AP_{\text{init}}}$$
(2)

$$\alpha_{\text{desira}}^{i} = \alpha_3 \times \frac{\text{Dis}_{\text{pre}} - \text{Dis}_{i}}{3R} + \alpha_4 \frac{AP_i}{AP_{\text{init}}}$$
(3)

其中:
$$\left\{ \begin{array}{l} 其中: \begin{cases} \alpha_3 + \alpha_4 = 1 & \alpha_3, \alpha_4 \in [0, 1] \\ \alpha_4 = \frac{\max(\min[AP_i, AP_j]) - \min(\min[AP_i, AP_j])}{P_{\min}} & \\ \alpha_4 = \frac{\max(AP_i) - \min(AP_i)}{AP_{\min}} & \\ \end{array} \right.$$
(3)

将 α_{desira}等于 max{αⁱ_{desira}}的节点当选为最佳下一跳节点。 基于两跳邻居位置信息的下行地理路由在解决空旷区域问题 方面明显优于传统的贪心路由机制。

3 性能评估

本章将对 LB-AGR 的网络性能进行评估,并同水下传感器 网络仿真平台中仅有的 VBF 和 VBVA 协议^[7]进行比较。所有 的仿真在附带被称为 Aqua-Sim-1.0 的 UWSN 仿真包的 NS2 上 完成。仿真场景设置:9、16、25、36 个传感器节点先后随机部 署在一个 3000 m × 3000 m × 1000 m 的 3D 区域,25、36、49 个 节点先后随机部署在 6000 m × 6000 m × 2000 m 的区域,49、 64、81、100 个节点先后部署在 9000 m × 9000 m × 4000 m 的区 域。Sink 节点随机部署在水面,且一旦部署,其位置保持不变。 源节点每 10 s 产生一个包,包负载为 50 Byte。节点初始能量 为 10 000 J,发送、接收和空闲状态的功率分别为 2 W、0.75 W 和 10 mW,频率为 25 kHz。

分别采用以下四个参数对比不同协议的性能,平均端到端的延时如图2(a)所示,包传输率(sink 节点成功接收的总包数 与源节点发送的总包数之比)如图2(b)所示,能耗如图2(c) 所示,能耗的均衡性如图2(d)所示。能耗的均衡性采用Jain' 的公平性指数衡量,如式(4)。



从图 2(a)(c)可以看出,LB-AGR 协议在端到端的平均时 延和总能耗方面明显优于 UWSN 已有的 VBF 和 VBVA 协议。 图 2(b)表明:LB-AGR 协议在包传输率上略逊于 VBF 和 VB-VA 协议。考虑到 LB-AGR 采用单播转发,而 VBF 和 VB-VA 采 用广播转发,因此,LB-AGR 协议在包成功传输率方面仍然具 有较好的性能;考虑到 LB-AGR 显著减少的能耗,此处 LB-AGR 传输率性能的微小下降可以忽略。从图 2(d)可以看出, LB-AGR 能耗均衡性会随着节点的数量增加而增加,但 VBF 和 VBVA 的能耗均衡性却迅速下降。

4 结束语

LB-AGR 基于节点层级、剩余能量、密度、位置确定最佳路 由,执行单播转发,取代了现有 UWSN 的 DBR、VBF 和 VBVA 的广播转发,显著降低了能耗。DBR、VBF 和 VBVA 等协议在 转发前采用抑制时间弥补广播转发的巨大冗余,造成额外的延 时,LB-AGR 的立即转发机制避免了采用抑制时间引入的延 时,明显降低了端到端延时。将剩余能量和节点密度作为计算 转发因子的参数,并以此确定最佳路由,在很大程度上均衡了 整个网络的能耗,捎带了对网络拓扑的优化裁剪,延长了整个 网络的生存期。

在基于 Aqua-Sim-1.0 的仿真中,协议开销包括公共头部、 IP 头、UDP 头、LB-AGR 头,约 50 Byte,其中 39 Byte 的头部开 销来自 Aqua-Sim-1.0 仿真软件。与 50 Byte 量级的负载(多见 于 UWSN)长度相比,过高的协议开销造成过低的协议效率。 因此,传统的五层协议架构模型在资源受限的 UWSN 使用效 率低下。笔者下一步将开展基于数字喷泉码的 UWSN 可靠传 输机制研究。

参考文献:

- [1] ISMAIL N S N, HUSSEIN L A, ARIFFIN S H S. Analyzing the performance of acoustic channel in underwater wireless sensor networks
 [C]//Proc of the 4th Asia International Conference on Mathematical Analytical Modelling and Computer Simulation. 2010;550-555.
- [2] POMPILI D, AKYILDIZ I F. A multimedia cross-layer protocol for underwater acoustic sensor networks [J]. IEEE Trans on Wireless
 Communications, 2010, 9(9):2924-2934. (下转第 242 页)

同样的测试条件下,本文提出的基于优化缓存模型的频点资源 管理方法能够以更低的响应时延提供更高的响应速率。

为了进一步说明该优化缓存模型具备很好的系统可伸缩 性,即在管理大量 IPQAM 频点资源的时候,同样具备高响应速 率、低响应时延的特性。本文作进一步测试,测试环境仍采用 上述环境,测试条件有所变化:

ERM 模拟管理更多的 IPQAM 资源,如1 000 个可用 IPQAM 资源,不断增加 ERM 客户端请求速率,测得响应时延 与响应速率之间的关系如图7 所示。



图 7 1 000 个 IPQAM 资源情况下实验结果图

由图 7 结果可知,虽然 ERM 管理的 IPQAM 个数从 100 增加到 1 000,但响应速率最高能够达到 15 500 次/s,略低于图 6 中最高速率 16 000 次/s,并且在响应时延方面稳定在 0.02 ~ 0.03 ms。因此,采用基于该优化的缓存模型的资源管理方法后,随着所管理资源数量的增加,并不会对系统的响应速率、响应时延造成大的影响,系统同样体现了高响应速率、低响应时延的特性,具备很高的系统可伸缩性。

5 结束语

本文提出了一种基于优化缓存模型的 IPQAM 频点管理方法。该方法对已有同类方法中缓存模型进行优化,并提出了一种适用于该优化缓存模型的 IPQAM 频点分配、回收方法。实验结果表明,该方法具备高响应速率、低响应时延等特性,为 ERM 提供了很好的系统可伸缩性。

参考文献:

罗亚,赵志强,王劲林.应用于 HFC 网络交互业务的会话资源管理系统[J]. 电视技术,2008,32(9):55-57.

(上接第238页)

- [3] HUANG Chenn-jung, WANG Yu-wu, LIAO Su-hui. A power-efficient routing protocol for underwater wireless sensor networks [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(2):2348-2355.
- [4] ZHOU Zhong, PENG Zheng, CUI Jun-hong, et al. Handling triple hidden terminal problems for multi-channel MAC in long-delay underwater sensor networks[C]//Proc of the 29th Conference on Information Communications. 2010;1-5.
- [5] ZHOU Zhong, CUI Jun-hong. Energy efficient multi-path communication for time-critical applications in underwater sensor networks [C]//Proc of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2008.
- [6] YAN Hai, SHI Z J, CUI Jun-hong. DBR: depth-based routing for underwater sensor networks [C]//Proc of the 7th International IFIP-TC6 Networking Conference on Ad hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet. Berlin: Springer-Verlag, 2008;72-86.
- [7] XIE Peng, CUI Jun-hong, LAO Li. VBF: vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks [C]//Proc of the 5th International IFIP-TC6 Conference on Networking Technologies, Services, and Protocols: Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications Systems. Berlin: Springer-Verlag, 2006:1216-1221.
- [8] ZHENG Guo, COLOMBO G, WANG Bing, et al. Adaptive routing in

- [2] 胡朋,李永涛,王志谦. 数字电视互动服务中 ERM 对边缘资源的 管理[J]. 数字电视,2011,35(20):17-20.
- [3] 李永涛,胡朋,王志谦.基于 NGOD 架构的 VOD 系统边缘资源会 话管理方法[J].数字电视,2011,35(19):1-3.
- [4] 徐战,王劲林,朱明,等.一种应用于混合格式 VOD 系统的 QAM 资源分配算法[J].小型微机计算机系统,2011,32(3):472-476.
- [5] 韩锐,曾学文,孙鹏.一种 HFC 接入网带宽拍卖分配算法[J].西 安电子科技大学学报,2012,39(1):122-127.
- [6] GONG J, REED D, SHAW T, et al. VOD QAM resource allocation algorithms [C]//Proc of International Conferences on Networking. 2006:268-280.
- [7] GONG Jiong, REED D, SHAW T, et al. QAM resource allocation in mixed-format VOD systems [J]. Journal of Communications, 2007,2(1):1-9.
- [8] HARDIN G. Method and apparatus for network bandwidth allocation: US,US20040881979 [P]. 2005-11-29. http://global. soopat. com/ Patent/Patent/48892771.
- [9] YU Yan, ESTRIN D, GOVINDAN R. Gengraphical and energy-aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks[EB/OL]. http://citeseerx. ist. psu. edu/ viewdoc/download? doi = 10. 1. 1. 21. 8533&rep = rep1&type = pdf.
- [10] IOSIFIDIS G, KOUTSOPOULOS I. Double auction mechanisms for resource allocation in autonomous networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(1):95-102.
- [11] WEI Jiao-long, ZHANG Chi. Research on auction-based bandwidth allocation for computer networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(6):891-894.
- [12] KELLYF P, MAULLCOA A K, TAN D K H. Rate control for communication networks: shadow price, proportional fairness and stability
 [J]. Journal of the Operational Research Society, 1998, 49(3): 237-252.
- [13] SHI Jun-cai, HU Ai-qun. A utility-based resource allocation algorithm for IEEE 802. 16 OFDMA systems [J]. Chinese High Technology Letters, 2008, 18(12):1218-1223.
- [14] 鞠照明,王玲芳,刘磊. 互动电视边缘资源管理系统的设计与实现
 [J]. 计算机工程,2012,38(17):258-260.
- [15] 盛志凡,万乾荣,何沛中,等. GY/T-258 中华人民共和国广播电影 电视行业标准[S].北京:国家广播电影电视总局,2012.

underwater delay/disruption tolerant sensor networks [C]//Proc of the 5th Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services. [S. l.]; IEEE Press, 2008; 31-39.

- [9] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks[C]//Proc of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2000:56-67.
- [10] DU Xiu-juan, LAN Sheng-lin, LIU Fan, et al. Micro-ANP network protocol architecture and simulation implementation [J]. Telkomnika, 2013,11(4):1757-1768.
- [11] 杜秀娟. MANET 网络 MAC 层攻击综合检测方法 [J]. 哈尔滨工 程大学学报,2012,33(10):1271-1277.
- [12] DU Xiu-juan, HUANG Ke-jun, LIU Fan, et al. Micro-ANP: a novel network protocol architecture for underwater sensor network: sensors, measurement and intelligent materials [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 303-306:223-230.
- [13] SOUSA E S, SILVESTER J A. Spreading code protocols for distributed spread-spectrum packet radio networks[J]. IEEE Trans on Communications, 1988, 36(3):272-281.
- [14] 黄化吉, 冯穗力, 秦丽姣, 等. NS 网络模拟和协议仿真[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [15] 王辉. NS2 网络模拟器的原理和应用[M]. 西安:西北工业大学 出版社,2008.