

水下传感网基于深度信息的定向路由协议

谢维佳¹, 刘建明², 何 焱², 李 龙¹

(1 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

2 桂林电子科技大学 计算机科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 为了降低水下传感器网络通信过程中端到端时延, 提高发送成功率, 平衡节点能耗, 延长网络生存时间, 在水下传感网基于深度信息的路由协议 (Depth Based Routing, DBR) 的基础上, 提出了基于深度信息的定向路由协议 (Depth Based Directional Routing, DBDR). 新算法以源节点与目的节点间线段为轴线建立半径为 w 的虚拟管道, 只有管道内节点才有转发数据资格, 管道内节点以基于深度信息的路由协议发送数据包, 并提出了新的以节点深度和能量为权重的转发时延算法. 基于 NS2 的仿真表明, 与 DBR 相比较, DBDR 协议的端到端时延减少了 23%~42% 左右, 数据包发送成功率达到 95% 以上, 实验结果表明, DBDR 可以更好地平衡网络中节点能耗, 延长网络生存时间, 提高数据包传递成功率, 降低了数据包通信时延.

关键词: 水下三维传感网; 深度信息; 定向路由; 节点能耗; 数据包发送率; 端到端时延

中图分类号: TP393.17

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)11-0040-06

Depth Based Directional Routing Protocol in Underwater Sensor Networks

XIE Wei-jia¹, LIU Jian-ming², HE Ye², LI Long¹

(1 School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology,

Guilin 541004, China; 2 School of Computer Science and Engineering,

Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to reduce the end to end packet delay and increase the packet delivery ratio in the Underwater Sensor Network (UWSN), balancing the energy consume of nodes, and extending the network lifetime, a new Depth Based Directional Routing (DBDR) protocol based on the Depth Based Routing (DBR) was proposed. The new protocol sets up a virtual routing pipe with radius w , and its axis is the line between the source node and target node. Only the nodes in the pipe are allowed to forward packets, and the nodes forward packets in the depth based routing protocol. Also, DBDR proposes a forward delay algorithm, sets the depth and rest energy as weight factors. In the comparison experiments with DBR on the NS2, the end to end packet delay of DBDR protocol decreased about 23%~42%, the packet delivery ratio reached to more than 95%. The results show that the protocol not only can better balance the energy consume of nodes and prolong the survival time of the whole network, but also achieve very high packet delivery ratios and much lower end to end delay.

Key words: under water sensor network (UWSN); depth information; directional routing; node energy consume; packets delivery ratio; end to end delay

收稿日期: 2015-02-08; **修回日期:** 2015-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(61262074); 广西可信软件重点实验室开放课题(kx201101); 广西高校优秀人才资助计划(桂教人 201065); 广西自然科学基金(2012GXNSFCA053009); 广西信息科学实验中心项目; 桂林电子科技大学计算机软件创新团队资助项目; 广西硕士研究生创新项目基金(YCSZ2014145)

1 引言

水下传感器网络(UWSN)是由许多水下传感器节点以自组织和多跳通信方式构成的网络,可以实现水下信息的采集、融合和应用.与陆基无线传感网络不同的是,由于水下环境恶劣,水下传感器网络中水声信道通信质量差,声波信号在水中传播时存在衰减、多径效应以及多普勒频移等问题,导致了水下声通信的误码率高,通信链路连接不稳定.此外,水下传感器网络的网络规模大,节点的能量有限,恶劣的水下环境使得水下传感器容易失效,从而导致整个网络很难维护.因此,普通的陆基无线传感网络的路由协议并不适用于水下传感器网络,需要开发高效的水下通信路由协议,以提高 UWSN 的性能.

Peng Xie 等人提出的基于矢量位置信息路由协议^[1](Vector-Based Forwarding Protocol, VBF)是通过获取节点的三维位置信息,以源节点与 sink 节点构成的路由通道中,节点在通道中转发数据包,该协议需要获得所有节点及其邻近节点的三维坐标信息,以及所有节点与其临近节点的信息,所耗能量大,且转发时延较长;Hai Yan 等人提出基于深度信息的路由(Depth Based Routing, DBR)协议^[2]是水下传感器网络中第一个基于深度信息的路由协议,网络通信过程中,只选择节点深度更浅的下一跳进行数据传递,直到 sink 节点,相比 VBF 而言,不需要节点的三维位置信息,具有很明显的优点,但是 DBR 协议所需多 sink 节点成本较高,且数据包仅向上盲目发送,使得发送成功率较低,且 DBR 容易产生空洞问题;Uichin Lee 等人来针对 DBR 路由协议存在的隐藏终端和局部路由空洞现象,提出了 Hydrocast (Hydraulic pressure based anycast routing protocol)协议^[3],该协议很好地解决了 DBR 中的空洞问题,但是该协议未考虑到数据包转发时延以及发送成功率;VARP (Void Aware Pressure Routing)协议^[4]同样是针对 DBR^[5]中的路由空洞现象而提出来的,该协议相对 Hydrocast 协议能更全面地解决空洞问题,但是其路径复杂,且研究重点仅仅在解决空洞问题的转发回路上,LIU GUANG-ZHONG 等人提出的 DBMR (Depth-Based Multi-hop Routing)^[6]的也是基于 DBR 的基础上做出的改进,采用多跳转发的算法减少了数据包的冗余以及通信信道的占用,但是 DBMR 同样没有解决 DBR 的盲目发送数据包的不足;EDBR 协议^[7](En-

ergy based DBR Protocol)是针对 DBR 协议的网络能耗过大以及能耗不均的问题所提出的改进协议,EDBR 协议与 DBR 协议的仅有的区别在于转发延迟时间 holding time 的算法不同;许多学者对 DBR 协议等做出了很多的改进和建议,提出了更多的新颖的想法,对推动水下传感器网络的研究发展做出了很大的贡献^[8-16].基于 DBR 的路由协议还有很大的发展空间,有必要对其进行深入的研究和探索,开发出更完善的路由协议,得到更优的水下传感器网络通信性能.

本文针对 DBR 路由协议存在的节点盲目往上传递数据导致数据传递率不高以及只考虑转发节点深度信息而造成的能耗不均的问题,基于 DBR 协议以及对近年来的水下传感网进展的研究,提出了一种基于深度信息的定向路由协议 DBDR (Depth Based Directional Routing).DBDR 提出了新的数据包转发策略和一个新的转发时延算法,使得数据包能够准确快速的发送到目的节点,整个三维水下传感网的能耗能更平均,生存时间更长.

2 DBR 路由协议

2.1 DBR 路由协议概述

DBR (Depth Based Routing) 协议是一种只需节点深度信息便可进行数据传递的路由协议. DBR 协议的水下传感器网络结构分布如图 1 所示,采用的是多 sink 节点分布在水面上,普通传感器节点随机均匀分布在水中的网络部署结构.在数据包传递过程中,普通节点只需要将数据包往深度比自身较浅的节点转发,直到数据包成功到达任何一个 sink 节点,则认为数据包传递成功.

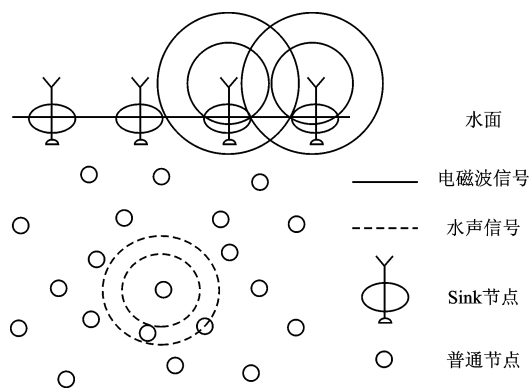


图1 水下传感器网络 DBR 协议结构部署图

2.2 DBR 的转发节点的选择

DBR 协议中引入了深度阈值 D_{th} ($D_{th} \in$

$[-R, R]$, 假设当前节点深度 d_p 与下一跳节点深度 d_r 的深度差为 Δd , $\Delta d = d_p - d_r$; 只有当 $\Delta d \geq D_{th}$ 时, 节点才具有转发资格, 由于 DBR 协议规定当前节点只向深度更浅的节点传递数据, 所以 $D_{th} > 0$, 因此, 只有节点深度比当前节点更小的节点才有资格转发数据包。

DBR 协议中, 每个节点都有自身的深度信息保存在数据包中, DBR 协议通过数据包转发抑制策略选择 depth 值最小的邻节点作为转发节点, 此策略同时抑制其他候选节点发送数据包。

DBR 采用数据包转发优先级的方法用来抑制冗余数据包的传输, 候选节点收到上一跳节点发送的包时, 并非立即转发, 而是首先计算转发时间 ST (sending time) ($ST = \text{收到包的时间} + HT$), HT (holding time) 是节点收到数据包后的等待时间, 即数据包转发延迟, HT 的计算与深度差 Δd 有关:

$$HT = f(\Delta d) = \frac{2\tau}{\delta}(R - \Delta d), \delta \in (0, R] \quad (1)$$

式中, $\tau = R/c$; R 为节点最大传输距离; c 为水声传播速度, 约等于 1 500 m/s; Δd 为当前节点与下一跳的深度差。

由图 2 中所示, n_1 、 n_2 和 n_3 能接收到 S 发送的数据包, n_3 深度大于 S , 没有转发资格; 此外根据节点转发优先级策略, 可知 n_1 的优先级高于 n_2 , n_1 将最先将数据包转发出去 n_2 抑制数据包的发送。

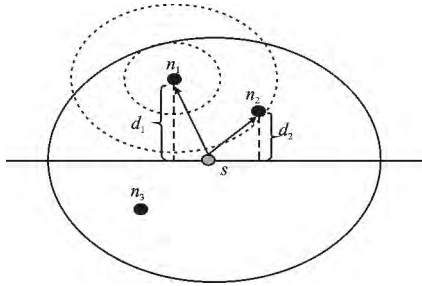


图 2 DBR 路由协议转发节点的选择示意图

3 DBDR 路由协议

DBDR 路由协议是针对 DBR 路由协议的不足, 在两个方面对 DBR 路由协议做出了改进。

3.1 虚拟转发管道的设置

DBR 是单纯的往上发送数据包的路由协议, 在水下传感器网络中, sink 节点的数目和分布会影响到数据包的传送率以及数据包发送的端到端延迟。DBDR 中, 源节点与目的节点的三维坐标信息是已知的, 水下传感器节点可通过定位技术获得自身坐

标信息, 将源节点与目标节点之间相连接成一条虚拟的直线, 以直线为轴线建立一个半径为 w 的虚拟通道, 节点在收到数据包时, 首先判断自身是否处于虚拟通道内, 如果没有, 则丢包。反之, 虚拟通道内的节点具有转发数据包的资格, 这样, 数据包就能从源节点迅速而准确地发送到目的节点。

如图 3 所示, 源节点 S_0 , 目标节点 (sink 节点) S_1 , 以 S_0 与 S_1 相连的线段为轴线建立一个半径为 w 的虚拟转发管道, 只有处于管道内的节点才具有资格转发数据, 在管道内, 节点之间通信是以基于节点深度信息的路由协议进行发送数据的, 即节点发送数据给深度比自身深度要浅的邻近节点, 这样, S_0 的数据包, 通过在管道内往上传递, 能够迅速而准确的到达目的节点 S_1 。

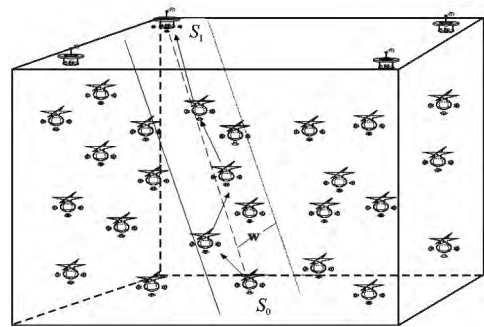


图 3 水下传感器网络 DBDR 数据转发示意图

如图 3 建立一个虚拟转发管道之后, 数据包可以准确地从源节点发送到目的节点, 大大提高了数据包传递的成功率; 并且不需要多个 sink 节点的存在就能够成功传递数据包, 减少了网络的花费。

3.2 转发节点权重的选择

DBR 协议的数据包转发抑制策略中, 转发优先级的时延算法仅仅考虑了深度差 Δd , 而未将能量等信息考虑进去, 导致网络的能量消耗不均匀, 更容易出现死亡节点造成网络空洞, 影响整个网络的生存时长。

DBDR 中, 除了将候选节点的深度信息考虑进去之外, 还将节点的剩余能量以及节点相对管道中心轴线的距离作为权重考虑进去作为转发延迟的计算, 转发时延算法如下:

$$\text{Delay} = \mu * p/w + \alpha * f(d) + (1 - \alpha) * f(e) \quad (2)$$

$$f(d) = 1 - \Delta d/R \quad (3)$$

$$f(e) = 1 - E_r/E_0 \quad (4)$$

式中, p 为转发节点到管道中心轴线的距离, w 为管道半径, μ 为一个极小的常数 ($\mu \ll \alpha$); α ($0 < \alpha <$

1) 为权重系数, $f(d)$ 为候选节点深度函数, $\Delta d = dp - dr$, $f(e)$ 为节点剩余能量相关的函数, E_r 为节点剩余能量, E_0 为节点初始能量。

式(2)中, p/w 为候选节点相对于管道轴线的距离与管道半径的比值, 离中心轴线距离越小, 时延越小, 则转发概率越高。 μ 为一个较小的常系数, μ 越小, 则节点到管道中心轴线的相对距离的影响越小, 在 DBDR 中, 因为主要考虑的因素是节点的深度信息, 以及节点剩余能量, 所以将 μ 设置为一个远小于 α 的值。因此 p/w 对时延的影响会极小, 不会造成时延的增大。 α 为权重系数, α 的值越大, 则候选节点的深度对时延的影响越大, 反之, 则节点剩余能量的影响越大。通过对不同的权重系数 α 的设置, 可以得出一个节点深度和剩余能量之间达到平衡的权衡值 α 。

式(3)中, Δd 为当前节点的深度与候选节点的深度差, 由公式中可以得知, 深度差越大, 则 $f(d)$ 的值越小, 时延也越小, 则转发概率越大。即候选节点中深度越浅的节点的 $f(d)$ 值是越小的, 转发数据包的概率则越大, 这样数据包则更接近目标节点, 则数据包可以以越小的跳数传递到达目标节点, 减少了数据包传递的时延以及能量消耗。

式(4)中, E_0 为节点初始能量。每个节点的初始能量的都是一样的, E_r 为候选节点剩余能量, 由公式可知, 节点剩余能量越多, $f(e)$ 的值越小, 时延也越小, 而转发概率越大。即剩余能量越多的候选节点, 转发数据包的概率越大, 这样, 就不会因为部分节点过多的转发数据包能耗不均过早死亡造成网络的空洞, 大大地提升了整个网络的生存质量。

与 DBR 协议相比, DBDR 将节点剩余能量与节点相对管道中心轴线的距离作为权重因素考虑进去之后, 能更好地均衡网络的能量消耗, 延长网络生存周期。

4 仿真验证

4.1 仿真设置

本文中, 仿真平台为 NS2(Network Simulator, version 2), 仿真环境为一个 $500\text{ m} \times 500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的立方水域。将仿真场景的设置分为两部分, 第一部分为水面部分, 水面部分为部署为坐标位置固定的 sink 节点。第二部分为水下部分, 水下部分的若干个普通水下节点随机均匀分布。

本文所述仿真实验中, 节点之间通过水声进行通信, 仿真采用的通信协议为水下传感器网络

DBDR 协议, 对比通信协议为 DBR 协议和 VBF 协议。水声速度约为 1500 m/s , 节点通信半径为 100 m , 每个节点的初始能量设置为 100 J , 节点发送和接受数据包所消耗的能量分别为 $2.0\text{ J}/\text{packet}$ 和 $0.75\text{ J}/\text{packet}$, 每个数据包大小为 50 byte , 目标节点分布在水面, 即 Z 坐标为 0 , 源节点的坐标设置为 $(100, 300, -500)$, 其他普通节点随机均匀分布于水中。

4.2 仿真结果分析

本文将 DBDR 在 NS2 仿真平台上进行仿真实验, 通过对不同的权重系数 α 的选择, 根据权重系数 α 的不同, 对数据包发送的端到端时延以及网络中节点平均能耗的不同影响。如图 4 所示, 随着 α 的增加, 数据包传递的端到端时延逐渐减小, 而节点的平均能耗则随之增加。在 $\alpha=0.5$ 的时候, 网络中数据包的端到端时延与节点的平均能耗达到了一个平衡点。DBDR 的权重因子 α 的设置, 对网络的端到端时延以及平均能量的消耗有着一定的影响。根据式(2)可知, α 的值越大, 节点的深度信息对时延的影响越大, 则包的端到端时延越小, α 的值越小, 节点的深度影响越小, 能量因素的影响越大, 整个网络的节点的平均能耗则越小。

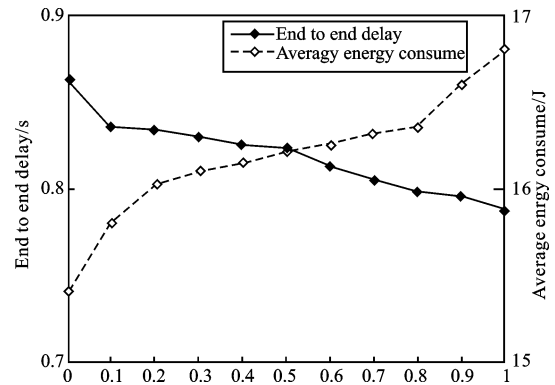


图4 权重值 α 对水下传感器网络通信性能的影响

权重系数 $\alpha=0.5$ 时, 网络中的数据包的平均时延以及网络节点的平均能耗都达到一个比较理想的情况, 在这个平衡值的情况下, 节点的数目对整个网络的也有着很大的影响。如图 5 所示, 随着节点的数目的增加, 数据包的端到端时延随之增大, 网络中节点的平均能耗也逐渐增大。这是因为, 节点数增多, 可供选择的下一跳转发节点也越多, 则数据包转发的跳数增加, 因此会增加数据传递的端到端时延以及节点平均能耗。但是值得注意的是, 并非网络的节点数越少越好, 因为节点数过少的情况下, 网络容易出现空洞现象, 导致数据包无法成功发送以及数据

包的丢失,降低了数据包传递成功率,甚至会导致整个网络连接不通而瘫痪.

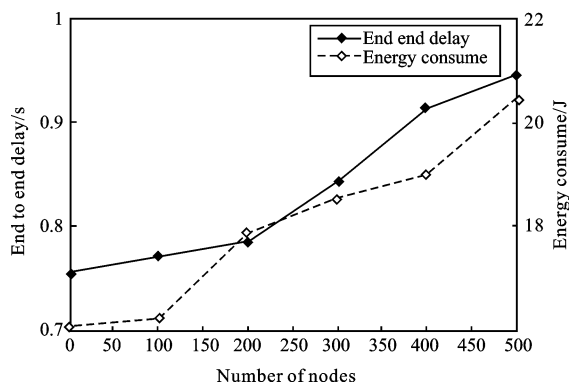


图 5 $\alpha=0.5$,不同节点数对网络性能的影响

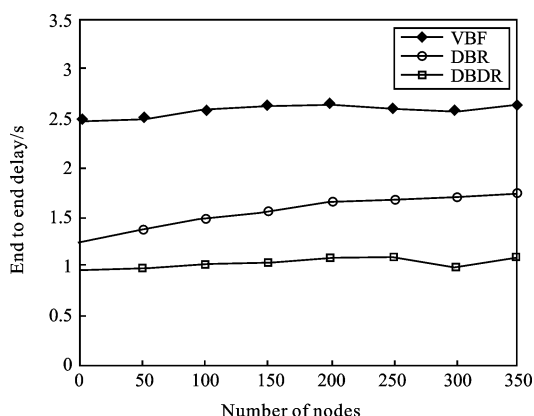


图 6 $\alpha=0.5$,不同的节点数情况下端到端时延的比较

如图 6 所示 DBDR 路由协议与 DBR 以及 VBF 协议在数据包传递的端到端时延的比较,在不同的节点的情况下,DBDR 的平均每个数据包的端到端时延要远小于 DBR 以及 VBF. DBDR 能够通过管道的设置,确定数据包转发的方向,并且在管道内采用基于深度信息,以及节点剩余能量和节点相对管道轴线的距离为权重的数据包转发时延算法,使得 DBDR 协议能成功地将数据包快速而准确的传递给目的节点.

图 7 表示的是在不同的 sink 节点下 DBDR 与 DBR 的数据包传递成功率的比较,由实验数据对比图可以明显地看出,DBDR 的传递率远高于 DBR. 特别是在单 sink 节点的情况下,DBR 路由协议的节点盲目地往水面发送数据包,导致无法将数据包成功发送到 sink 节点所在坐标,由文献[2]可知,在 sink 节点越多的情况下,DBR 包传递成功率越高,因此 DBR 需要多 sink 节点条件才能达到一个较为理想的包传递成功率. 而 DBDR 能够准确的将数据包往 sink 节点所在的坐标位置发送,并不需要多

sink 节点的设置即可达到较高的成功率. 从图中可知,节点较少的情况下,网络容易产生空洞而导致数据包传递率较低,节点数增大的情况下,包传递率随之增加,最后达到高传递率的稳定情况.

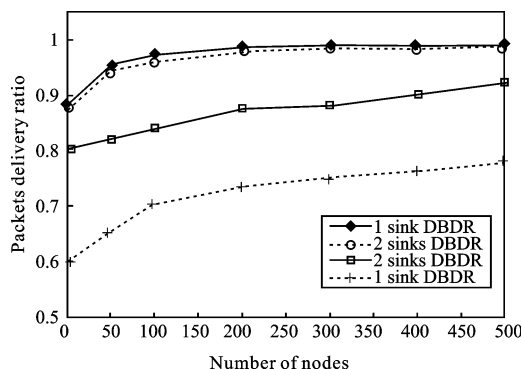


图 7 $\alpha=0.5$,数据包传递率的比较

5 结束语

本文在 DBR 以及 VBF 等已有的路由协议的基础上,提出了基于深度的水下传感器定向路由协议 DBDR. DBDR 以源节点与目的节点相连的线段为中心轴线建立一个半径为 w 的虚拟转发管道,只有处于管道内的节点才有资格转发数据;在管道内,节点以基于深度信息的路由协议发送数据包. 同时,对 DBDR 提出了一种新的节点转发数据包的转发时延算法,将节点的深度信息、剩余能量以及节点相对虚拟管道的中心轴线的距离作为影响因素考虑进去,并且设置了权重因子来控制这些因素的影响.

仿真实验证明,DBDR 具有更低的端到端时延,以及更高的数据包传递成功率. 能够很好地应用于水下三维传感器网络中,提高网络的通信性能.

本文的 DBDR 只在简单的网络部署下进行了仿真验证实验,接下来要在更多不同的网络部署结构下应用 DBDR 协议,研究不同部署情况下 DBDR 的性能,更加优化 DBDR 路由协议.

参考文献:

- [1] Xie Peng, Hong Cuijun, Lao Li. VBF: vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006 (3976):1216-1221.
- [2] Yan Hai, Zhijie Jerry Shi, Cui Junhong, DBR: Depth-based routing for underwater sensor networks [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008 (4982): 72-86.
- [3] Lee U, Wang P, Noh Y, et al. Pressure routing for

- underwater sensor networks[C]//2010 Proceedings of IEEE INFOCOM. San Diego, CA: IEEE Press, 2010:1-9.
- [4] Noh Youngtae, Lee Uichin, Wang Paul, et al. VAPR: void-aware pressure routing for underwater sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013,12(5):895-908.
- [5] 黄芬,陈名松. 水下无线传感器网络 DBR 路由协议研究[J]. 电视技术, 2012,36(13): 74-77.
- [6] Liu Guangzhong, Li Zhibin. Depth-based multi-hop routing protocol for underwater sensor network[C]//Proceeding of the 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation. China, Wuhan, IEEE Press, 2010:268-270.
- [7] Reza Javidan, Hamideh Rafiee. A new energy efficient and depth based routing protocol for underwater sensor networks[J]. British Journal of Science, 2013, 8(1): 22-30.
- [8] Wahid A, Kim D. An energy efficient localization-free routing protocol for underwater wireless sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012:1-11.
- [9] 康文静,刘功亮,李亚星. 基于深度和距离感知的三维水下传感器网络路由算法[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(35): 8780-8784.
- [10] 金军,纵芳,梁妙元,等. 水下传感器网络路由协议研究[J]. 电信科学 2012, 28(2): 123-127.
- [11] Paolo Casari, Michele Zorzi. Protocol design issues in underwater acoustic networks[J]. Computer Communications, 2011,34(17): 2013-2025.
- [12] Jafri M R, Ahmed S, Javaid N, et al. AMCTD: Adaptive mobility of courier nodes in threshold-optimized DBR protocol for underwater wireless sensor networks [C]//2013 Eighth International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications. French, Compiègne, 2013:93-99.
- [13] Jafri M R, Javaid N, Ahmed N, et al. Impact of acoustic propagation models on depth-based routing techniques in underwater wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Victoria, BC: IEEE Press, 2014: 479-485.
- [14] Coutinho R W L, Vieira L F M, Loureiro A A F. DCR: depth-controlled routing protocol for underwater sensor networks[C]//2013 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Croatia, Split, 2013:453-458.
- [15] So Yan'an, Liu Guangzhong. Improved DBR protocol based on partial update[J]. Microcomputer & Its Applications, 2014,33(12):51-54.
- [16] Yu Haitao, Yao Mianmin, Gao Hhengguo, et al. Improved DBR routing protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. Sensor Letters, 2014,12(2):230-235.

作者简介:

谢维佳 女,(1989-),硕士研究生.研究方向为网络组网工程、无线传感器网络. E-mail:xiweijia0816@126.com.

刘建明 男,(1975-),博士后,教授,硕士研究生导师.研究方向为计算机及通信网络组网工程.

何 焯 女,(1989-),硕士研究生.研究方向为飞艇中继网络组网工程.

李 龙 男,(1989-),博士研究生.研究方向为网络组网工程、无线传感器网络.

(上接第 39 页)

- [10] Dudek P, Szczepanski S, Hatfield J C. A high-resolution CMOS time-to-digital converter utilizing a vernier delay line[J]. Solid-State Circuits, IEEE Journal of, 2000,35(2):240-247.
- [11] De Caro D. Glitch-free NAND-based digitally controlled delay-lines[J]. Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on, 2013, 21(1):55-66.
- [12] Jianjun Y, Dai F F. On-chip kitter measurement using vernier ring time-to-digital converter[C]// Test Sym-

posium (ATS). 2010 19th IEEE Asian, China, Shanghai, 2010: 167-170.

作者简介:

解俊杰 男,(1990-),硕士研究生.研究方向为大规模集成电路设计.

杨海钢(通讯作者) 男,(1960-),研究员,博士生导师.研究方向为微电子学与集成电路技术、可编程信号处理器架构与 Soc 设计. E-mail:yanghg@mail.ie.ac.cn.