

低时延能耗均衡的水声传感器网络 簇间路由算法

姜卫东, 雷 辉, 郭 勇

(海军指挥学院信息系, 江苏南京 211800)

摘要: 针对水声传感器网络的簇间路由选择问题, 提出了一种基于前向网关的低时延能耗均衡路由算法, 该算法采用最优方向角原则和能耗均衡原则选择中继簇头和中继网关, 以减小长延迟和高能耗对水声通信的影响。仿真结果表明该算法在网络平均能耗、端到端时延和网络生命周期等方面具有较好的性能。

关键词: 水声传感器网络; 路由算法; 时延; 能耗

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-02-0176-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.02.017

Low delay and energy-consumption balanced inter-cluster routing algorithm for underwater acoustic sensor networks

JIANG Wei-dong, LEI Hui, GUO Yong

(Department of Information, Naval Command College, Nanjing 211800, Jiangsu, China)

Abstract: In view of the selection of inter-cluster routing for underwater acoustic sensor networks, a low delay and energy-consumption balanced energy routing (LDEBR) algorithm is proposed in this paper. In order to minimize the influence of long delay and high energy consumption on underwater acoustic communication, the algorithm adopts optimal angle and energy equilibrium principle to select relay cluster head and gateway. Simulations demonstrate that the LDEBR algorithm has advantages in average energy consumption, end-to-end delay and network lifetime.

Key words: underwater acoustic sensor networks; routing algorithm; delay; energy consumption

0 引言

随着陆基无线传感器网络的发展, 水声传感器网络也得到越来越多的关注, 并在环境监测、海洋勘探、军事监视等方面有着广泛的应用^[1]。然而水声信道与陆基无线电信道大不相同, 是一个随机时-空-频变、可用带宽窄、强多径干扰、强环境噪声、多普勒频移严重的信道, 这些因素给水声传感器网络的研究和运用带来了巨大挑战^[2]。尽量减小水下声信道的高传输延迟、强时变、多径效应严重等不利因素的影响, 设计高效的水声传感器网络通信协议成为该领域研究的热点和难点^[3,4]。

目前, 已有不少学者对水声传感器网络路由协议展开研究。针对水下环境的特点, 孙桂芝等学者提出了一种适用于水下传感器网络的路由协议^[5],

该协议基于位置信息, 具有能量高效、成功率高、传输延时低等特点。水下传感器节点靠电量有限的电池供电且更换困难, 文献[6]针对网络负载平衡问题, 提出了一种采用直跳和多跳混合传输的策略, 有效延长了网络生存周期, 但该策略并不适用于要求实时传输的水声传感器网络。针对水下声通信的高传输延迟和高能耗特点, 文献[7]提出了一种基于前向簇头与前向网关的路由算法(Forward-cluster-head and Forward-gateway Based Routing, FFBR)。该算法基于分簇结构, 在分簇初始化的过程中“捎带”选择前向簇头和前向网关, 以形成朝向基站节点(Sink)的方向性节能路由, 有效避免了路由建立的开销和延迟。虽然 FFBR 算法能节省簇头能耗, 提高数据传输的及时性, 但该算法在选择中继网关和中继簇头上均采用最优方向角原则, 无法避免剩余能量较低的节点充当中继网关, 容易导致部分节点过早死亡。

本文提出了一种基于前向网关的低时延能量均衡路由算法(Low Delay and Energy Balanced Routing Algorithm, LDEBR), 该算法采用最优方向

收稿日期: 2013-01-27; 修回日期: 2013-03-31

基金项目: 全军军事学研究生资助课题(2010JY0669-386)

作者简介: 姜卫东(1972-), 男, 江苏海门人, 博士, 副教授, 研究方向为水声信号处理、盲信号处理、水声通信等。

通讯作者: 姜卫东, E-mail: weidong_j@sina.com

角原则和能耗均衡原则选择中继簇头和中继网关，以减小长延迟和高能耗对水声通信的影响。

1 模型描述

1.1 网络模型

本文考虑静态二维水声传感器网络，水声通信的能耗模型采用与文献[8]相同的能量消耗模型，并作如下假设：

- (1) 网络中唯一的基站部署在监测区域外，基站的传输范围覆盖整个网络，基站的能量不受限，并且基站知道网络初始部署情况；
- (2) 所有节点是同构的，且具有数据融合的功能；
- (3) 链路是对称的，且节点具有测距功能；
- (4) 节点可以根据通信距离调整发射功率。

1.2 基于簇结构的网络模型

基于分簇结构的网络被划分为若干个簇，每个簇通常由一个簇头节点(Cluster Head, CH)以及多个成员节点(Cluster Member, CM)组成。成员节点只与簇头通信，簇头与簇头构成高一级的虚拟骨干网，负责簇内的数据融合和簇间数据转发，簇头之间通过网关中继方式实现网络连通和数据传输，如图 1 所示。分簇结构在节能、可扩展性和稳定性等方面存在优势，本文所提算法是基于分簇结构设计。

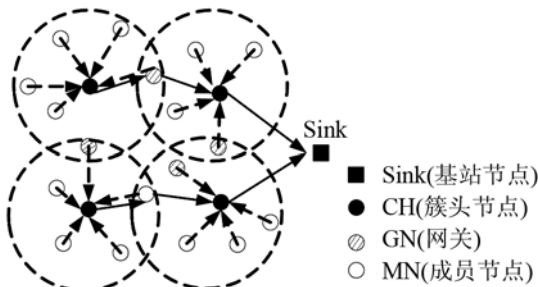


图 1 基于簇结构的网络模型
Fig.1 Network model based on the cluster structure

2 基于前向网关的低时延能耗均衡路由算法(LDEBR)

针对文献[7]FFBR 算法无法避免剩余能量较低的节点充当中继网关，容易导致部分节点过早死亡情况，本文提出了一种基于前向网关的低时延能量均衡路由算法(LDEBR)。

2.1 LDEBR 算法思路

LDEBR 算法综合考虑网络能耗均衡与时延的

因素，在选择中继节点的过程中，先利用最小方向角转发原则确定最佳方向角的中继簇头，然后根据相关原则从前向网关集合中挑选较优的中继网关，如图 2 所示。

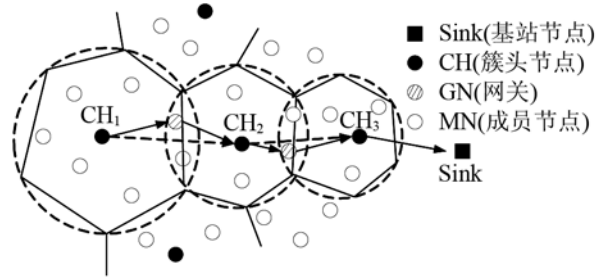


图 2 LDEBR 算法的示意图
Fig.2 Illustration of LDEBR algorithm

2.2 LDEBR 算法的步骤流程

LDEBR 算法运用于分簇结构网络，网络完成分簇初始化后，当源簇头节点有数据包向 Sink 节点发送时，首先判断是否存在前向网关，当存在网关时，分别确定中继簇头和中继网关；否则，该源簇头直接与 Sink 通信，直到将数据传送至 Sink 节点，具体流程如图 3 所示。

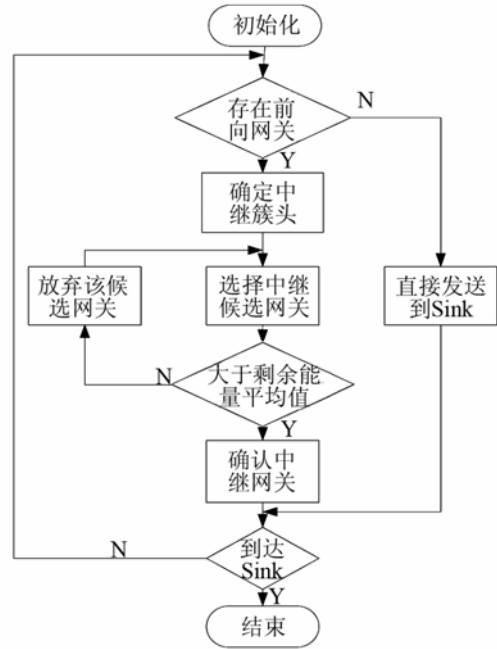


图 3 LDEBR 算法的流程图
Fig.3 Flow chart of LDEBR algorithm

其中，在确定中继簇头和中继网关过程中，LDEBR 算法分别采用了最优方向角原则和具有能量意识的方向角原则：

- (1) 通过最优方向角原则从相邻的簇头集合中确定中继簇头，如图 4 所示，选择具有最优方向的簇头作为中继簇头，如 CH₂。
- (2) 通过具有能量意识的方向角原则选择

较优的中继网关，如图 5 所示。簇头 A 与其相邻簇头 E 之间的候选网关节点有 B、C、D，按照最优方向角原则应该选择 B 为中继网关。若网关节点 B 的剩余能量小于候选网关节点剩余能量的平均值，则候选网关集合删除节点 B，重新按照最优方向角原则选择次优的 C 节点作为中继网关。

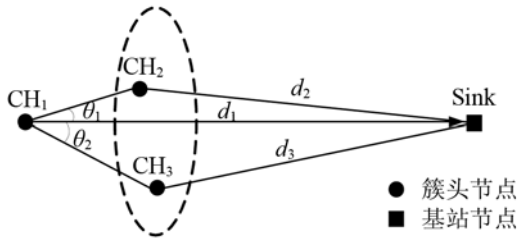


图 4 最优方向角原则
Fig.4 Optimal angle principle

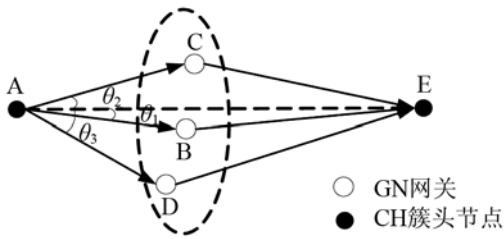


图 5 具有能量意识的最优方向角原则
Fig.5 Optimal angle principle with energy awareness

2.3 LDEBR 算法分析

在网络初始化过程中，LDEBR 算法的网关节点并没有能量意识，有必要对网关存在条件和剩余能量进行分析。

(1) 前向网关存在的条件

根据 2.2 节的网络模型，路由选择过程中，每簇头节点都有前向候选网关集合。该集合的节点数目直接影响到路由建立过程的复杂度，候选节点数目太少或者不存在，则不利于路由的建立，数目太多则会增加路由算法的复杂度。相邻簇头的广播范围与候选网关存在数目有直接的关系，如 6 所示。

根据图 6(a)和图 6(d)可知，两个簇间存在良好网关的条件：两个簇头节点的距离小于两簇广播半径之和 $2r$ (假设簇的广播半径相等时，即 $r_1=r_2=r$)，且至少大于一个簇广播半径 r 。

(2) 中继网关的剩余能量计算

假设候选网关集合中的前向网关个数为 x ，若前向网关存在即 $x \geq 1$ ， $E_{left}(j)$ 表示前向网关 j 的剩余能量，则前向网关的平均剩余能量 $E_G^{\wedge}(x)$ ：

$$E_G^{\wedge}(x) = \frac{1}{x} \sum_{j=1}^x E_{left}(j)$$

通过比较候选网关 j 的剩余能量 $E_{left}(j)$ 与候选

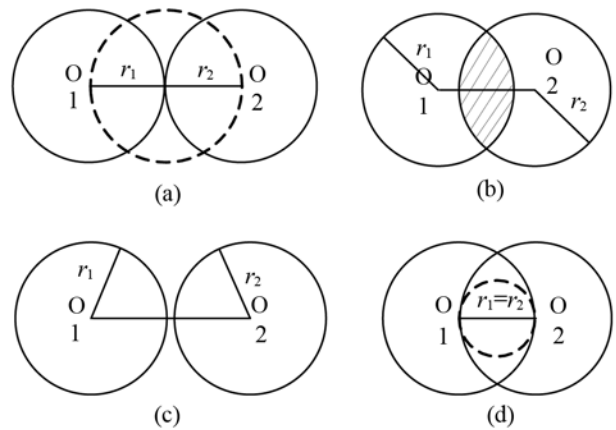


图 6 相邻簇头的广播范围示意图
Fig.6 Broadcasting range of adjacent cluster heads

网关集合的平均剩余能量 $E_G^{\wedge}(x)$ ，筛选出 $E_{left}(j) > E_G^{\wedge}(x)$ 的候选网关集合 G_i' ，并在新的网关集合中按照最优方向角选择中继网关。

LDEBR 算法通过具有能量意识的路由选择原则，综合考虑了网络时延和能耗均衡等因素，弥补了 FFBR 算法的不足之处。

3 仿真实验及结果分析

文章采用 OPNET 作为仿真工具，对 LDEBR、FFBR 与 DSR^[9](只在簇头间运用)三种算法进行仿真实验。实验场景配置为：100 个节点以随机方式布放在 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 的水域内，平均水深取 70m，网络中唯一的基站部署在监测区域外，其坐标为 $(-2, 5)\text{km}$ ，节点初始能量为 10J，数据包长度为 256 bits，控制信息长度为 80bits。忽略节点之间的物理链路错误，假设每个数据发送周期内只有一定比例的节点产生数据(该比例从 10% 开始变化到 50%)。

3.1 网络平均能量消耗

各算法的网络平均能耗如图 7 所示。DSR 采用

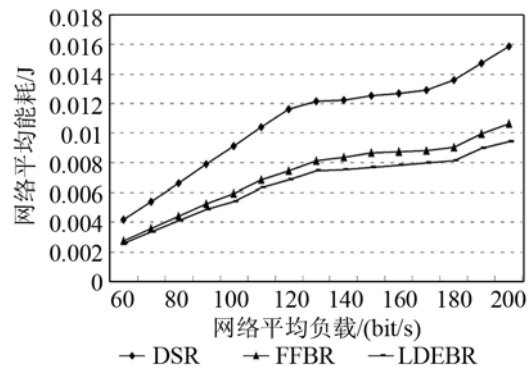


图 7 各算法的能量消耗对比
Fig.7 Energy-consumptions of different algorithms

泛洪的方式建立路由，路由开销非常大，因此网络平均能耗明显高于其它路由算法。由于 FFBR 和 LDEBR 算法采用基于前向网关中继数据包，并且采用最优方向角原则有效地向基站转发数据包，有效节省簇头的能量消耗，减少了网络平均能耗。

3.2 网络平均端到端延迟

各算法的网络平均端到端延迟如图 8 所示，在低负载情况下，各算法的性能相近，随着网络负载的增大，网络冲突加剧，端到端延迟都成倍地增加，当增大到一定程度后都趋于下降。其中，DSR 算法的延迟最大，这是因为随着网络负载的加大，网络繁忙导致数据传输时冲突增多，而 DSR 采用洪泛式传输广播消息，频繁的冲突导致重传广播次数增多，从而延迟较大。FFBR 和 LDEBR 算法引入了网关中继的传输方式，在低负载情况下，FFBR 和 LDEBR 算法均采用最优方向角原则传输数据包，因而平均端到端延迟相差不大。在高负载情况下，LDEBR 算法通过具有能量意识的最优方向角原则有效避免选择低能量的节点充当中继节点，减少由节点失效导致的重传次数，因而平均端到端延迟较小。

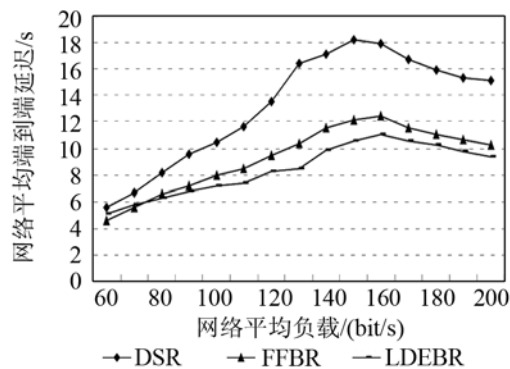


图 8 各算法的端到端延迟对比
Fig.8 End-to-end delays of different algorithms

3.3 网络生命周期

设置每个周期网络中节点产生数据包的比例为 40%，统计 10 次实验结果的平均值，比较在各算法运行下的网络生命周期。

各种算法的网络生命周期如图 9 所示，无论是以第一死亡节点出现的轮数作为网络生命周期，还是以所有节点死亡的轮数或者是一半节点死亡的轮数来衡量，LDEBR 算法的网络生命周期比 DSR 和 FFBR 算法有所延长。

4 结束语

由于水声传感器网络具有不同的应用场景，设

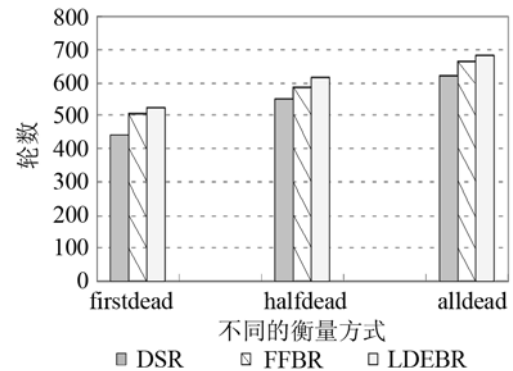


图 9 各算法的网络生命周期
Fig.9 Lifetimes of different algorithms

计通用的路由算法是非常困难的。针对水声信道的高时延和高能耗特点，基于簇结构的水声传感器网络，本文提出一种低时延能量均衡的簇间路由算法。仿真结果表明 LDEBR 算法在平均端到端延迟、平均能量消耗、网络生命周期等性能方面存在显著优势。LDEBR 算法能保障较小时延的同时均衡了网络能耗，实现了网络能量的平稳下降，有效地延长了网络生命周期。

参 考 文 献

- [1] Proakis J G, Sozer E M, Rice J, et al. Shallow water acoustic networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(11): 114-119.
- [2] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks Journal, 2005, 3(3): 257-279.
- [3] 许肖梅. 水声通信与水声网络的发展应用[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 811-816.
XU Xiaomei. Development and applications of underwater acoustic communication and networks[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(6): 811-816.
- [4] 郭忠文, 罗汉江, 洪锋, 等. 水下无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(3): 377-389.
GUO Zhongwen, LUO Hanjiang, HONG Feng, et al. Current progress and research issues in underwater sensor networks [J]. Computer Research and Development, 2010, 47(3): 377-389.
- [5] 孙桂芝, 黄耀群. 基于位置信息的水声传感器网络路由协议[J]. 声学技术, 2007, 26(4): 597-601.
SUN Guizhi, HUANG Yaoqun. A position-based routing protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(4): 597-601.
- [6] 张光旭, 窦金凤, 郭忠文, 等. 基于负载均衡的水声传感器网络生存期延长策略[J]. 计算机应用, 2008, 28(6): 110-114.
ZHANG Guangxu, DOU Jinfeng, GUO Zhongwen, et al. Lifetime prolonging strategy based on balancing traffic-load in underwater acoustic sensor networks[J]. Computer Applications, 2008, 28(6): 110-114.
- [7] 张剑, 黄本雄, 张帆. 一种适合水下无线传感器网络的能量有效路由协议[J]. 计算机科学, 2008, 35(11): 38-41.
ZHANG Jian, HUANG Benxiong, ZHANG Fan, et al. An energy efficient routing protocol applied in underwater sensor networks[J]. Computer Science, 2008, 35(11): 38-41.
- [8] Sozer E M, Stojanovic M, Proakis J G. Underwater acoustic networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72-83.
- [9] Johnson D B, Maltz D A, Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks[M]. Mobile Computing, edited by Imielinski T, Korth H, Kluwer Publishing Company, 1996: 153-181.