

## 基于分层的水下传感器网络路由策略

彭舰<sup>1</sup>, 洪昌建<sup>1</sup>, 刘唐<sup>1,2</sup>, 张云勇<sup>3</sup>

(1. 四川大学 计算机学院, 四川 成都 610065; 2. 四川师范大学 基础教学学院, 四川 成都 610068;  
3. 中国联通研究院 平台与云计算研究中心, 北京 100032)

**摘要:** 提出一种基于分层的水下传感器网络路由协议 (layered-DBR, layered-depth based routing)。节点进行一次信息广播后, 只允许指定深度范围内的节点进行消息接收, 以达到控制网络副本的目的, 最终建立与网络冗余相关的网络分层模型。在分层网络中, 节点首先需要计算消息转发前后的相对深度距离与相对剩余能量, 进而计算出消息的转发概率。同时, 建立一种消息队列管理机制, 该队列同时具有消息转发管理和历史记录管理的功能, 并给出消息的入列和出列方法。仿真实验表明, layered-DBR 能够有效地控制网络冗余, 与 DBR 和 Flooding 算法相比, layered-DBR 能有效地减少网络能耗, 延长网络寿命。

**关键词:** 水下传感器网络; 分层模型; 转发概率; 消息队列

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)06-0025-07

## Strategy of routing based on layered for underwater wireless sensor networks

PENG Jian<sup>1</sup>, HONG Chang-jian<sup>1</sup>, LIU Tang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yun-yong<sup>3</sup>

(1. College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
2. College of Fundamental Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China  
3. Platform and Cloud Computing Research Center, China Unicom Research Institute, Beijing 100032, China)

**Abstract:** A layered-depth based routing protocol was proposed for underwater wireless sensor networks (layered-DBR). After nodes broadcast, message only could be received by nodes in predefined depth in order to control the copies of message and finally a network hierarchy model related to redundancy could be built. In this model, the relative depth between nodes and the resident energy of nodes need to be calculated before and after the message forwarding, and then the message forwarding probability can be obtained. A message queue management mechanism was established, with which could manage the message's forwarding and history messages, and then the dequeue and enqueue methods were proposed. Compared with DBR and Flooding by simulation, the layered-DBR algorithm can control the network redundancy, reduce the network energy consumption, and prolong the network lifetime.

**Key words:** underwater sensor networks; hierarchy model; forwarding probability; message queue

### 1 引言

随着世界各国对海洋权益的日益重视、发展海洋经济热潮的兴起和陆地无线传感器网络研究的迅速发展, 水下无线传感器网络(UWSN, underwater wireless sensor networks)已经成为新的研究热点<sup>[1-4]</sup>。水下传感器网络将采集到的水下环境数据发送给用

户来辅助决策, 在环境监测、资源勘探、灾难预警和潜艇探测等民用和军用领域均具有广阔的应用前景<sup>[5-8]</sup>。

在实际应用中, 由于水下传感器网络的特殊网络环境, 无线电波在水中衰减迅速, 不适用于长距离的数据传输, 因而通常采用水声通信。由于 GPS 在水下环境中无法使用, 节点无法感知全局位置信

收稿日期: 2013-08-11; 修回日期: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61303204, U1333113)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(61303204, 01333113)

息；同时节点随着水流的运动会一定范围内移动，造成了网络的间隙连通性。以上水下环境特点均对水下传感器网络的数据传输带来了极大的挑战。关于水下传感器网络的路由策略，研究者做了大量的研究。

HUANG 等<sup>[9]</sup>提出了一种能量有效的水下传感器网络路由算法，该算法利用转发节点选择器来确定下一跳转发节点，同时利用转发树裁剪机制来减少网络冗余；由于转发节点选择器与转发树裁剪机制的实现依赖于节点的全局位置信息，导致该算法具有较大的局限性。

XIE 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于向量的数据传输策略 VBF(vector-based forwarding protocol)，数据采集节点利用了类似虚拟路由管道向量的思想，所有的分组通过这个管道从源节点转发到目的节点，只有靠近管道的节点才能转发信息。由于传感器节点不需要状态信息且只是和少数路径上的节点进行通信，VBF 能够有效地减少网络能耗，延长网络寿命，但是虚拟管道的确定需要水下传感器网络节点提供全局位置信息。XIE 等<sup>[11]</sup>利用 VBF 管道的思想提出了一种多跳的数据传输策略 HH-VBF(hop-by-hop vector based forwarding)，HH-VBF 引入了多跳传输，将长管道划分为多段较短的管道，避免管道过长带来的巨大能量消耗，进一步延长了网络寿命，但是 HH-VBF 仍然需要获取节点全局位置信息。在实际的水下环境中，节点的全局位置信息无法获取，VBF、HH-VBF 和其他基于全局位置信息的水下传感器网络路由算法具有很大的局限性。

YAN 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于深度信息的路由 (DBR, depth based routing) 算法，该算法通过节点携带的压力传感器获取节点当前的深度值，并保存在数据分组中，数据转发时，只有节点深度小于该深度值时才可以进行转发，否则丢弃。同时 DBR 利用深度阈值来控制网络副本，但没有具体定义深度阈值的取值。LIU 等<sup>[13]</sup>利用 DBR 协议的思想，提出了一种基于深度的多跳路由 (HH-DBR, hop-by-hop depth based routing) 协议。LEE 等<sup>[14]</sup>基于同样的思想提出了一种基于压强的路由 (PR, pressure routing) 策略，即在所有的邻居节点中，选择压强最低的节点作为数据的转发节点。DBR、HH-DBR、PR 等类似算法虽然没有利用节点的全局位置信息，但是同样也未考虑水流流动性给水下传感器网络带来的影响。

通过分析水下传感器网络的拓扑结构，得知水下传感器网络的数据传输具有有向性，即自下向上的数据传输。若引入分层机制，不仅在逻辑上简化水下传感器网络模型，而且能够避免水下传感器网络中同层节点进行数据通信，从而能够有效降低网络的通信能耗；若能提出满足水下传感器网络特性的机会路由，就能够满足水下传感器网络动态性的特点，使网络变得可靠。同时引入消息队列，可以对网络中的消息副本进行管理，有效降低网络冗余。因此本文综合以上因素，提出一种基于分层的路由策略 (layered-DBR)，该算法只需获取节点所在的深度信息，当节点进行一次消息广播后，以该节点邻居节点的数量为参数，结合网络中节点的分布特点，计算出可作为转发节点的邻居节点所在的深度范围，即只有处于该深度范围内的节点接收数据。从而，得到节点通信半径与网络分层间距的关系函数，进而确定满足该深度范围的网络分层间距。引入消息队列管理机制，利用数据分组中携带的多种信息参数，仅针对特定深度范围内的节点，计算其转发消息的概率，并给出消息的插入方法和消息丢弃方法。

## 2 网络与能耗模型

### 2.1 网络模型

在网络初始状态， $n$  个传感器节点随机分布在一个  $M \times M \times N$  的长方体内，10 个 sink 节点均匀地分布在监控领域的水面（长方体上表面），如图 1 所示，并假设水下传感器网络具有以下性质。

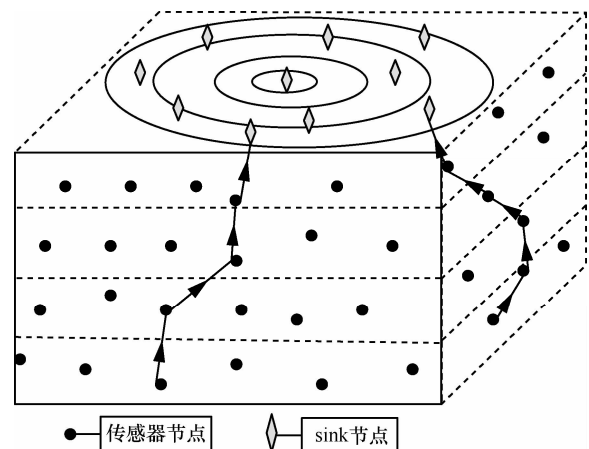


图 1 水下无线传感器网络模型

1) 水下传感器网络由固定在海底的静态节点、悬浮在水中的动态节点和浮在水面的 sink 节点构成。

2) 所有非 sink 节点均具有唯一的 ID, 并均匀地分布在监测区域。

3) 传感器节点采用水声通信进行数据通信, 且数据分组传送到任意 sink 节点, 均表示数据被成功采集。

4) 所有非 sink 节点具有相似的处理/通信能力。

5) 节点按照预先设置的功率进行数据通信, 一经部署通信功率不再改变。

6) 节点不具有位置感知能力, 但能感知深度信息。

7) 节点周期性进行数据采集任务, 并始终有数据传送到基站。

8) 网络的生命周期被定义为 10% 节点死亡的时间<sup>[15]</sup>。

### 2.2 能耗模型

本文采用与文献[16]相同的水声通信能耗模型。对于当前的水下传感器网络节点, 发送数据产生的能耗远远地超过节点接收数据产生的能耗, 因此本文用节点发送数据产生的能耗来衡量整个网络的能耗, 即不考虑数据接收带来的能耗。式(1)给出了水下传感器网络中节点发送数据的能耗模型。

$$E = P_o T_p d^k 10^{\partial(f)d/10} \quad (1)$$

其中,  $P_o$  为数据接收的相关能耗,  $T_p$  为传输时延,  $d$  为传播距离,  $k$  为水声传播模型的相关参数。

能量衰减系数为

$$\partial(f) = 0.11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (2)$$

式(2)给出了  $\partial$  是与频率  $f$  相关的能量衰减系数。

### 2.3 节点运动模型

水下传感器网络节点通过锚链被锚定, 通过调整锚链长度来形成三维网络, 节点随着海流做受限的运动<sup>[17]</sup>。图 2 给出了节点的运动范围。

如图 2 所示, 锚链长度为  $L$ , 通过对节点受力分析得知, 节点受到了水流横向的冲击力  $F$ , 水流产生的浮力  $f$  以及锚链对节点的拉力  $T$ , 这 3 种力构成了一组平衡力, 夹角度数为  $\beta$ 。

于是有  $\tan\beta = F/f$ , 节点的运动范围  $Field = [L\cos\beta, L]$ 。

为了模拟水下传感器网络的动态性特点, 本文假定节点在运动范围内采用 Random Waypoint 运动模型<sup>[18]</sup>。Random Waypoint 运动模型描述为: 传感器节点在运动空间  $A$  内随机生成坐标值产生起始点

$S$  和目的点  $D$ , 节点运动速度在  $[V_{\min}, V_{\max}]$  之间随机取值并匀速从  $S$  沿直线运动到  $D$ , 再在  $[T_{\min}, T_{\max}]$  中随机选取一个时间  $T_{\text{pause}}$  保持静止, 这样完成一次运动过程。随后节点将本次运动的目的地  $D$  作为下次运动的起始点  $S$ , 开始下一次运动过程, 如此重复。网络中所有传感器节点均遵循上述运动过程, 它们之间相互独立。

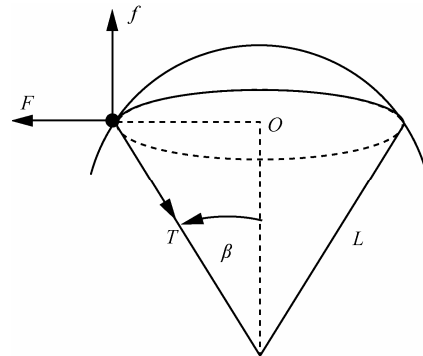


图 2 受限节点的受力

## 3 算法设计

### 3.1 算法设计路线

首先分析水下传感器网络的环境特点, 即水声通信、节点不具有感知全局位置信息的能力、网络高时延、节点移动性等, 并建立相关的网络模型。

如图 3 所示, 该算法思想立足于网络冗余, 建立与网络冗余相关的接收节点的深度范围和网络分层。同时针对特定深度范围内的传感器节点, 建立机会转发的路由机制, 从而满足水下传感器网络的特性。

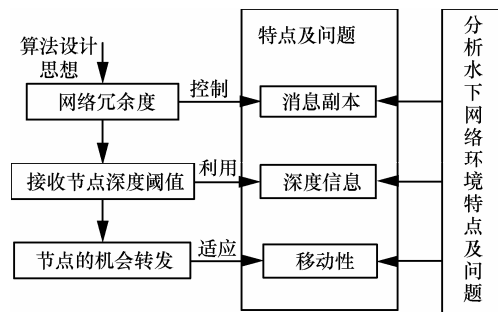


图 3 算法设计路线

### 3.2 算法描述

节点将带有当前深度信息的数据分组进行一次广播, 接收该数据分组的邻居节点获该发送节点的深度信息, 结合节点通信半径、网络冗余度等信

息计算通信范围  $D$ ，并检查自己是否在通信范围  $D$  内。如果在，则计算转发概率  $P$ ；反之，则丢弃该数据分组。

## 4 分层路由策略

### 4.1 分层间距 $d$ 与网络冗余 $\zeta$

采用静态分层模型，通过数学分析，预先确定网络的分层间距；该分层模型下，层内节点之间无需进行数据通信，层间通信采用了机会路由；节点  $i$  通过感知当前深度信息来确定层号，机会转发带来的极大挑战是网络冗余，本文从网络冗余角度分析，提出分层间距  $d$ ，该分层间距将依赖于节点的通信半径  $R$  和网络的冗余度  $\zeta$ （每个节点广播后最多存在  $\zeta$  个节点接收数据）。

在总体积为  $V_U$  的区域内随机分布  $n$  个水下传感器节点，由此构成水下传感器网络。假设该网络的网络冗余度为  $\zeta$ ，为保证层内任意节点的接收范围内最大概率地存在  $\zeta$  个节点，考虑图 4 所示的情况。在  $T$  时刻，某节点位于图 4 所示的原点处，节点通信半径  $R$  为预设固定值，假设分层间距为  $d$ 。由于分层网络模型下同层节点无需进行通信，该节点在  $T$  时刻的通信范围被限制在区域  $D_{ABCD}$  内。

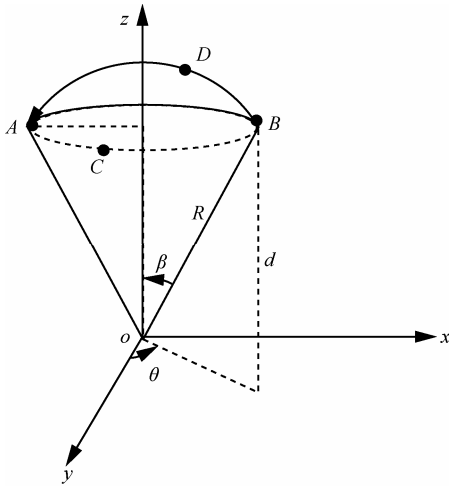


图 4 数据转发模型

根据网络冗余度的定义，该节点的通信范围  $D_{ABCD}$  内的最大概率存在着  $\zeta$  个节点来接收数据。对通信范围  $D_{ABCD}$  和网络分层间距  $d$  做了如下数学分析。

$D_{ABCD}$  的体积可由球锥  $ABCDO$  的体积减去圆锥  $ABCO$  的体积，求解区域  $D_{ABCD}$  的体积  $V_{ABCD}$

$$\begin{aligned} V_{ABCD} &= \iiint_{\Omega_{ABCDO}} dv - \iiint_{\Omega_{ABCO}} dv \\ &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\beta d\theta \int_0^R r^2 \sin\theta dr - \frac{1}{3}\pi(R \sin\beta)^2 R \cos\beta \\ &= (2 - 2\cos\beta - \cos\beta \sin^2\beta) \frac{\pi R^3}{3} \end{aligned} \quad (3)$$

求解区域  $D_{ABCD}$  的传感器数量  $\zeta$

$$\frac{V_{ABCD}}{V_{\max}} = \frac{\zeta}{N} \quad (4)$$

因此  $\zeta$  是一个与通信半径  $R$  与  $\beta$  夹角的关系函数  $\Gamma(R, \beta)$

$$\Gamma(R, \beta) = (2 - 2\cos\beta - \cos\beta \sin^2\beta) \frac{\pi R^3 N}{3V_{\max}} \quad (5)$$

同时，分层间距  $d$  依赖于通信半径  $R$  和网络冗余度  $\zeta$ 。设

$$d = R \cos\beta = \Psi(\Gamma(R, \beta)) \quad (6)$$

在冗余度为  $\zeta$  的水下传感器网络中，对于任意深度为  $h$  的传感器节点，其所在层（自上而下编号 1, 2, ...）的层编号为  $L(h)$ ，其通信范围内接收节点的深度区间为  $I(h)$ ，其中  $\text{floor}()$  函数代表向下取整

$$L(h) = \text{floor}(h/\Psi(\Gamma(R, \beta))) \quad (7)$$

$$I(h) = [h + \Psi(\Gamma(R, \beta)), h + R] \quad (8)$$

通过预先设定节点通信半径  $R$ ，根据实际的应用需求给出冗余度  $\zeta$ ，便能计算出相应的网络分层间距  $d$  和任意节点对应的下一跳邻居节点所在的深度区间  $I(h)$ ，并对水下传感器网络冗余进行初步的控制。

### 4.2 机会路由中消息转发概率

针对节点位置信息未知的水下传感器网络，结合网络分层间距和节点的下一跳邻居节点所在的深度区间，提出一种基于相对深度距离和相对剩余能量的机会转发路由。

**定义 1** 相对深度距离。水下传感器网络中，任意节点  $i$  进行一次数据转发，其下一跳邻居节点所在的深度范围为  $[d_1, d_2]$ ， $i$  的相对深度距离为  $E_m$ 。其中  $d_i$  为该节点的当前深度信息。

**定义 2** 相对剩余能量。水下传感器网络中，某节点当前剩余能量为  $E_r$ ，节点的平均剩余能量为  $\bar{E}$ 。  $E_m$  为当前网络状态下节点剩余能量的最小值，该值可由 sink 节点周期性全网反馈获得，该节点的

相对剩余能量为  $\Delta E = (E_r - E_m) / (\bar{E} - E_m)$ 。

**定义3** 消息转发概率。冗余度为  $\zeta$  ( $\zeta > 1$ ) 的水下传感器网络中, 某节点进行一次数据转发,  $\zeta$  个节点中任意节点  $i$  成为该消息的转发节点的概率  $p_i = (\alpha \Delta d_i + \beta \Delta E) / \zeta$ 。其中,  $\alpha + \beta = 1$ 。

假设在冗余度  $\zeta$  的水下传感器网络中, 某深度为  $h$  的节点  $i$  对消息进行了一次消息转发, 在深度区域  $I(h)$  内的  $\zeta$  个邻居节点将接收该消息 (见 3.1 节)。假定  $\zeta$  个节点距离节点  $i$  的深度差分别为  $d_1, d_2, \dots, d_\zeta$ 。根据定义 1 可知,  $\zeta$  个节点中的第  $j$  个节点的相对深度距离为

$$\Delta d_j = \frac{d_j - h - \Psi(\Gamma(R, \beta))}{R - \Psi(\Gamma(R, \beta))} \quad (9)$$

根据定义 2 可知, 该节点为转发节点的概率为

$$P_j = \frac{1}{\zeta} \times \left( \alpha \frac{d_j - \Psi(\Gamma(R, \beta))}{R - \Psi(\Gamma(R, \beta))} + \beta \frac{E_{ir} - \bar{E}}{E_o - \bar{E}} \right) \quad (10)$$

节点随机分布在监控区域内, 并在一定范围内做 Random Waypoint 运动, 节点的分布特点近似随机分布, 因此某节点通信范围  $D_{ABCD}$  内存在  $k$  个节点的概率为

$$P_k = C_n^k \left( \frac{V_{ABCD}}{V_{\max}} \right)^k \left( 1 - \frac{V_{ABCD}}{V_{\max}} \right)^{n-k} \quad (11)$$

节点的移动性会造成一定概率的数据传输失败, 只有当某节点通信范围  $D_{ABCD}$  内所有的节点均未成为其转发节点时, 该节点的数据传输失败, 数据传输失败的概率为

$$P_{i\_f} = C_n^k \left( \frac{V_{ABCD}}{V_{\max}} \right)^k \left( 1 - \frac{V_{ABCD}}{V_{\max}} \right)^{n-k} \prod_{i=1}^k (1 - P_i) \quad (12)$$

为了防止出现数据传输中断的现象, 当数据传输失败时, 选择该节点通信范围  $D_{ABCD}$  内的邻居节点中具有最大转发概率的节点 ( $P_k$  值最大的节点) 作为消息的转发节点。

### 4.3 队列管理的实现

队列管理机制工作原理包括消息入列方法和消息出列方法。

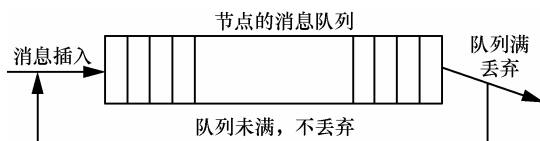


图5 队列中消息流

消息入列方法: 节点  $i$  收到来自其他节点的消息后, 从消息中获取转发节点的深度信息和剩余能量信息, 计算该节点转发消息的概率  $P_i$  (详见 4.2 节), 节点  $i$  以概率  $P_i$  将该消息插入消息队列, 以  $1 - P_i$  的概率丢弃该消息, 进入消息队列的消息按照  $P_i$  值由大到小的先后顺序发送; 节点自身采集的信息则立即发送。若某节点的邻居节点均被丢弃时, 选择  $P_i$  值最大的邻居节点进入队列, 防止消息传递过程中出现传递中断的情况。

消息出列方法: 某节点的消息队列中若存在多个数据分组, 根据数据分组中携带的  $P_i$  值大小, 节点优先发送  $P_i$  值大的数据分组, 消息发送后消息标记为已发送, 但不立刻丢弃; 只有当队列满时, 丢弃在队列中存在时间最久的已发送消息, 避免多次发送同一消息。

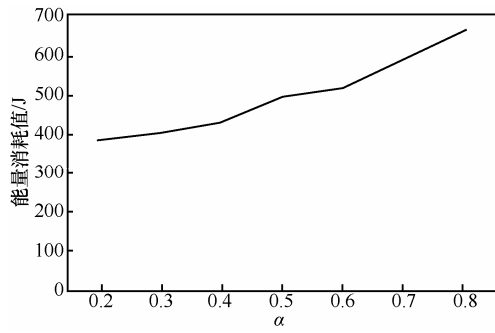
## 5 实验与仿真

本文仿真实现了 layered-DBR、DBR 和 Flooding 算法, 并从节点周期性采集次数和能量消耗做了性能比较。在仿真实验中, 本文定义 1 000 个节点随机分布在  $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m} \times 5\text{ L}00\text{ m}$  的三维区域。网络中设定 10 个 sink, 它们位于三维区域的上表面位置。其他网络参数以及相应的缺省值如表 1 所示。

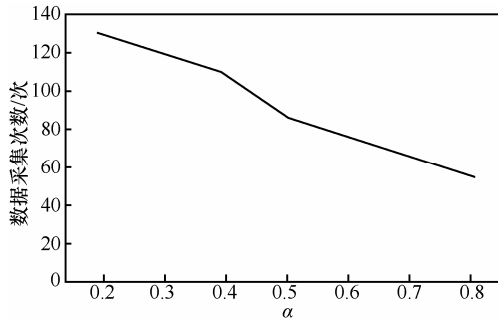
表1 仿真参数

参数	值
三维区域	1 000 m × 1 000 m × 500 m
节点数	1 000
通信半径/m	200~250
$V_{\min}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1
$V_{\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2
$T_{\max}/\text{s}$	0
$T_{\min}/\text{s}$	1
$P_o$	3
$K$	1.5

图 6 给出了在节点通信半径  $R=240\text{ m}$  的条件下,  $\alpha$  取值对网络周期性数据采集次数和网络能量消耗的影响。从图 6 可以看出, 当  $\alpha$  取值为 0.5 时, 综合网络能耗表现和消息转发次数, 网络有较好的性能表现, 因此在后续的仿真实验中默认  $\alpha=0.5$ 。



(a) 网络能量消耗

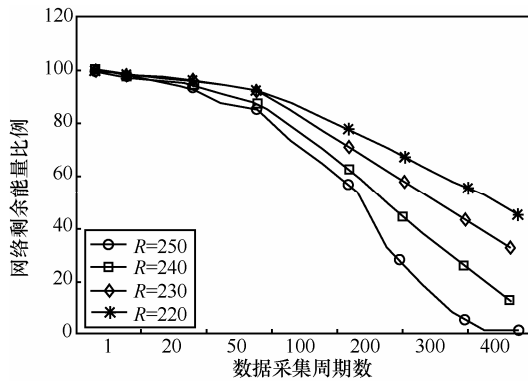


(b) 消息转发次数

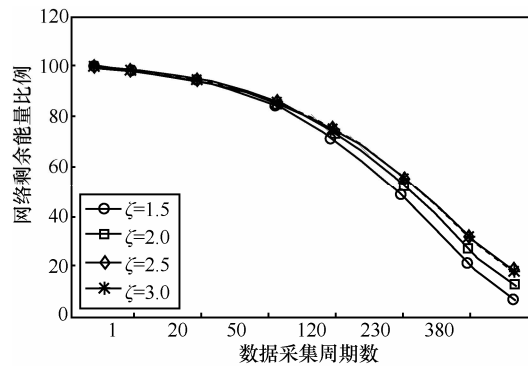
图 6 因子  $\alpha$  对网络的影响

图 7(a)给出了在网络冗余度  $\zeta=2$  时, 取不同的节点通信半径, 网络剩余能量随着网络周期性数据采集次数的增加所带来的变化情况。可以看出, 在一定范围内随着网络通信半径增加, 网络能量消耗逐渐增大。图 7(b)给出了在网络通信半径  $R=240\text{ m}$  时, 取不同的网络冗余度, 网络能量消耗随着网络周期性数据采集次数的增加所产生的变化。从图 7(b)中可以看出, 网络能耗并没有因为网络冗余度的改变而产生大幅度的变化, 这是由于 layered-DBR 算法采用了机会转发机制之后, 网络中消息副本在一定程度上得到了控制, 网络能耗一定程度上不再受网络冗余的影响。

图 8(a)给出了在网络通信半径为  $220\text{ m}$  的条件下, 完成多次周期性数据采集后, 网络的能量消耗的对比。图 8(b)中给出了在不同的网络通信半径下, 网络生命周期内的周期性数据采集总次数的对比。可以看出, 采用 layered-DBR 算法的网络性能要优于 DBR 算法和 Flooding 算法。

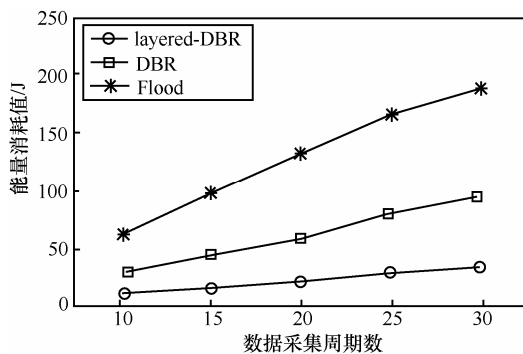


(a) 通信半径

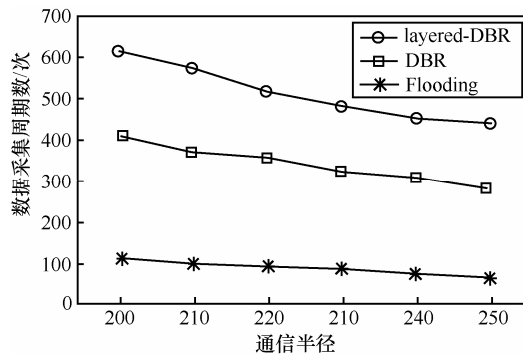


(b) 网络冗余度

图 7 节点通信半径和网络冗余度对 layered-DBR 影响



(a) 网络能量消耗



(b) 数据采样周期数

图 8 节点通信半径对网络的影响

## 6 结束语

针对水下传感器网络, 考虑水下网络复杂环境(节点无法感知全局位置信息, 节点的移动性等), 提出了一种网络分层机制, 该机制不仅能避免同层节点通信带来的巨大网络能量消耗, 而且简化了网络模型。进而, 本文提出了一种水下传感器网络的分层路由协议 **layered-DBR**。该策略基于网络冗余给出了适用于不同网络冗余环境下的接收节点的深度域, 并引入机会转发机制和消息队列管理, 在满足水下传感器网络复杂网络环境的同时, 有效地控制了网络消息副本的数量。仿真实验表明, **layered-DBR** 能够有效地控制网络冗余, 与 **DBR** 和 **Flooding** 算法相比, 该算法有效地减少网络的能耗, 延长了网络寿命。

### 参考文献:

- [1] 李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 1-15.  
LI J Z, GAO H. Survey on sensor network research[J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(1): 1-15.
- [2] 刘唐, 彭舰, 杨进. 异构延迟容忍移动传感器网络中基于转发概率的数据传输[J]. 软件学报, 2013, 24(2): 215-229.  
LIU T, PENG J, YANG J. Data delivery for heterogeneous delay tolerant mobile sensor networks based on forwarding probability[J]. Journal of Software, 2013, 24(2): 215-229.
- [3] 郭忠文, 罗汉江, 洪峰等. 水下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 Z W, LUO H J, HONG F, et al. Current progress and research issues in underwater sensor networks[J]. Journal of Computer of Computer Research and Development, 2010, 47(3): 377-389.
- [4] 洪峰, 张玉亮, 杨博真等. 水下传感器网络时间同步技术综述[J]. 电子学报, 2013, 41(5): 960-965.  
HONG F, ZHANG Y L, YANG B Z, et al. Review on time synchronization techniques in underwater acoustic sensor networks[J]. Acta Electronic Sinica, 2013, 41(5): 960-965.
- [5] 洪璐, 洪峰, 李正宝等. CT-TDMA: 水下传感器网络高效 TDMA 协议[J]. 通信学报, 2012, 33(2): 163-174.  
HONG L, HONG F, LI Z B, et al. CT-TDMA: efficient TDMA protocol for underwater sensor networks[J]. Journal on Communications, 2012, 33(2): 163-174.
- [6] 李正宝, 郭忠文, 曲海鹏等. E2DTS: 水下传感器网络能量高效的分布式时间同步算法[J]. 通信学报, 2010, 31(9A): 22-29.  
LI Z B, GUO Z W, QU H P, et al. E2DTS: an energy efficiency distributed time synchronization algorithm for underwater acoustic sensor network[J]. Journal on Communications, 2010, 31(9A): 22-29.
- [7] 金志刚, 苏毅珊, 刘自鑫等. 基于运动预测的水下传感器网络 M-AC 协议[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 728-734.  
JIN Z G, SU Y S, LIU Z X, et al. Motion prediction based MAC for underwater wireless sensor networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(3): 728-734.
- [8] BHUVANEWARI P T V S, KARTHIKEYAN B, JEEVA M, et al. An efficient mobility based localization in underwater sensor networks[A]. 2012 Fourth International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks[C]. 2012. 90-94.
- [9] HUANG C J, WANG Y W, LIAO H H, et al. A power-efficient routing protocol for underwater wireless sensor networks[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(2): 2348-2355.
- [10] XIE P, CUI J H, LAO L. VBF: vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks[A]. IEEE IFIP Networking[C]. 2006. 228-235.
- [11] XIE P, CUI J H, NICOLAOU N C, et al. Improving the robustness of location-based routing for underwater sensor networks[A]. IEEE OCEA- NS[C]. 2007. 1-6.
- [12] YAN H, CUI J H. DBR: depth-based routing for underwater sensor networks[A]. The 7th International IFIP-TC6 Networking Conference[C]. Singapore. 2008. 72-86.
- [13] LIU G Z, LI Z B. Depth-based multi-hop routing protocol for underwater sensor network[A]. 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation[C]. 2010. 268-270.
- [14] LEE U, WANG P, NOH Y. Pressure routing for underwater sensor networks[A]. IEEE INFOCOM[C]. 2010.
- [15] 卿利, 朱清新, 王明文. 异构传感器网络的分布式能量有效成簇算法[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 481-489.  
QING L, ZHU Q X, WANG M W. A distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2006, 17(3): 481-489.
- [16] SOZER E M, STOJANOVIC M, PROAKIS J G. Underwater acoustic networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72-83.
- [17] GUO Y, LIU Y T. Localization for anchor-free underwater sensor networks[J]. Computers and Electrical Engineering, 2013, 39(6): 1812-1821.
- [18] CAMP T, BOLENG J, DAVIES V. A survey of mobility models for ad hoc network research[J]. Wireless Communication & Mobile Computing, 2002, 2(5): 483-502.

### 作者简介:



**彭舰** (1970-), 男, 四川成都人, 博士, 四川大学教授, 主要研究方向为无线传感器网络、分布式计算、人类动力学。

**洪昌建** (1988-), 男, 湖北襄阳人, 四川大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络。

**刘唐** (1980-), 男, 四川乐山人, 四川大学博士生、副教授, 主要研究方向为无线传感器网络。

**张云勇** (1976-), 男, 江苏盐城人, 博士后, 中国联通研究院平台与云计算研究中心主任, 主要研究方向为下一代开放网络、固定移动融合核心网、移动互联网及业务、公共运算。