

UWSNs 中基于位置及能量信息的垂直分簇路由

李 龙^a, 刘建明^b, 古天龙^c

(桂林电子科技大学 a. 机电工程学院, b. 广西信息科学实验中心, c. 广西可信软件重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为降低组网成本并保证 UWSNs (underwater wireless sensor networks) 对监测区域的高覆盖率, 提出一种三维分层混合部署策略. 为实现自组网并完成信息的高效传递, 提出一种与部署策略相适配的垂直分簇路由算法. 该算法可利用节点位置、能量等信息, 周期性地将网络划分成多跳垂直簇, 并建立簇内节点间的路由路径, 借助反馈信息完成网络空洞的监测和处理. 仿真结果表明, 所提出的设计方法能够大幅降低组网成本, 而且能显著提升网络在数据包投递率、能量利用效率等方面的性能表现.

关键词: 水下无线传感器网络; 部署策略; 分簇算法; 路由路径; 组网成本

中图分类号: TP393

文献标志码: A

Position and energy based vertical clustering routing for UWSNs

LI Long^a, LIU Jian-ming^b, GU Tian-long^c

(a. School of Electromechanical Engineering, b. Guangxi Experiment Center of Information Science, c. Guangxi Key Laboratory of Trusted Software, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China. Correspondent: LI Long, E-mail: lilong@ncepu.edu.cn)

Abstract: To reduce networking costs and ensure UWSNs' (underwater wireless sensor networks) high coverage ratio of the monitoring area, a 3D layered hybrid deployment strategy is proposed. To accomplish automatic networking and transmit the messages collected effectively, a vertical clustering routing algorithm compatible with the above-mentioned deployment strategy is presented. The algorithm periodically divides the nodes into multi-hop vertical clusters and synchronously establishes the routing paths by using of information such as nodes' position and energy. Meanwhile, the network voids can be detected and treated by using of feedback information. Simulation results show that the joint design for UWSNs not only can reduce networking costs significantly, but also can improve network performance in many aspects, such as packet delivery ratio and energy efficiency.

Keywords: underwater wireless sensor networks; deployment strategy; clustering algorithms; routing path; networking costs

0 引言

将节点以一定的部署策略放置在被监测水域, 可以实现水文环境检测、水下目标探测和监视等应用, 进而能为保护领海、开发利用海洋资源提供强有力的技术支持和信息保障^[1-3]. 基于此类应用背景, 水下无线传感器网络 (UWSNs) 被提出, 并迅速成为无线网络领域的研究热点.

与陆基无线传感器网络相比, UWSNs 具有许多

不利于节点互联和降低节点间通信质量的特性, 如水声信道误码率高、声波传播速度低、信号衰减严重等, 这些特性大大降低了现有无线网络通信协议对于 UWSNs 的适用性^[3]. 因此, 借助合理的节点部署策略, 在保证网络对监测区域高覆盖率以及节点间较好连通性的同时, 还需要开发相应的路由协议, 以实现 UWSNs 的可靠组网与通信.

本文鉴于对以下几个方面的考虑, 提出了三维分

收稿日期: 2014-05-17; 修回日期: 2014-10-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61262074); 广西可信软件重点实验室开放课题项目(kx201101); 广西自然科学基金回国基金项目(2012GXNSFC053009); 广西信息科学实验中心重点课题项目; 桂林电子科技大学计算机软件创新团队项目.

作者简介: 李龙(1989—), 男, 博士, 从事通信网络组网工程的研究; 古天龙(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事符号计算与知识工程等研究.

层混合部署策略和与之相适配的PEBVCR (position and energy based vertical clustering routing) 协议:

1) 水下节点造价昂贵, 使用尽量少的节点完成对监测区域的覆盖是UWSNs领域的重要挑战性课题之一^[4]. 为解决这一问题, 本文设计了三维分层混合部署模型: 少量节点随机分布于水面, 负责数据信息的汇聚整理; 其他节点按照体心立方格结构部署于水下, 负责数据的采集、传递等工作.

2) 无线传感器节点依靠电池供电, 电量有限且通常不允许使用者对其进行充电等续航操作, 因此节点工作时应将能量、位置因素考虑在内, 以求使用尽量少的能量完成数据的可靠高效传输.

3) 在路由协议的研究方面, 只有VBF (vector-based forwarding)^[5]、DBR (depth-based routing)^[6]、RDBF (relative distance based forwarding)^[7]等少数协议是基于节点的三维部署开发的, 但均未包含分簇算法^[9], 且数据包的传输路径也不确定, 这会大幅降低网络在各方面的性能表现.

本文基于三维分层混合部署策略开发了PEBVCR协议, 通过利用节点的位置和能量信息, 建立数个垂直链状簇实现节点间的互联, 并同步建立簇内节点间的路由路径. 仿真结果表明, 所提出的设计方法能够大幅降低组网成本, 而且能显著提升网络在数据包投递率、能量利用效率等方面的性能表现.

1 相关工作

在现存水下网络路由协议中, VBF协议^[5]具有较强的代表性, 该协议规定每一数据包都包含源节点 S_1 、目标节点 S_0 、最新转发节点 F 的位置信息, 候选转发节点接收数据包后, 首先计算自身到向量 $\overrightarrow{S_1S_0}$ 的距离 d , 只有 d 小于阈值 R 时该节点才具有数据包转发资格, 从而将数据包的传输范围限定在半径为 R 的虚拟管道内, 实现数据包的高效传递.

DBR协议^[6]仅通过比较节点的深度信息便可完成数据包的转发. 水下节点接收到数据包后, 首先比较当前水深 d_2 与上一转发节点所处深度 d_1 之间的关系, 若满足 $d_1 - d_2 > d_{th}$ (d_{th} 为阈值), 则该节点具有数据包转发资格.

RDBF协议^[7]通过计算节点与Sink间的相对距离得出适合因子, 以筛选出少数最优节点进行数据包转发, 进而提高数据包转发效率, 节省网络能耗.

CRP协议^[8]使用邻居节点数作为节点连通性的衡量指标(CI), 并规定连通性越好的节点对数据包的转发优先级越高, 从而提高传输的可靠性.

上述协议只有应用于密集部署网络时, 才具有较为理想的性能表现.

2 三维分层混合部署

UWSNs部署策略分为随机部署和确定性部署^[10]. 当监测区域环境恶劣或特性未知时, 通常使用随机布撒的方式进行节点部署, 该方式所需节点多、覆盖成本高; 若监测区域环境比较友好, 则往往基于预定义的结构实现确定性覆盖, 该方式所需节点少、覆盖率高且网络连通性好, 因此对于节点造价昂贵的UWSNs而言, 宜采用确定性部署.

目前尚无法得出三维空间中球覆盖问题的最优解, 体心立方格结构(图1)被证明是较为理想的三维空间覆盖形式^[11]. 本文在设计UWSNs时, 将汇聚节点随机部署于水面, 将水下节点按照体心立方格结构进行确定性部署, 其中源节点位于最底层. 需要注意的是, 信息的传递应限定在相邻层之间, 即节点的通信距离 $Dist$ 应处于区间 $(\sqrt{3}R, 2R)$ 内.

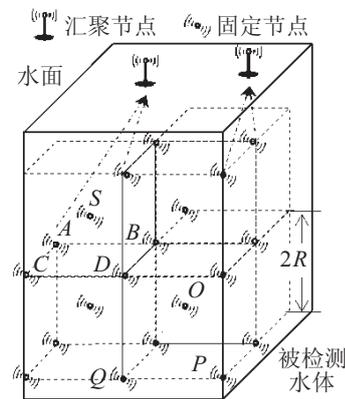


图1 分层混合部署

3 垂直分簇路由协议

UWSNs部署完成以后, 需要借助路由协议完成节点间的互联. 本文结合体心立方格的结构特性和水声信道的传输特性, 设计完成了PEBVCR协议. 该协议的核心思想是, 根据节点的位置和能量信息, 周期性地网络节点划分为多跳垂直簇, 并建立簇内节点间的路由路径, 同时监测网络空洞的出现, 最终实现节点间的可靠高效通信. 协议的每一周期都可细分为簇头选举、簇头信息广播(包类型为CLUSTER)、节点入簇、路由路径建立、监测数据包(包类型为DATA)传输.

3.1 簇头选举算法

簇头节点需要承担更艰巨的数据处理工作, 因此为了均衡节点能耗、延长网络寿命, 图1所示水面节点中包含了一定数量的冗余节点. 冗余节点的存在导致每一分簇周期都要簇头选举, 为加快分簇过程, 本文提出如下随机簇头选举算法: 在簇头选举阶段, 每个水面节点 n 都拥有阈值 $P(n)$ 和随机数 $R_n \in (0, 1)$, 若 $R_n < P(n)$, 则该节点当选簇头. 阈值 $P(n)$ 的计算

公式如下:

$$P(n) = \begin{cases} (r-1)C^2/(tA^2), & t=0; \\ C/A, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

其中: C 、 A 分别为期望簇头数、水面节点总数; r 为当前周期, t 为前 $(r-1)$ 个周期中节点 n 担任簇头的次数。

3.2 CLUSTER 包转发策略

由图 1 可见, 共有 8 个节点与节点 O 之间的距离相等, 若有多个节点同时发送消息, 则节点 O 必然发生冲突, 因此必须开发冲突消减机制以完成数据包的传递。本文基于节点的位置和能量信息开发了 CLUSTER 包转发策略, 该策略主要通过控制节点的转发概率、转发延迟来减少冲突, 其主要工作流程如下: 对于已转发过的数据包, 直接丢弃; 对于未转发过的数据包, 利用节点位置和能量信息计算转发概率 P_f 并生成随机数 R_f , 若 $P_f > R_f$, 则节点在时间 H_t 后转发该包, 其中 H_t 为节点对数据包的保持时间, 取值为 0 或 Δt (取值为 Δt 的概率为 P_k)。

3.2.1 转发概率 P_f

在分层混合部署中, 可以设定节点的转发概率为固定值 P_{fixed} , P_{fixed} 取值不同则网络性能不同。为了获得最佳网络性能, 本文提出 CLUSTER 包的转发概率动态求取算法, 有

$$P_f = \alpha_1 P_d + \beta_1 P_e + \gamma_1. \quad (2)$$

其中: P_d 、 P_e 分别为基于节点位置、能量信息计算出的转发概率增减因子; α_1 、 β_1 为权重因子, γ_1 为确保网络能够正常运行而设定的常量。参数具体取值随网络状况和具体应用而定。

1) P_d 的计算。节点间通信距离越长, 需要的转发跳数越多, 网络的能耗越高^[9]。基于这一考虑, 在 CLUSTER 包转发过程中, 候选转发节点通过比较周围节点与目的节点间的通信距离得出 P_d 。如图 1 所示, 节点 S 发出的数据包会同时到达 A 、 B 、 C 、 D 四个对等节点, 因此仅以节点 A 为例说明 P_d 的求取算法。

假设转发节点 S 、目标节点 T 的位置分别为 (x_s, y_s, z_s) 、 (x_t, y_t, z_t) , 点 H 是矩形 $ABCD$ 的几何中心, 其位置为 $(x_s, y_s, z_s - R)$ 。可以推导出点 A 、 B 、 C 、 D 的位置并求得它们与点 T 之间的距离分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 。通过比较得出 4 个距离中的最大值、最小值、平均值分别为 d_{max} 、 d_{min} 、 d_{average} , 则节点 A 根据位置信息生成的转发概率为

$$P_d = \begin{cases} 0, & d_{\text{max}} = d_{\text{min}}; \\ \frac{d_1 - d_{\text{average}}}{d_{\text{max}} - d_{\text{min}}}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

即距离目的节点越近的节点对数据包的转发概率越大, 且 $P_d \in (-1, 1)$ 。

2) P_e 的计算。为降低网络能耗并均衡节点间的能耗, PEBVCR 协议将节点的能量信息作为数据包转发的决定因素之一。为减少控制信息所占的比重, CLUSTER 包中并不存储沿途所有节点的能量信息, 而是携带 3 个统计变量 E_{max} 、 E_{min} 、 E_{average} , 分别存储沿途节点剩余能量的最大值、最小值、平均值。假设当前节点的剩余能量为 E_{current} , 则基于能量信息计算得到

$$P_e = \begin{cases} 0, & E_{\text{max}} = E_{\text{min}}; \\ \frac{E_{\text{current}} - E_{\text{average}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

即节点剩余能量越多, 转发概率越大。但若当前节点剩余能量极大或极小, 则 P_e 取相应极值, 从而导致网络可靠性下降。本文令 $P_e \in [-1, 1]$ 。

3.2.2 转发延迟 Δt

通过控制节点的转发概率并不能够完全避免冲突的发生, 为进一步提升网络性能, PEBVCR 协议中还包含随机节点延迟发送策略。如图 2 所示, 节点覆盖半径均为 D , $|\overrightarrow{F_1 T}| = |\overrightarrow{F_2 T}|$, 假设节点 F_1 、 F_2 分别在 t 、 $(t + \Delta t)$ 时刻发出数据包, 只要 Δt 取值合理, 节点 T 处便不会发生冲突, 数据包 P_1 、 P_2 均能被正确接收, 这便是随机节点延迟发送策略的基本思想, 即以概率 P_h 随机选择某些节点进行数据包的延迟转发, 且延迟时间为 Δt 。该策略主要用于减轻节点位置对称带来的数据包冲突问题, 与网络能耗关系不大, 因此, P_h 的取值无需参考网络能量信息, 定为常量; Δt 应根据网络结构进行合理取值, 避免因取值过小造成数据包冲突, 同时避免因取值过大增加传输时延。

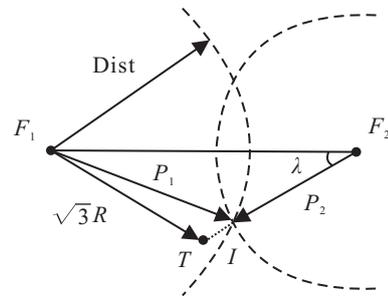


图 2 转发延迟

本文假设节点 F_1 首先发出 P_1 包, 则 P_1 从出发到被节点 T 接收所需时间为

$$t_1 = t_{\text{trans}} + t_{\text{recv}} = \frac{|\overrightarrow{F_1 T}|}{v} + p_l \times 8 \times \frac{e_e}{b_r}. \quad (5)$$

其中: t_{trans} 为数据包的在信道中的传输时间, t_{recv} 为节点接收数据包所花费的时间, v 、 p_l 、 e_e 、 b_r 分别为声波传播速度、数据包大小、编码效率、比特率。为了确

保 P_2 包也能被 T 成功接收, 本文从以下两个方面进行分析:

1) P_2 不被 P_1 所干扰. 由图2可知, 只要 P_2 晚于 P_1 到达点 I , P_2 便不会被 P_1 所干扰, 由此求得 Δt 的最小取值为

$$\Delta t_{\min} = \frac{D - |\overrightarrow{F_2 I}|}{v}. \quad (6)$$

图2中, 根据余弦定理并综合 $|\overrightarrow{F_1 F_2}|$ 的两种取值 $2R$ 、 $2\sqrt{2}R$, 可以得出

$$\Delta t_{\min 1} = \frac{D - \frac{2R}{\sqrt{3}} + \sqrt{D^2 - \frac{8R^2}{3}}}{v},$$

$$\Delta t_{\min 2} = \frac{D - \frac{4R}{\sqrt{3}} + \sqrt{D^2 - \frac{8R^2}{3}}}{v}. \quad (7)$$

2) P_2 能被 T 成功接收. 只有 T 处于空闲状态才能接收 P_2 , 即 P_1 的接收工作已于 P_2 到达之前完成, 因此还需对 Δt_{\min} 和 t_{recv} 的取值进行比较: 若

$$t_{\text{recv}} \leq \Delta t_{\min} + \frac{D - |\overrightarrow{F_2 I}|}{v},$$

则表明 P_2 到达时, T 处于空闲状态; 否则 T 正在接收 P_1 . 可见, 为避免冲突, Δt 取值应为

$$\Delta t' = \Delta t_{\min} + \left(t_{\text{recv}} - \Delta t_{\min} - \frac{D - |\overrightarrow{F_2 I}|}{v} \right) = p_l \times 8 \times \frac{e_e}{b_r} - \frac{D - \sqrt{3}R}{v}. \quad (8)$$

综合式(7)和(8)可得出 Δt 的最终表达式为

$$\Delta t = \max \left(\frac{D - \frac{2R}{\sqrt{3}} + \sqrt{D^2 - \frac{8R^2}{3}}}{v}, p_l \times 8 \times \frac{e_e}{b_r} - \frac{D - \sqrt{3}R}{v} \right). \quad (9)$$

3.3 路由路径逐跳建立算法

分簇的目的之一是建立簇头与源节点之间的多跳路径, 以服务于 DATA 包的传输. 本文使用路径因子 PC 衡量路径的优劣, 有

$$PC = \sum_{i=1}^j H_i. \quad (10)$$

其中: j 为路径上节点总数; H_i 为第 i 个转发节点与其上层节点间的单跳路径因子, 有

$$H_i = \alpha_2 \frac{E_{\text{sink}}}{E_{\text{initial}}} + \beta_2 \frac{E_{\text{average}}}{E_{\text{initial}}} + \gamma_2 \left(1 - \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{initial}}} \right). \quad (11)$$

这里: E_{initial} 为节点的初始能量; E_{sink} 为簇头节点的剩余能量; E_{average} 、 E_{max} 、 E_{min} 分别为所有转发节点剩余能量的平均值、最大值、最小值; α_2 、 β_2 、 γ_2 为权重因子, 且 $\alpha_2 + \beta_2 + \gamma_2 = 1$. 式(11)表明, H_i 越大, 传

输路径剩余能量越多, 可靠性越高.

由图1可知, 簇头发出的数据包沿任意路径到达底层源节点所经跳数(即 j)相等, 因此, 在 CLUSTER 包的逐跳转发过程中, 只要建立节点间的最优单跳路径, 通过累加便可得到簇头与源节点间的最优多跳路径. 此处仅介绍最优单跳路径的建立过程: 在分簇过程中, 节点 n_c 接收到其他节点发来的 CLUSTER 包 C_i , 若 C_i 来自下层节点, 则直接丢弃; 否则, 从 C_i 中读取当前的周期 P_{current} , 并与节点中保存的周期 P_{saved} 作比较; 若 $P_{\text{current}} < P_{\text{saved}}$, 则表明 C_i 过于陈旧, 直接丢弃; 若 $P_{\text{current}} > P_{\text{saved}}$, 则表明 C_i 为新周期中的簇头广播包, 建立 n_c 与 n_i 间的单跳路径(即指定节点 n_i 负责转发 n_c 发出的 DATA 包), 同时根据 C_i 中的信息求取 H_i , 并存储到 n_c 中的 H_{saved} 变量中; 若 $P_{\text{current}} = P_{\text{saved}}$, 则表明此前已接收过同一周期中的 CLUSTER 包, 但是仍要计算 H_i , 并与 H_{saved} 相比较; 若 $H_i > H_{\text{saved}}$, 则表明当前路径更优, 建立 n_c 与 n_i 间的单跳路径.

3.4 DATA 包转发策略

借助于 CLUSTER 包转发算法和路径建立算法, 源节点接收到 CLUSTER 包的同时, 垂直分簇完成且路由路径建立. 但在某些情况下, 源节点与簇头节点间并不存在可用路径, 如 CLUSTER 包传输失败、节点中所存路径过于陈旧等, 为了应对此类情况以提高 DATA 包的投递率, 本文在 PEBVCR 协议中添加了 DATA 包转发策略, 其工作流程如下: 节点 n 接收到来自下层节点 n_l 的 DATA 包 D_i , 若 n 已转发过 D_i , 则直接丢弃; 否则, 根据 D_i 中是否携带路径信息(即 n_l 的上跳节点)分为如下两种情况:

1) 当 D_i 中携带路径信息时, 若 n 是 n_l 的上跳节点则转发 D_i ;

2) 当 D_i 中不携带路径信息时, 节点 n 以某一转发概率和延迟(同 CLUSTER 包转发策略)转发 D_i .

节点 n 在转发 D_i 前必须对其路径信息进行更新, 以便为其他节点提供数据包处理根据.

3.5 基于反馈信息的空洞检测与处理机制

确定性稀疏部署网络易因节点失效而产生网络空洞, 因此 PEBVCR 协议中包含空洞检测和处理机制. 为实现该机制, 需要设置3个初始值均为0的变量: FT、VAMN 均位于节点中, 分别用于统计本节点连续转发数据包失败的次数、标记本节点是否处于空洞中; VAMP 位于数据包中, 用于表明该包的上一转发节点是否处于空洞中.

3.5.1 空洞检测

为了监测自身发出的数据包是否被其他节点

转发, 节点 s 完成数据包发送后继续监听信道, 若在规定时间内接收到后续转发节点以正常功率发出的数据包, 则表明 s 能够与后续节点正常通信, 将 FT、VAMN 清零, 否则将 FT 加 1. 当 FT 大于常数 T_c 时, 将 VAMN 置为 1, 认为 s 处于空洞中.

3.5.2 控制功率以穿越空洞

此处采用跨层设计的思想完成空洞的处理: 若网络层判定节点处于空洞中, 则告知物理层加大发送功率, 从而增大通信距离以穿越空洞. 此外, 节点在发送数据包前, 需要将 VAMN 的值赋给 VAMP, 当后续节点 n 接收到 VAMP 为 1 的数据包时, 若 n 离目标节点的垂直距离更短, 则转发数据包, 否则丢弃该包.

4 仿真分析

为评估本文提出的三维分层混合部署策略以及 PEBVCR 协议的合理性和有效性, 以 Aqua-Sim^[12] 为仿真平台, 分别对 PEBVCR、VBF 等协议进行多次仿真, 并对仿真结果进行分析.

4.1 场景设置与评价指标

4.1.1 参数设置

仿真过程中, 所使用的网络参数如下: 图 1 中立方格边长 ($2R$) 为 200 m; 节点通信参数参考水下节点 LinkQuest UWM 1000; 数据包大小为 50 B; 节点初始能量为 100 J; 节点发送、接收数据包和闲置状态的功率分别为 2 W、0.1 W、10 mW; 由于 MAC 协议对网络性能影响较大, 为了完成 PEBVCR 协议与 VBF 协议的对比, 所有仿真均使用文献 [5,12] 提出的 MAC 协议, 比特率为 10 kbps.

4.1.2 评价指标

使用如下指标评定协议性能: 源节点入簇率, 每一个分簇周期中, 源节点接收到 CLUSTER 包的概率; DATA 包成功投递率, 簇头节点接收到的 DATA 包总量与源节点发送总量之比; 单包能量消耗, 网络总能耗与目标节点接收到的有效数据包总量的比值, 单位为 J/Package.

4.2 路由协议的有效性

首先对 PEBVCR 协议的合理性和有效性进行验证, 尤其是 CLUSTER 包转发策略. CLUSTER 包的转发主要是指通过控制节点的转发概率和随机节点延迟转发完成对数据包的处理, 因此, 首先针对这两个因素进行多次仿真以分别验证其有效性. 此处所使用的网络结构含 139 个水下节点, 分为 9 层, 首层为 4 个随机分布于水面的簇头节点, 其他 8 层节点按照体心立方格进行部署. 随后改变网络规模, 验证协议的普适性.

1) 转发概率对协议性能的影响.

图 3 中, 横坐标为节点对 CLUSTER 包的转发概率, 其中前 8 个数值表示此概率为固定值, 最后 1 个数值 P_f 表示此概率由式 (2) 求出 (α_1 、 β_1 、 γ_1 的取值分别为 0.25、0.2、0.55, 后文将说明赋值依据). 由图 3 可见, 相比于取固定值, 当节点对 CLUSTER 包的转发概率为 P_f 时, 源节点入簇率、能量利用效率均有大幅改善, 表明该策略能对 CLUSTER 包进行高效转发.

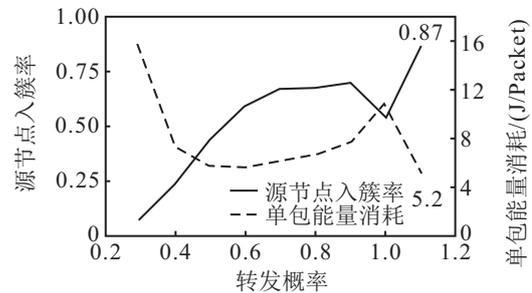


图3 转发概率对协议性能的影响

2) γ_1 取值对协议性能的影响.

γ_1 限定了转发概率 P_f 的基准值, 其取值大小会给协议性能带来较大影响, 因此, 本文针对 γ_1 的不同取值进行多次仿真, 仿真结果如图 4 所示. 由图 4 可见, 随着 γ_1 取值的增大, 源节点入簇率相应提高, 但是单包能量消耗也显著增加. 只有当 γ_1 取值为 0.55 时, 源节点入簇率、单包能量消耗均较理想, 这正是上文中将 γ_1 赋值为 0.55 并将其作为典型数据进行分析的原因.

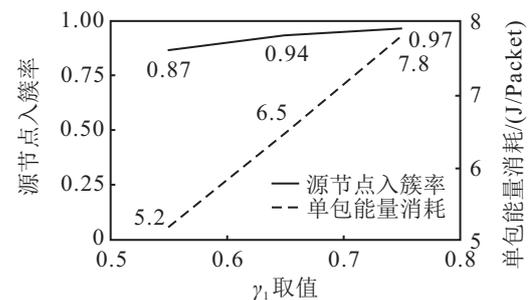


图4 γ_1 取值对协议性能的影响

3) 延迟转发对协议性能的影响.

为进一步提升协议性能, PEBVCR 中还包含随机节点延迟发送策略. 本节对这一策略的有效性进行验证, 仿真结果如图 5 所示. 图 5 表明, 当 P_h 取

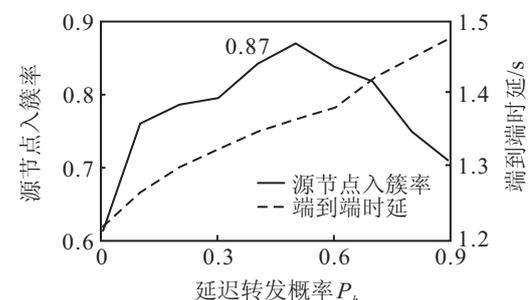


图5 延迟转发对协议性能的影响

值为0.5时,源节点入簇率最高且端到端时延尚可接受,此时网络性能较理想.

4) 网络规模不同时协议的性能表现.

为验证部署策略和路由协议的普适性,本文设计了3种不同规模的网络(节点数量分别为59、139、461)进行仿真对比,结果如图6所示.由图6可见,随着网络规模的加大,数据包的传播跳数和传输距离增加,导致源节点入簇率下降、单包能量消耗增加,但网络性能表现依然较为理想.

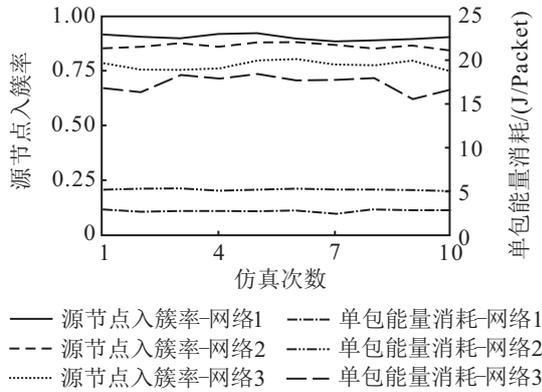


图6 网络规模不同时协议的性能表现

4.3 空洞检测与处理机制的有效性

本文使用链形网络来验证空洞检测与处理机制的有效性,初始结构见图7(a),节点间距为150m,预设通信距离为180m.节点4为源节点,从1s开始发送数据包,发包间隔为2s;节点0为汇聚节点,负责接收数据包;其他节点均为普通节点,负责数据包的转发,转发概率为1.空洞检测计数阈值 T_{cons} 设为3,若出现空洞,则通过功率控制加大节点通信距离至220m;设置网络结构分别在20s、40s时变更为图7(b)和图7(c).

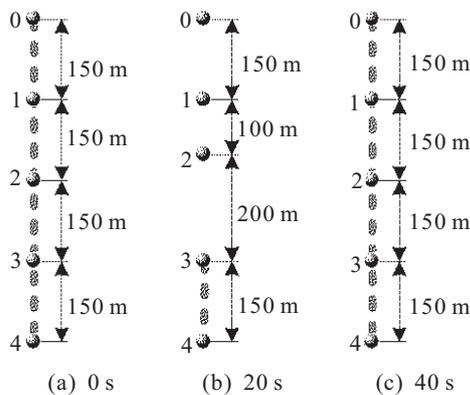


图7 链形网络结构变化

图8为节点3的通信距离变化情况,图9为数据包接收情况.由图8和图9可见,节点2的位置在20s时发生变化,导致节点3无法与之通信,此时空洞检测与处理机制发生作用;节点3于27s时加大自身通

信距离至220m,得以与节点2建立连接,并始终保持此通信距离不变,数据包不再丢失;节点2的位置在40s时再次发生改变,节点3通过检测节点2在转发数据包时产生的反馈信息,得知通信恢复正常并立即(43s时)减小其发送功率以降低能耗,通信距离恢复为180m.仿真结果表明该机制是有效的.

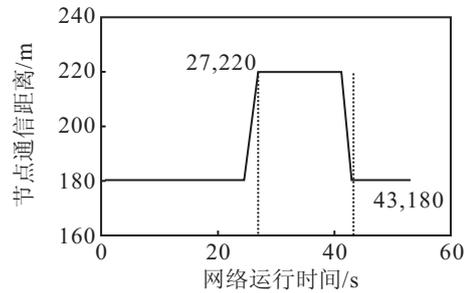


图8 节点3的通信距离变化情况

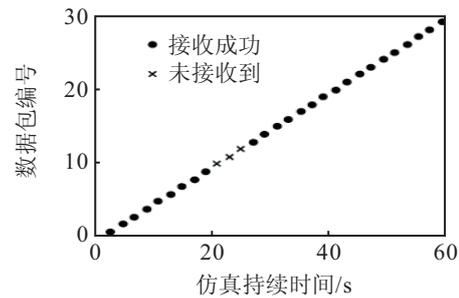


图9 数据包接收情况

4.4 与其他典型协议相对比

为验证PEBCR协议的有效性,选择较有代表性的VBF协议、RDBF协议作为对比对象进行性能对比.由于VBF协议、RDBF协议均假定节点随机分布,若采用图1部署,则由体心立方格结构特性和协议工作流程可知,数据包冲突严重将导致此两协议的性能表现极差.为了获取其最佳性能,本文并不改变其各自部署方式,而是通过改变节点数量来测试其性能表现.

图10为与VBF协议的性能对比图,图11为与RDBF协议的性能对比图.图中:横坐标中最后1个数值表示PEBVCR协议中的节点数量,其他数值分别为VBF协议、RDBF协议中的节点数量;线状图为数据包投递率,点状图为单包能量消耗.

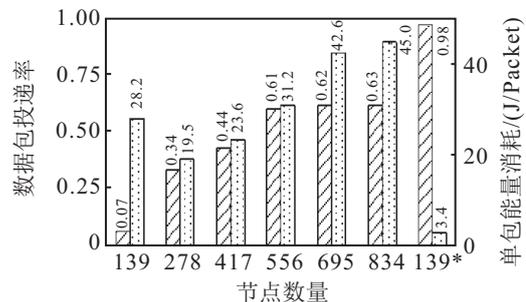


图10 与VBF协议进行性能对比

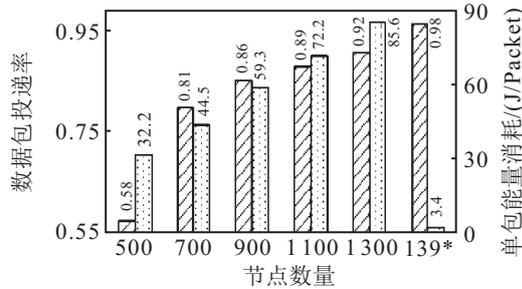


图 11 与 RDBF 协议进行性能对比

仿真结果表明,在数据包投递率方面,由于 PEVCR 协议完成了节点分簇,并为 DATA 包建立了路由路径,即使使用少量节点也可以得到高达 98% 的数据包投递率,远高于其他协议;在能量利用效率方面,PEVCR 协议的单包能量消耗仅为 3.4 J/Package,远低于 VBF 协议、RDBF 协议。可见,采用分层混合部署和 PEVCR 协议,不仅可以通过大幅减少节点使用量来降低网络搭建和运营维护成本,还能大幅提升网络性能。

5 结 论

为了保证对监测水域的可靠覆盖,并提高网络性能,本文提出了分层混合部署策略以及与之适配的 PEVCR 协议。仿真表明,所设计的方案在降低组网成本、降低网络能耗、提高网络可靠性、提高数据包成功投递率等方面都有较好的性能表现。

参考文献(References)

- [1] Zhao Ruiqin, Hu Yufei, Shen Xiaohong, et al. Research on underwater acoustic networks routing using simulations[C]. IEEE Int Conf on Signal Processing, Communication and Computing. HongKong: IEEE, 2012: 384-387.
- [2] Stefanov A, Stojanovic M. Design and performance analysis of underwater acoustic networks[J]. IEEE J of Sel Areas, 2011, 29(10): 2012-2021.
- [3] 徐明,刘广钟. 三维水声传感器网络中高效路由协议的研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(10): 90-93.

- (Xu M, Liu G Z. Research on efficient routing in three-dimension underwater acoustic sensor networks[J]. Computer Science, 2012, 39(10): 90-93.)
- [4] Partan J, Kurose J, Levine B N. A survey of practical issues in underwater networks[J]. ACM Sigmobile Mobile Computing and Communications Review, 2007, 11(4): 23-33.
- [5] Xie P, Cui J H, Hao L. VBF: Vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks[M]. Networking Technologies, Services and Protocols. Berlin: Springer-Heidelberg, 2006: 1216-1221.
- [6] Hai Yan, Zhijie Jerry Shi, Cui Junhong. Depth-based routing for underwater sensor networks[C]. The 7th Int IFIP-TC6 Networking Conf. Singapore, 2008: 72-86.
- [7] Li Z L, Yao N M, Gao Q. Relative distance based forwarding protocol for underwater wireless networks[J]. Int J of Distributed Sensor Networks, 2014(2014): 1-11.
- [8] Wahid A, Kim D. Connectivity-based routing protocol for underwater wireless sensor networks[C]. Int Conf on Convergence. IEEE, 2012: 589-590.
- [9] Liu X. A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks[J]. Sensors, 2012(12): 11113-11153.
- [10] Wahid A, Kim D. Connectivity-based routing protocol for underwater wireless sensor networks[C]. Int Conf on Convergence. Jeju Island: IEEE, 2012: 589-590.
- [11] 刘志坤,夏清涛,罗浩,等. 无线传感器网络三维覆盖策略研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 37(3): 581-584. (Liu Z K, Xia Q T, Luo H, et al. Research on three-dimensional strategy for wireless sensor networks[J]. J of Wuhan University of Technology, 2013, 37(3): 581-584.)
- [12] Xie P, Zhou Z, Peng Z, et al. Aqua-Sim: An NS-2 based simulator for underwater sensor networks[C]. MTS/IEEE Biloxi-Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges. Bremen, 2009: 1-7.

(责任编辑: 郑晓蕾)