

基于定向收发的水声通信网络邻节点发现机制

杨健敏 乔钢 聂东虎* 马璐

^①(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室 哈尔滨 150001)

^②(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

^③(哈尔滨工程大学海洋信息获取与安全工信部重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要: 针对水声通信网络邻节点发现困难的问题, 该文提出一种基于定向收发的邻节点发现机制。该机制中节点只采用定向方式发送和接收信号, 能够避免增益不对称引起的隐藏终端问题, 增加网络覆盖范围; 时间被划分为邻节点发现时隙和侦听回复时隙, 发现时隙中节点发送HELLO信号, 然后接收邻节点回复的REPLY信号, 侦听回复时隙中节点侦听源节点发送的HELLO信号, 然后回复REPLY信号, 节点通过基于竞争的HELLO/REPLY两路握手以直接发现和间接发现两种方式完成邻节点发现, 能够克服“聋”节点问题, 提升邻节点发现效率。仿真结果表明, 在不同的网络节点密度与发射天线波束扇区数目条件下, 该邻节点发现机制相比随机两路邻节点发现机制, 邻节点平均发现时延更短, 邻节点发现率更高。

关键词: 水声通信网络; 邻节点发现; 定向天线

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)11-2765-07

DOI: [10.11999/JEIT180108](https://doi.org/10.11999/JEIT180108)

Neighbor Discovery Mechanism for Underwater Acoustic Communication Networks Based on Directional Transmission and Reception

YANG Jianmin QIAO Gang NIE Donghu MA Lu

^①(*Department Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

^②(*College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

^③(*Ministry of Industry and Information Technology Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

Abstract: Considering the difficulty of neighbor discovery in underwater acoustic communication networks, a neighbor discovery mechanism is presented based on directional transmission and reception. In this mechanism, the nodes only send and receive signals directionally, which can avoid the hidden terminal problem caused by asymmetric gain and increase the network coverage. Time is divided into neighbor discovery time slot and listening & reply time slot. In neighbor discovery time slot, the node sends the HELLO signal, and then waits to receive the REPLY signal sent by its neighbor node. In listening & reply time slot, the node listens the channel for the HELLO signal sent by the source node, then replies REPLY signal to the source node. The node can discover its neighbor through HELLO/REPLY two-way handshake based on competition and direct & indirect discovery, which can overcome the “deaf” nodes problem and improve the efficiency of neighbor discovery. Compared with the randomized two-way neighbor discovery mechanism, simulation tests show that the proposed mechanism has the shorter average discovery latency and the higher average discovery ratio in various network density and number of antenna sectors.

Key words: Underwater acoustic communication networks; Neighbor discovery; Directional antenna

收稿日期: 2018-01-25; 改回日期: 2018-06-12; 网络出版: 2018-06-30

*通信作者: 聂东虎 niedonghu@hrbeu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61431004, 61601136, 11774074)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61431004, 61601136, 11774074)

1 引言

近年来,水声通信网络引起了广泛的关注,在商业领域、军事领域、环境监测等多个领域得到了前所未有的重视与应用^[1-4],尤其在军事领域,现代战争水下战场已逐步演化为以网络为中心,水下潜标、水下机器人、潜艇等作战单位编队组网,协同作战,需要进行频繁的信息交互,高效、可靠的网络通信对于海军作战来说至关重要。因此提高水声通信网络的覆盖范围,提升网络节点通信距离,增强网络通信效率与可靠性,实现隐蔽通信能够极大提高海军作战能力。大量相关学者对水声通信网络进行了研究^[5-10]。文献[5]提出了一种适用于六角格型水声通信网络的MAC层协议,该协议通过时隙的空间复用提高信道利用率,通过加入保护间隔避免数据冲突。仿真结果表明该协议可提升网络吞吐量,降低网络能量消耗。文献[6]针对水声通信网络中目标定位难的问题,提出了一种基于Parzen窗的定位方法。该定位方法通过Parzen窗对水声通信网络中目标出现位置的概率进行估计,随后采用粒子群算法对目标位置求解。仿真实验表明该方法可以获得较好的定位精度。文献[7]针对水声通信网络能耗大的问题,提出了一种基于空间唤醒的节能路由协议。该协议通过深度信息将网络分层,网络节点根据自身所处的网络分层,动态决定自身在网络中的工作状态。仿真结果表明,该协议可以减少网络能量消耗,并缩短网络延迟。文献[8]针对水声通信网络端到端时延的问题,提出了一种基于正交频分复用的频谱感知路由协议。该协议中,网络节点通过计算传输延迟来选择中继节点,所选择的中继节点是当前节点邻节点集中传输延迟最低的。仿真结果表明,该路由协议可明显缩短网络端到端时延。文献[9]提出了一种延迟容忍型水声通信网络MAC层协议。该文献中提出一种名为“优惠券收集”的分布式算法,在建立网络吞吐量模型后,通过寻求最佳的数据包重传次数与数据包传输概率的组合实现网络吞吐量性能最优化。仿真结果表明,在大多数水下应用场景中该协议的吞吐量远大于基于RTS/CTS机制的水声通信网络MAC层协议。文献[10]提出了一种适用于水声通信网络的MAC层协议,该协议在Slotted-FAMA协议基础上,一次握手形成一个多对节点配对传输的数据包序列,克服了Slotted-FAMA协议在网络负载高时延迟大的问题,提高了信道利用率。仿真结果表明,所提协议可明显提高网络有效吞吐量。

现存针对水声通信网络开展的研究中节点大多

采用全向数据传输模式。全向水声通信网络中,网络节点在发送信号时向周围所有方向用相同的功率同时发送声信号,声信号的能量分布在很大的空间区域,其中只有很小一部分被目标节点接收,造成了极大的能量浪费,严重限制了网络的覆盖范围和网络效率,并且通信隐蔽性极差,无法满足应用场景对水声通信网络的性能需求。相较于使用全向天线的全向水声通信网络,基于定向收发的水声通信网络中,节点可以将功率集中在一个有限的波束内进行信号的发送和接收,能够带来扩大网络覆盖范围、增加空间复用、提高系统容量、提高通信隐蔽性等优点^[11-13]。由于基于定向收发的水声通信网络与全向水声通信网络存在着诸多不同,对基于定向收发的水声通信网络的设计面临着很多全新的挑战。邻节点发现是其中最为关键的环节之一,该环节所获取的邻节点信息是MAC层协议和路由协议工作的基础,在网络中扮演着十分重要的角色。邻节点发现机制性能好坏很大程度上影响着整个网络性能。

针对上述问题,为了满足军民两方面对高性能水声通信网络的迫切需求,本文提出了一种基于定向收发的水声通信网络邻节点发现机制,其特点是:(1)网络中所有节点只采用定向模式通信能够避免增益不对称引起的隐藏终端问题,增加网络空间覆盖范围,降低网络开销;(2)邻节点发现有直接发现与间接发现两种方式,能够有效解决“聋”节点问题,发现更多邻节点;(3)时间被分为邻节点发现时隙与侦听接收时隙,通过基于竞争的轮询机制发现邻节点,能够避免信号的碰撞。

2 定向天线及网络模型

网络中所有节点均配备定向天线,节点只以定向模式发送或接收数据,不需要额外的全向天线作为辅助。这样做能够带来以下3方面好处^[14]。首先,由于全向天线和定向天线传输范围不一致,网络中只采用定向天线可以避免由传输增益不对称导致的隐藏终端问题;其次,全向天线的引入会极大限制网络的覆盖范围,降低定向天线带来的空间复用的提升;最后,只采用全向天线还可以降低系统设计的复杂度与成本。与全向网络中节点发送和接收数据时在所有方向等增益不同的是,定向网络中每个节点同时只能激活一个发射波束扇区进行数据发送或接收^[15]。节点所采用的定向天线模型如图1所示。定向天线由 M 个等大的发射波束扇区组成,所有发射波束扇区的传输范围互不覆盖。该天线可以集中发射功率通过 M 个发射波束扇区的任意一个

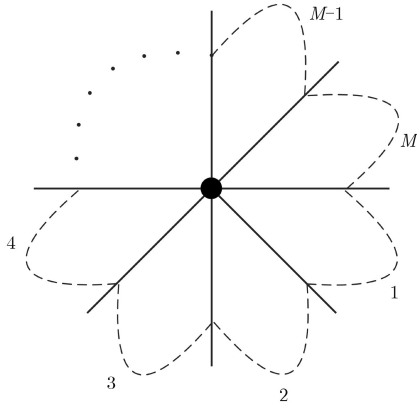


图 1 定向天线

发送信号，从而增加某一特定方向的信号传输范围。在水声通信网络中，定向天线切换发射波束扇区的延迟比节点间声信号的传输时延低几个数量级，对网络性能的影响可以忽略不计，所以在本文中假设定向天线发射波束扇区间切换时延为0。

假设定向水声通信网络中有 N 个网络节点，随机均匀分布在面积为 S 的区域内，所以网络部署区域内节点密度 ρ 可表示为

$$\rho = N/S \tag{1}$$

所提邻节点发现机制不需要网络各节点时间同步，所有节点都工作在半双工模式，且具有唯一的节点编号，每个节点传输范围相同，传输半径为 r ，每个节点都具有自身位置坐标 (x, y) 。当一个节点同时收到两个或者多个来自邻节点的信号时信号碰撞发生，发生碰撞的信号不可再恢复。网络中时间被分为连续的时隙，节点将工作时间时隙化，时隙分为邻居节点发现时隙和侦听回复时隙两种，每个时隙由多个子时隙组成。所提邻节点发现机制采用HELLO信号与REPLY信号两路握手的方式实现邻节点发现。

3 邻节点发现机制

本节我们将详细介绍所提出的基于定向收发的水声通信网络邻节点发现机制。该邻节点发现机制中，网络节点在每个波束扇区中停留一段时间，通过基于竞争的轮询机制结合直接与间接的发现策略实现邻节点发现。网络中节点可根据当前已发现节点数目动态调整在各波束扇区中的停留时间，以缩短整个邻节点发现过程用时，提升邻节点发现效率。

3.1 网络初始化

网络部署完毕后，网络中的每一个节点首先计算自身通信半径 r 内的邻节点预期数目。由于节点在网络中均匀随机分布，所以每个节点的邻节点预期数目可表示为

$$N_E = \rho\pi r^2 \tag{2}$$

其中， r 为节点通信半径， ρ 为网络内节点密度。那么节点在每个发射波束扇区 $m \in M$ 内的邻节点预期可以表示为

$$N_{Em} = N_E/M \tag{3}$$

网络中每个节点都维护自身邻节点列表 T_N 用以记录已经发现的邻节点信息，邻节点列表包含已发现邻节点的节点编号、节点位置坐标、邻节点发现波束扇区编号、邻节点发现模式标志位，其表示为 $\{ID, \text{cood}(x, y), m, F\}$ ，其中邻节点发现模式标志位 F 用以表示该邻节点发现方式，具体用法将在下文详述。每个节点的邻节点列表初始为空，节点根据侦听信道获得的信息实时更新邻节点列表。

3.2 直接发现与间接发现

为了缩短邻节点发现过程，克服水声通信网络中节点间时间同步困难的问题，所提邻节点发现机制采用直接发现和间接发现两种方式发现邻节点。当两个节点顺利握手，成功交换HELLO信号与REPLY信号，更新自身邻节点列表完成邻节点发现，这种邻节点发现方式称作直接发现，当邻节点以直接发现方式被发现时，邻节点列表中的发现模式标志位 F 记录为1。如图2所示，节点 a 与节点 b 通过交换HELLO信号与REPLY信号实现了邻节点直接发现。在定向收发网络中，当节点在某个特定发射波束扇区广播HELLO信号时，其邻节点可能由于“聋”节点问题而不能收到HELLO信号。为了解决这一问题，在所提邻节点发现机制除了直接发现外，还有邻节点间接发现方式。如图2所示，节点对 a 与 b 、节点对 a 与 c 在之前的邻节点发现过程中通过握手成功发现了对方，但是节点对 b 与 c 由于定向发射波束扇区方向不匹配而没有发现对方。为了解决这个问题，本文中节点之间可以把自身的邻节点列表分享给其邻节点。在图2中节点 a 可以将自己的邻节点列表共享给节点 b 与节点 c ，节点 b 与节点 c 可以根据节点 a 邻节点列表中的坐标信息获取对方位置，并更新到自己的邻节点列表中，这种邻节点

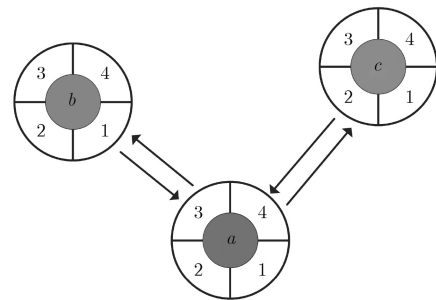


图 2 直接发现与间接发现

发现方式称作间接发现,当邻节点以间接发现方式被发现时,邻节点列表中的发现模式标志位 F 记录为0。

3.3 基于竞争的轮询机制

如图3所示,所提邻节点发现机制中工作时间被时隙化,时隙分为邻节点发现时隙与侦听回复时隙两种,每个时隙又由多个长度相等的子时隙构成,因为网络中各节点时间不同步,当每个子时隙时长大于等于HELLO信号与REPLY信号时长的2倍时,才能确保一个子时隙内能够完整地接收HELLO信号与REPLY信号。本文中假定HELLO信号与REPLY信号时长均为 τ ,为了方便分析,假设每个子时隙时长 T_{ms} 为 τ 的2倍,即 $T_{ms}=2\tau$ 。网络节点在邻节点发现时从邻节点发现时隙与侦听回复时隙中随机选取一种进行工作,其中选取邻节点发现时隙的概率为 P_H ,选取侦听回复时隙的概率为 P_L , $P_H + P_L = 1$ 。

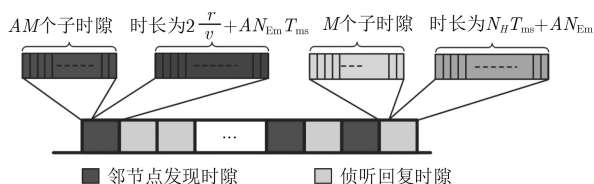


图3 邻节点发现时隙与侦听回复时隙

每个节点在第1轮邻节点发现时隙中,在该时隙的前 AM 个子时隙发送HELLO信号,其中 M 为定向天线发射波束扇区数目, A 为延迟调整参数,其定义与功能将在下文中详述。HELLO信号中包含节点编号、节点位置坐标、天线发射波束扇区编号、邻节点列表、未发送HELLO信号数目等信息,其表示为 $\{ID, \text{cood}(x, y), m, T_N, N_H\}$,每个子时隙发送一个信号,HELLO信号全部发送完毕后,节点转化为接收状态以侦听邻节点回复的REPLY信号。邻节点发现时隙时长 T_H 表示为

$$T_H = AM T_{ms} + 2 \frac{r}{v} + AN_{Em} T_{ms} \quad (4)$$

其中, M 为定向天线发射波束扇区数目, T_{ms} 为单个子时隙时间长度, r 为网络中节点通信距离, v 为水中声音传播速度, N_{Em} 为单个发射波束扇区邻节点预期数目。为了缩短邻节点发现过程时间,提高邻节点发现过程效率,在当前发射波束扇区已发现邻节点较少时,节点需要在此扇区停留相对多的时间以尽可能多地发现邻节点,在当前发射波束扇区已发现邻节点较多时,节点需要在此扇区停留相对少的时间来降低不必要的开销,缩短整个邻节点发现过程,所以在所提邻节点发现机制中引入延迟调

整参数 A 来帮助动态地控制节点在某个发射波束扇区的停留时间。节点在每轮邻节点发现开始时根据当前扇区已发现的邻节点数目动态调整延迟调整参数 A ,其具体表示为

$$A = \begin{cases} 2.0, & N_{dm} \leq 25\% \\ 1.5, & 25\% < N_{dm} \leq 50\% \\ 1.0, & 50\% < N_{dm} \leq 75\% \\ 0.5, & N_{dm} > 75\% \end{cases} \quad (5)$$

其中, N_{dm} 为当前发射波束扇区已发现的邻节点数目,式(5)中 A 的取值及其对应已发现邻节点数目 N_{dm} 的取值并不是一成不变的,可以根据实际网络情况对其作出调整。节点再次选择邻节点发现时隙时,首先检查各个发射波束扇区内已经发现邻节点的数目,经比较后选择已发现邻节点数目最少的扇区进行发送HELLO信号,当已发现邻节点数目最少扇区的数目大于1时,节点随机选取一个扇区发送HELLO信号。当某个发射波束扇区已发现邻节点数目 N_{dm} 大于单个发射波束扇区邻节点预期数目 N_{Em} 时,节点将不会再选择该扇区进行任何邻节点发现行为;类似地,当在某个发射波束扇区连续两轮邻节点发现时隙都没有发现新的邻节点,系统将判定该扇区没有未被发现的邻节点,节点同样不会再选择该扇区进行任何邻节点发现行为。

当节点选择侦听回复时隙进行工作时,节点首先从 M 个发射波束扇区中随机选取一个开始侦听来自邻节点的HELLO信号,此过程持续一个子时隙,在当前发射波束扇区完成侦听后,节点在下一个子时隙将定向天线顺时针切换至下一个发射波束扇区侦听来自邻节点的HELLO信号,此过程重复 M 次,直至所有发射波束扇区都完成对邻节点HELLO信号的侦听。之后,当前节点将根据是否收到来自邻节点的HELLO信号来决定接下来的行为。侦听回复时隙时长表示为

$$T_L = M T_{ms} + N_H T_{ms} + AN_{Em} \quad (6)$$

其中, M 为定向天线发射波束扇区数目, T_{ms} 为单个子时隙时间长度, N_H 为未发送HELLO信号数目, A 为延迟调整参数, N_{Em} 为单个发射波束扇区邻节点预期数目。

节点在侦听回复时隙的前 M 个子时隙如果未侦听到来自邻节点的HELLO信号,则在当前侦听回复时隙剩余子时隙中继续侦听信号。如果节点在前 M 个子时隙中侦听到来自邻节点的HELLO信号,首先检查自己的邻节点列表,判断当前源节点是否已经存在于邻节点列表。如果邻节点列表中有此源节点的记录,节点进一步检查发现模式标志位的 F 的值,如果值为1,则不向源节点回复REPLY信号;

否则，节点将源节点信息更新到自身邻居表中，并随意选择一个子时隙向源节点回复REPLY信号。

4 仿真与分析

为了评估所提邻节点发现机制的性能，本文以随机两路邻节点发现机制做为参照，在NS3仿真平台^[16]对两种邻节点发现机制的邻节点平均发现时延和邻节点发现率进行仿真。随机两路邻节点发现机制中，节点随机选择发射波束扇区在发送HELLO信号状态与侦听回复状态随机选择来发现邻节点。邻节点平均发现时延为网络内所有节点邻节点发现用时总和与所有节点发现邻节点数目总和的比值；邻节点发现率为已发现的邻节点数目与所有邻节点数目的比值。仿真参数如表1所示。结果取30次仿真实验的平均值。

图4为天线发射波束扇区数目分别为2, 4, 6时，网络内节点数目从10增加到100时，两种邻节点发现机制邻节点发现平均时延和邻节点发现率的性能比较。如图4(a), 图4(c), 图4(e)所示，随着网络中节点数目的增加，所提邻节点发现机制与随机两路邻节点发现机制邻节点平均发现时延均有所增加，但所提邻节点发现机制增加速度明显低于随机两路邻节点发现机制。这是因为所提邻节点发现机制除直接发现外，还有间接发现方式，可以共享信息发现更多的邻节点，同时所提邻节点发现机制中基于竞争的轮询机制可以有效减少信号碰撞。从图

表1 仿真参数

参数	取值
网络部署区域(km ²)	5×5
节点分布方式	均匀随机分布
节点数目N	10~100
天线发射波束扇区数目M	2~6
节点通信距离半径r(km)	1
子时隙时长τ(ms)	200
仿真时长(s)	1000
水中声信号传播速度(m/s)	1500

4(b), 图4(d), 图4(f)中可以看出，当网络中密度较低时，两种邻节点发现机制的邻节点发现率均保持在较高的水平，所提邻节点发现机制邻节点发现率能够达到100%，随着网络中节点密度增加，两种邻节点发现机制的邻节点发现率都开始下降，但是在网络中节点密度较高时，所提邻节点发现机制的邻节点发现率明显高于随机两路邻节点发现机制，这是相较于随机两路邻节点发现机制，所提邻节点发现机制独有的间接发现能够发现更多的邻节点。

图5为网络内节点数目分别为20, 50, 80时，节点天线发射波束扇区数目从2增加到6时，两种邻节点发现机制邻节点发现时延和邻节点发现率的性能比较。如图5(a), 图5(c), 图5(e)所示，当发射波束扇区数目从2增加到4时，两种邻节点发现机制邻

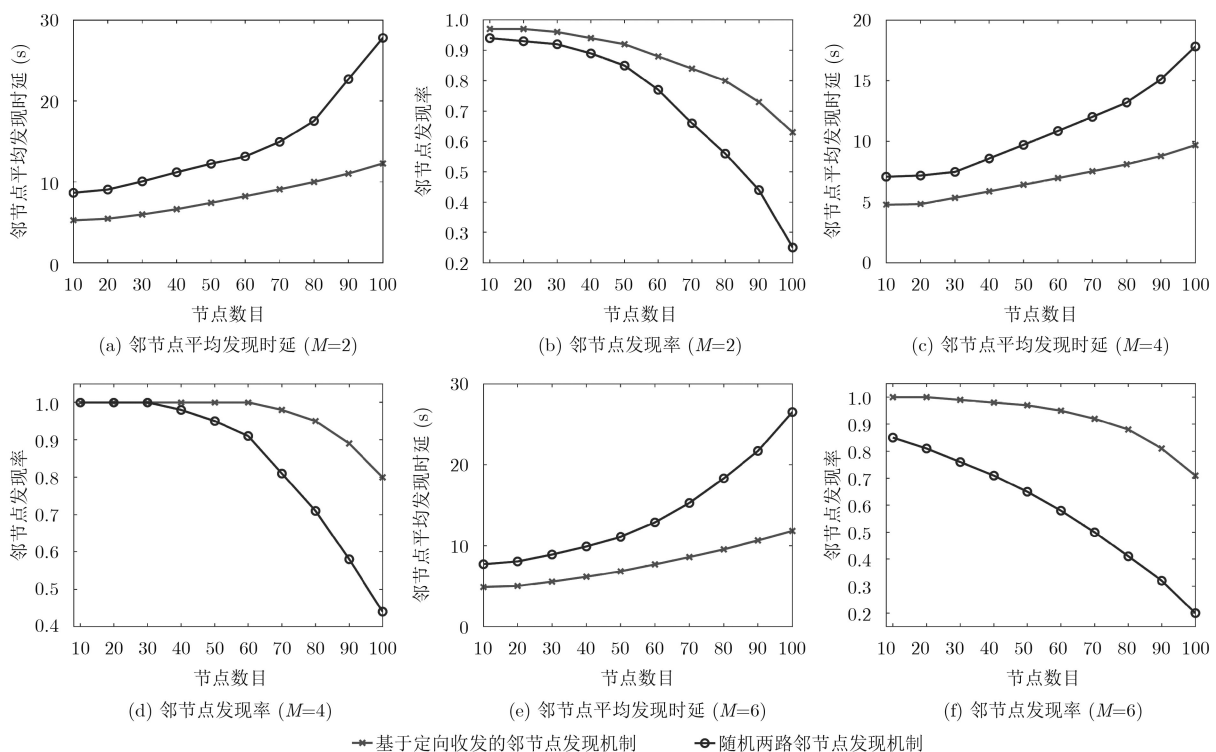


图4 节点数目对邻节点发现机制性能的影响(波束扇区数目为2, 4, 6)

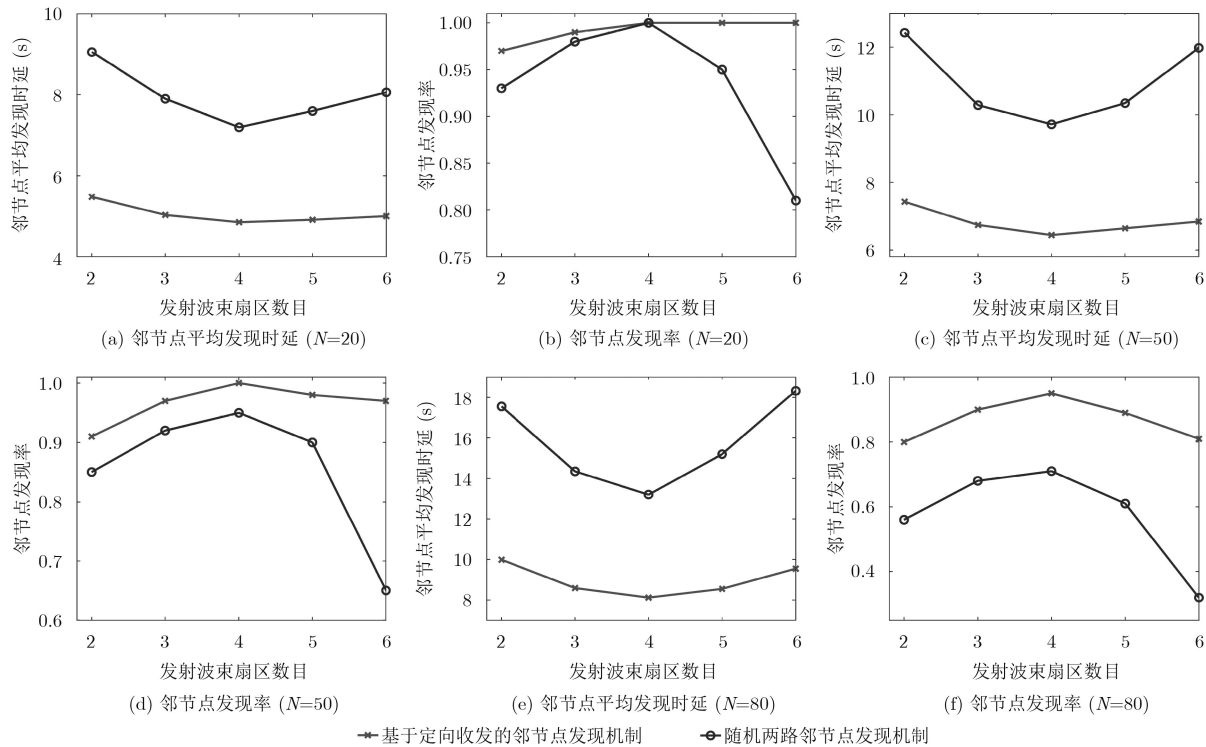


图5 发射波束扇区数目对邻节点发现机制性能的影响(网络节点数目为20, 50, 80)

节点平均发现时延随着扇区的数目增加而减少。这是因为波束扇区的增加提供了更多空间复用的机会。当扇区数目继续增加时, 所提邻节点发现机制邻节点平均发现时延趋于稳定, 而随机两路邻节点发现机制邻节点发现时延逐渐增加, 这是因为扇区数目越多, 每个扇区覆盖角度越小, 对于随机两路邻节点, 发送节点与接收节点定向天线对准越困难。图5(b), 图5(d), 图5(f)为网络内节点数目分别为20, 50, 80时, 邻节点发现率随发射波束扇区增加的变化趋势, 当发射波束扇区数目从2增加到4时, 两种邻节点发现机制邻节点发现率随扇区数目增加而增加。当扇区数目继续增加时, 所提邻节点发现机制邻节点发现率趋于稳定, 而随机两路邻节点发现机制邻节点发现率迅速降低。这是因为对于随机两路邻节点发现机制扇区数目越多, 发送节点与接收节点定向天线对准越困难, 扇区数目越多随机两路邻节点发现机制将产生越多的HELLO/REPLY信号, 导致碰撞的发生。同时, 从图5中可以看到, 不同的网络节点密度情况下, 发射天线波束扇区数目为4时所提邻节点发现机制的邻节点平均发现时延与邻节点发现率性能明显优于发射天线波束数量为其他数值时。

5 结束语

针对水声通信网络邻节点发现困难的问题, 本文提出了一种基于定向收发的水声通信网络邻节点

发现机制。该机制中节点只采用定向方式发送和接收信号; 具有直接发现和间接发现两种邻节点发现方式; 结合基于竞争的HELLO/REPLY两路握手机制, 可根据当前已发现节点数目动态调整邻节点发现策略。仿真结果表明, 与随机两路邻节点发现机制相比, 本文所提邻节点发现机制在同样条件下邻节点发现时延更短, 邻节点发现率更高。

参考文献

- [1] 许肖梅. 水声通信与水声网络的发展与应用[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 811-816. doi: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.06.026.
XU Xiaomei. Development and applications of underwater acoustic communication and networks[J]. *Technical Acoustics*, 2009, 28(6): 811-816. doi: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.06.026.
- [2] 吴学智, 靳煜, 何如龙. 水声网络及其军事应用研究[J]. 电声技术, 2012, 36(8): 50-53. doi: 10.3969/j.issn.1002-8684.2012.08.012.
WU Xuezhi, JIN Yu, and HE Rulong. Research on underwater acoustic networks and military applications[J]. *Audio Engineering*, 2012, 36(8): 50-53. doi: 10.3969/j.issn.1002-8684.2012.08.012.
- [3] HEIDEMANN J, STOJANOVIC M, and ZORZI M. Underwater sensor networks: Applications, advances and challenges[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A—Mathematical Physical and Engineering*

- Sciences*, 2012, 370(1958): 158–175. doi: [10.1098/rsta.2011.0214](https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0214).
- [4] FELEMBAN E, SHAIKH F K, QURESHI U M, *et al.* Underwater sensor network applications: A comprehensive survey[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015(11): 1–14. doi: [10.1155/2015/896832](https://doi.org/10.1155/2015/896832).
- [5] 钟永信, 黄建国, 韩晶. 一种用于格型拓扑的水声传感器网络 TDMA 协议[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(7): 1774–1778. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.00980](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00980).
ZHONG Yongxin, HUANG Jianguo, and HAN Jing. A TDMA protocol for underwater acoustic sensor networks with grid topology[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(7): 1774–1778. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.00980](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00980).
- [6] 庞菲菲, 张群飞, 史文涛, 等. 基于Parzen窗的水下无线传感器网络目标定位方法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(1): 45–50. doi: [10.11999/JEIT160246](https://doi.org/10.11999/JEIT160246).
PANG Feifei, ZHANG Qunfei, SHI Wentao, *et al.* Target localization method based on parzen window in underwater wireless sensor network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(1): 45–50. doi: [10.11999/JEIT160246](https://doi.org/10.11999/JEIT160246).
- [7] 钟永信, 黄建国, 韩晶. 基于空间唤醒的水声传感器网络节能路由协议[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(6): 1326–1331. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01090](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01090).
ZHONG Yongxin, HUANG Jianguo, and HAN Jing. Energy-efficient routing protocol based on spatial wakeup for underwater acoustic sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1326–1331. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01090](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01090).
- [8] GHAFLOOR H, NOH Y, and KOO I. OFDM-based spectrum-aware routing in underwater cognitive acoustic networks[J]. *IET Communications*, 2017, 11(17): 2613–2620. doi: [10.1049/iet-com.2017.0244](https://doi.org/10.1049/iet-com.2017.0244).
- [9] LI Chao, XU Yongjun, XU Chaonong, *et al.* DTMAC: A delay tolerant MAC protocol for underwater wireless sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(11): 4137–4146. doi: [10.1109/JSEN.2015.2462740](https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2462740).
- [10] ZHANG Senlin, QIAN Liangfang, LIU Meiqin, *et al.* A slotted-FAMA based MAC protocol for underwater wireless sensor networks with data train[J]. *Journal of Signal Processing Systems for Signal Image and Video Technology*, 2017, 89(1): 3–12. doi: [10.1007/s11265-016-1138-1](https://doi.org/10.1007/s11265-016-1138-1).
- [11] SIVANANTHAM E and RAMAKRISHNAN M. Energy-efficient sustainable cluster based neighbor discovery technique for wireless networks with directional antennas[J]. *Cluster Computing-the Journal of Networks Software Tools and Applications*, 2017, 20(2): 1527–1534. doi: [10.1007/s10586-017-0862-z](https://doi.org/10.1007/s10586-017-0862-z).
- [12] SUBRAMANIAN A P and DAS S R. Addressing deafness and hidden terminal problem in directional antenna based wireless multi-hop networks[J]. *Wireless Networks*, 2010, 16(6): 1557–1567. doi: [10.1007/s11276-008-0138-x](https://doi.org/10.1007/s11276-008-0138-x).
- [13] ZHANG Zhensheng. DTRA: Directional transmission and reception algorithms in WLANs with directional antennas for QoS support[J]. *IEEE Network the Magazine of Global Internetworking*, 2005, 19(3): 27–32. doi: [10.1109/MNET.2005.1453396](https://doi.org/10.1109/MNET.2005.1453396).
- [14] TRAN T, AN M K, and HUYNH D T. Antenna orientation and range assignment algorithms in directional WSNs[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2017, 25(6): 3368–3381. doi: [10.1109/TNET.2017.2743008](https://doi.org/10.1109/TNET.2017.2743008).
- [15] CHEN Jienan, XIE Junfei, Gu Yixin, *et al.* Long-range and broadband aerial communication using directional antennas (ACDA): Design and implementation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(12): 10793–10805. doi: [10.1109/TVT.2017.2723802](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2723802).
- [16] FONT J L, LNIGO P, DOMINGUEZ M, *et al.* Analysis of source code metrics from ns-2 and ns-3 network simulators[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2010, 19(5): 1330–1346. doi: [10.1016/j.simpat.2011.01.009](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.01.009).
- 杨健敏: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为水声通信网络技术。
乔 钢: 男, 1974年生, 教授, 研究方向为水声通信与网络技术、水声目标探测与定位。
聂东虎: 男, 1979年生, 讲师, 研究方向为水声通信与网络技术、水声目标探测与定位。
马 璐: 女, 1987年生, 讲师, 研究方向为水声通信与网络技术。