

RIM-MAC: 一种适用于水下传感网接收者发起的多会话 MAC 协议

李超^{1,2}, 徐勇军¹, 刁博宇^{1,2}, 王峰³, 王琪¹

(1. 中国科学院 计算技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100190; 3. 海军装备研究院, 北京 100161)

摘要: 声通信是水下传感网的主要通信方式之一, 但是它具有长延迟和低带宽的特点, 这是水下传感网 MAC (media access control) 协议研究面临的主要挑战。为提高网络吞吐量, 提出了一种接收者发起的多会话 MAC 协议 (RIM-MAC)。它利用接收者发起会话, 通过一次会话的 4 次握手完成所有邻居数据分组的传输, 有效地减少握手次数。同时利用侦听到的本地信息 (邻居延迟图和邻居的传输调度) 避免信道冲突并发起多个会话, 这解决了长传播延迟带来的信道利用率低的问题。RIM-MAC 通过增强节点间并行传输的能力, 在接收者和发送者两端提高时空复用率, 与经典水下 MAC 协议比, 网络吞吐量提高了至少 36%。除此之外, 基于自适应数据轮询策略提出了一种网络负载公平算法 (FTA), 它保证了网络中竞争节点间的信道访问的公平性。仿真实验表明, 在长传播延迟的场景下, RIM-MAC 取得了比典型的水下传感网 MAC 协议更好的吞吐量性能。

关键词: 传播延迟; 并行传输; 多会话; 接收者发起; 水下传感网

中图分类号: TP391.72

文献标识码: A

RIM-MAC: a receiver initiated multi-session MAC protocol for underwater acoustic networks

LI Chao^{1,2}, XU Yong-jun¹, DIAO Bo-yu^{1,2}, WANG Feng³, WANG Qi¹

(1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China)

Abstract: Acoustic waves are major means of communication in underwater networks. Unfortunately, acoustic waves incur long propagation delays and limited bandwidth that must be taken into account in the MAC design to achieve a high throughput. A multi-session random access MAC protocol for underwater acoustic networks based on receiver reservation named RIM-MAC is proposed. It is a handshaking based protocol that addresses the channel's long propagation delay characteristic by utilizing receiver-initiated reservations reducing the number of handshaking processes, as well as by passively-acquired local information (i.e., neighboring nodes' propagation delay maps and expected transmission schedules) to launch multiple simultaneous sessions. RIM-MAC increases the chances of concurrent transmissions in the underwater channel and achieve the channel reuse at both the sender and receiver side, improving the overall throughput at least 36% compared to the typical MAC protocols. Moreover, a traffic prediction based adaptive data polling scheme named fair traffic algorithm (FTA) guarantees fairness across multiple contending nodes. Extensive simulation results have confirmed that the RIM-MAC protocol outperforms existing MAC protocols and provides fair medium access in representative long propagation delay scenarios.

Key words: propagation delay; concurrent transmission; multi-session; receiver initiated; underwater acoustic networks

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 (TWSN, terrestrial wireless sensor networks) 研究的迅速发展并逐步走向应用^[1,2], 水下传感网 (UWSN, underwater

收稿日期: 2015-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61173132, 61303245)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61173132, 61303245)

sensor network) 的研究和应用已经成为新的热点。世界上的超级大国都是海洋强国,但人类对覆盖地球大部分面积的海洋的认知还远远不够,水下传感网作为认知海洋的重要手段,已得到世界各国政府部门、工业界、学术界和科研机构的极大关注^[3,4]。MAC (media access control) 层位于水下传感网的物理层和路由层之间,主要负责水声信道的访问机制、合理高效地使用水声信道的带宽资源等。MAC 协议设计对网络性能具有重要的影响,尤其是对低带宽、长延迟的水声信道系统^[5]。

但是在水下传感网中设计 MAC 协议过程中,存在以下问题和挑战^[6,7]。

1) 声速长延迟的挑战。声波在水下的传输速度很慢,通常仅有 1 500 m/s,而且水下介质的密度、温度及水质等不均匀,导致声速不稳定^[8],这导致水下通信的传播延迟很长。

2) 水声信道带宽低。水下的通信环境非常的恶劣,网络的信号很不稳定且容易造成信号的中断,这导致水声信道可利用带宽很低。另外,随着传输距离的增大,可利用带宽会进一步降低,例如传输距离在 1~10 km 之间的网络,带宽只有 10 kHz;传输距离为 0.1~1 km 的水声通信网络的带宽大约为 20~50 kHz。

因此,对水下传感网的 MAC 协议展开研究,以降低网络延迟,提高网络吞吐量是非常重要的。在长延迟的水声信道中,为了提高系统的吞吐量,必须增加同时在信道中传输的数据分组的数目,提高信道复用率。为了克服水声信道长延迟和低带宽带来的挑战,实现接收和发送两端的时空复用,提高信道利用率和网络吞吐量,本文提出一种基于握手的接收者发起的多会话 MAC 协议——RIM-MAC (receiver initiated multi-session MAC protocol)。与一般信道预留类协议不同的是 RIM-MAC 是接收者发起握手的协议,这可以通过一次握手过程完成多个数据分组的传输,降低了控制分组传输比例。RIM-MAC 基于 RIPT^[9]改进,在 RIPT 的基础上本文做了以下贡献。

1) 它通过侦听到的本地信息建立邻居延迟图,根据延迟图和邻居节点的传输调度信息,有效地避免了信道冲突。

2) 在避免信道冲突的前提下,它允许每个节点同时发起多个会话,实现在接收和发送两端的时空复用,提高了网络吞吐量。

3) 为了保证网络的稳定性与公平性,本文提出一种基于自适应数据轮询策略的网络负载公平算法 (FTA, fair traffic algorithm),它通过控制分配给节点的可用带宽,保证网络中所有节点都能公平的访问信道,避免某些节点不公平使用信道的情况出现。

2 相关工作

文献[10]提出划分时隙的 MAC 协议——S-FAMA (slotted floor acquisition multiple access),它将时间划分成时隙,所有的报文必须在每个时隙的开始进行传送,因此,时隙的长度必须能够避免发生冲突。该协议必须保证节点在发送数据分组之前首先获得信道使用权,从而能够实现数据分组的无冲突传输。S-FAMA 协议避免了数据分组的碰撞,但是,由于水声信道的长传播延迟特性,该握手机制会导致较低的系统吞吐量。由于水下声波的传播延迟非常大,文献[11]提出一种传播延迟容忍碰撞避免的水下 MAC 协议——PCAP(propagation-delay-tolerant collision avoidance protocol)。接收端接收到 RTS(request to send)之后,不是立刻回复 CTS(clear to send),而是等待一段时间再发送 CTS,并且 PCAP 规定其 RTS/CTS 握手的时间为固定值,因此可以允许发送端在发送完 RTS 后到接收到 CTS 的时间段内去完成其他任务,这提高了网络的吞吐量。但是对于异构要求的应用程序,PCAP 并没有提供一种灵活的解决方案。此外,Liao 等^[12]为了解决空间访问的公平性问题提出了 SF-MAC (spatially fair mac protocol) 协议,采用握手机制有效解决了隐藏终端问题,利用 RTS 竞争周期接收所有 RTS 请求分组,并使用概率准则来判断可能最先发送 RTS 分组的节点,保证空间的公平性,但是 SF-MAC 协议为了避免信道冲突,采用较长时长的 RTS 竞争周期,增加了信道竞争的握手时长,降低了信道利用率。

文献[9]在水下传感网中首次提出接收者发起数据传输 MAC 协议 RIPT (receiver-initiated reservation-based protocol),接收者根据它与邻居节点的延迟通过调度实现多个数据分组的接收,并且保证数据分组在接收端顺序排列,提高信道利用率。但是在 RIPT 中,每个节点和邻居节点同时只能建立一个握手过程,在长传播延迟的水下场景中,这种通信机制限制了信道利用率的提高。此外,其信道复用仅发生在接收端,并没有实现发送端的信道复用。文献[13]提出的 DOTS (propagation delay-aware

opportunistic MAC protocol) 协议代表了基于握手机制的 MAC 协议的最新进展, 其主要的改进是充分利用水声信道传播延迟大这一特点, 化劣势为优势, 通过建立系统的并行传输, 增加了系统的吞吐量。DOTS 是一个发送者发起的 MAC 协议, 在避免信道冲突的前提下, 贪心地发送更多的数据分组, 但是它的时空复用仅发送在接收端, 信道利用率还有进一步提升的空间。

3 RIM-MAC 协议

3.1 基本原则

RTS/CTS 方案被广泛用于缓解隐藏终端和暴露终端问题, 但它在应用于水下传感网过程中主要有 2 个缺点。首先, 由于长传播延迟, 在数据分组发送之前需要多轮完整的双向控制分组交换, 这为每一个数据分组的发送引入了相当大的延迟, 从而导致低吞吐率和低信道利用率。此外, RTS/CTS 握手机制中节点需要耗费更多的时间从邻居节点接收 RTS 和 CTS 分组, 从而延长了冲突周期。长传播延迟严重影响了 RTS/CTS 解决隐藏终端问题的能力, 从而导致低吞吐量和高冲突率。对于第一个缺点, RIM-MAC 通过节点间建立多个会话, 增加数据分组在信道中的数量, 从而提高了吞吐量。对于第二个缺点, 因为接收者准确地知道自己的当前状态, 接收者发起握手的信道预留协议能够在长传播延迟的情况下更好地在避免信道冲突^[9]。

与典型的 3 次握手 (RTS/CTS/DATA) 机制不同, RIM-MAC 协议利用接收者主动发起握手的 4 次握手 (RTR/SIZE/ORDER/DATA) 机制, 本文把 2 个节点进行 4 次握手的过程统称为一个“会话”, 如图 1 所示。为了避免混淆, “接收者”是指接收数据分组的节点, “发送者”指的是有数据分组发送给接收者的节点。RTR(ready-to-receive)控制分组负责通知所有邻居节点, 准备作为一个接收者。一旦接到 RTR 分组, 一系列 SIZE 控制分组将被发送给接收者, 以此标识邻居节点想要发送给接收者的数据分组的数目。在 3.3 节介绍了避免 SIZE 控制分组冲突的策略。接收者然后发送一个 ORDER 控制分组来通知其邻居节点的数据分组发送相对顺序。最后, 各自的邻居节点按照顺序发送数据分组给接收者。

受文献[14]的启发, 在长传播延迟的水声信道中, 通过在控制分组传输的过程中加入等待时间可以减少信道的冲突。基于此, 本文提出 RIM-MAC

无冲突传输的 3 个条件。1) RTR 等待时间: 从接收者发送 RTR 到发送者回复 SIZE 响应的传输时间应大于最大传播延迟 (发送报文到达其最大传输范围的时间); 2) SIZE 的等待时间: 接收者在发送 RTR 后等待接收邻居节点的 SIZE 控制分组的时间应该大于 RTR 传输时间加上最大传播延迟的 2 倍; 3) ORDER 等待时间: 从接收者发送 ORDER 控制分组到发送者发送数据分组的时间大于最大传播延迟的时间。因此, 这 3 个条件是 RIM-MAC 协议避免报文冲突的基础。

在 RIM-MAC 协议中, 要求所有节点之间的时间同步, 这对准确估计节点之间的传输延迟是非常必要的。在文献[15]中, 作者提出了高延迟时间同步 (TSHL), 并通过仿真验证了 TSHL 可以通过一个可靠和有效的方式纠正时钟偏移。因此, RIM-MAC 的时间同步是可以实现的。利用节点间的时间同步以及控制/数据分组的时间戳, 每个节点都可以通过监听邻居节点的报文来计算其邻居节点的所有报文的传输和接收时间。对于每个节点来说, 通过已知包括节点和其一、两跳邻居间的传输延迟和邻居节点所有报文的发送和接收时间, 可以用来避免碰撞。

根据侦听到的报文的类型 (RTR, SIZE, ORDER, DATA) 和每个节点的延迟图可以推断出其所有邻居节点接收和发送报文的时间。同理, 根据节点目前的状态和已知的邻居延迟图, 一个节点可以推测出它接收报文的时间。当一个节点要发送一个报文时, 它会计算所有报文的接收时间, 并与邻居节点和本地的报文接收时间进行比较, 以检测可能发生的冲突。如果预测不会发生冲突, 节点开始它的传输, 否则, 进入根据二进制指数退避算法^[10]进行退避等待。

3.2 邻居延迟图管理

一个节点通过监听邻居节点的通信而建立一跳和 2 跳邻居节点的延迟图, 所以每个报文必须包含以下信息。

- 1) 源地址: 报文的发送节点;
- 2) 目的地址: 接收报文的节点;
- 3) 时间戳: 报文的发送时间;
- 4) 源一目的延迟: 估计的源和目的节点之间的传播延迟。

通过侦听邻居节点发送的报文, 节点能够构建其一跳邻居节点的传播延迟的延迟图, 以及其一、二跳邻居节点之间的延迟图。结合邻居延迟图和侦

听到的报文类型, 节点可以预测未来的所有报文的发送和接收时间。当节点要发送一个报文, 它计算所有需要成功传输到目的节点的报文的发送和接收时间 (RTR, SIZE, ORDER, DATA)。如果这些报文会与任何邻居或本地的报文接收产生冲突, 节点将放弃发送, 退避等待。

在水下传感网中, 节点由于受洋流的影响会不断处于移动的状态, 为了避免由于节点移动带来的计算误差, RIM-MAC 将保护时间引入其报文接收和发送时间的计算中。保护时间是用来估计在报文传播时间内, 源节点和目的节点之间距离发生的偏移。因此, 每个节点计算这个保护时间的方式为: $2 \times (\text{平均移动距离} / \text{水中声速})$ 。乘以 2 是因为源和目的节点可能会朝相反的方向移动。保护时间将与报文接收的时间相加, 从而降低了节点的移动性造成的碰撞率。

由于网络拓扑动态变化, 邻居延迟图有可能会过期。为了适应网络动态性, 邻居延迟图的定时更新是必需的。每当侦听到新的报文, 每个节点都要查询自己的延迟图, 查询此报文的源地址和目标地址是否已经在延迟图内。如果已经存在, 节点根据最新时间戳信息更新此条记录。否则, 就在延迟图内新增加一条记录, 每当在延迟图中创建新的记录时, 每一项都被设置一个计时器。当计时器过期时, 该项记录从延迟记录中移除, 以保证延迟图和传输时间表的大小可控。

3.3 单会话

当网络中某个节点想成为一个接收者, 它通过向周围邻居发送 RTR 报文来发起一个由 4 次握手过程组成的会话。RTR 报文中包括本节点的 ID、它与邻居间的延迟和 SIZE 报文的顺序。任何一个节点根据延迟图可以获知其与邻居节点的延迟及其邻居节点与邻居节点间的延迟。SIZE 报文的顺序由接收者与邻居间的延迟决定, 延迟越大的节点则越优先发送 SIZE 报文。因此, 根据延迟图, 可以通过调度保证邻居间的 SIZE 报文不会发生冲突。

如图 1 所示, RIM-MAC 的单个会话由 4 次握手过程组成。当一个邻居节点接收到 RTR 报文, 在保证不与其他邻居节点的 SIZE 报文冲突的前提下发送 SIZE 报文给接收者。接收者接收完邻居节点的 SIZE 报文, 接收者根据转发报文优先的策略给邻居分配发送数据分组的顺序。由于转发报文到达中间节点时, 已经消耗了网络的资源, 为了有效地增加网络资源利用率, 转发报文的优先权比新产生报文的优先权高。此外, 为了保证网络中竞争节点的公平性, 短报文的优先权比长报文优先权高。根据以上的原则, 接收者通过 ORDER 报文把数据分组的发送顺序发送给邻居节点。一旦邻居节点收到 ORDER 报文, 它需要计算其数据分组的发送时间, 在保证不冲突的前提下, 使数据分组在接收者端形成链状, 以提高信道的利用率。

3.4 冲突避免调度

在网络中的节点时间同步的前提下, 报文中时间戳为网络中的每个报文提供了时序信息。节点可以通过提取接收到的报文的时间戳信息获知接收者和发送者的延迟。通过这些延迟信息, 节点可以通过侦听到的报文信息, 针对某个会话推测出自己及邻居何时可以侦听到其未来的通信报文。当一个节点发起一个会话或者侦听到 RTR/SIZE 报文, 它就根据延迟图的延迟信息和报文中的时间戳计算未来所有报文发送与接收的时间。根据这些时间信息, 节点在延迟图中创建一个新的记录。如果节点想发起一个新的会话, 那么它必须满足以下 2 个条件: 1) 邻居冲突避免: 保证此会话的通信报文 (RTR/SIZE/ORDER/DATA) 不会影响到邻居的接收; 2) 本地冲突避免: 保证其他节点发送的 SIZE 和 DATA 报文不会干扰到自己的报文接收。

如图 2 所示, 节点 C 侦听到一个节点 B 发送给节点 A 的 SIZE 报文, 节点 C 预估节点 B 收到 ORDER 报文的时间为 SIZE 报文时间戳+最大传播

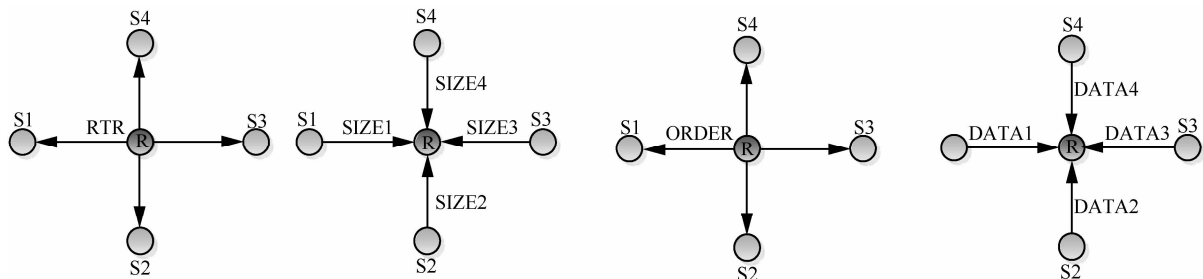


图 1 RIM-MAC 会话的 4 个阶段

延迟+节点 B 与 A 的传播延迟。同理，节点 C 可以预估它收到节点 B 发送的数据报文的时间为节点 B 的 SIZE 报文时间戳+2×最大传播延迟+ ORDER×SIZE 数据分组传输时间+节点 B 与节点 C 的传播延迟。如果节点 C 想要和邻居节点建立新的会话，那么它需要根据自己的延迟图和邻居的通信过程，保证自己的报文传输能满足邻居和本地冲突避免这 2 个条件。如果能满足，就发送 RTR 报文建立新的会话，否则就随机退避一段时间，然后在重新进行冲突避免调度计算。

3.5 多会话调度

在接收者创建新的会话前，节点需确认此会话产生的接收和发送调度不会与现存的调度产生冲突。如果根据冲突避免策略预见到冲突，节点会根据二进制指数退避算法随机退避一段时间再重新发起此会话。否则，节点会发送 RTR 报文建立新的会话。对于发送者，一旦收到 RTR 报文，即建立了发送者会话。发送者会话建立之后，节点会把此会话带来的发送和接收调度与现存的调度进行比较，如果根据冲突避免策略预见到冲突，发送者就不回复接收者 SIZE 报文。否则，发送者就回复 SIZE 报文，并等待接收 ORDER 报文，并根据分配的时隙发送数据分组。根据图 3 所示，节点间同时会话的数目会随

着传播延迟与数据分组传输时间的比例的增大而增大。在避免冲突的前提下，节点可以和邻居节点发起多个会话，这可以大大增加网络的吞吐量。

3.6 网络负载公平算法

在 RIM-MAC 协议中，接收者通过发送 RTR 报文发起会话，因此，RTR 报文的时序是一个很重要的问题。此外，由于所处的位置及负载的特点，在网络中某些节点会长时间占用信道，导致信道的不公平访问。保证网络中所有节点都能公平的访问信道是另一个需要解决的问题。因此，本文提出了网络负载公平算法 FTA，它保证了 RIM-MAC 协议的公平性。对于 FTA 算法，它需要解决 2 个问题：1) 接收者何时可以发起新的会话。2) 对于发送者来说，每次需要发送多少数据分组。对于第一个问题，借助于文献[16]，RIM-MAC 可以保证接收者在最合适的时间发起新的会话。对于第二个问题，本文基于带宽平衡模型^[17]，控制节点发起会话的数目和每次传输的数据分组数目，保证协议的公平性。

RIM-MAC 利用延迟图避免节点间的信道冲突，但是为了增加系统吞吐量，它贪心地发起了多个会话，在此过程中，协议的公平性很难保证。本文提出 FTA 算法用来保证网络带宽在节点间的公平分配。每个节点发送完 RTR 报文后会进入侦听状态，

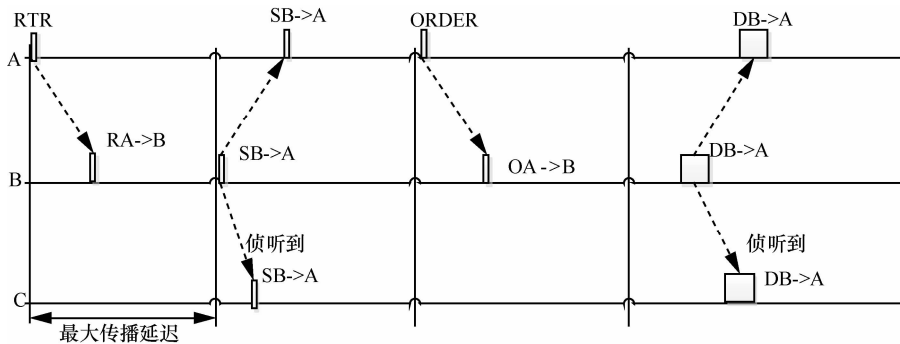


图 2 冲突避免调度

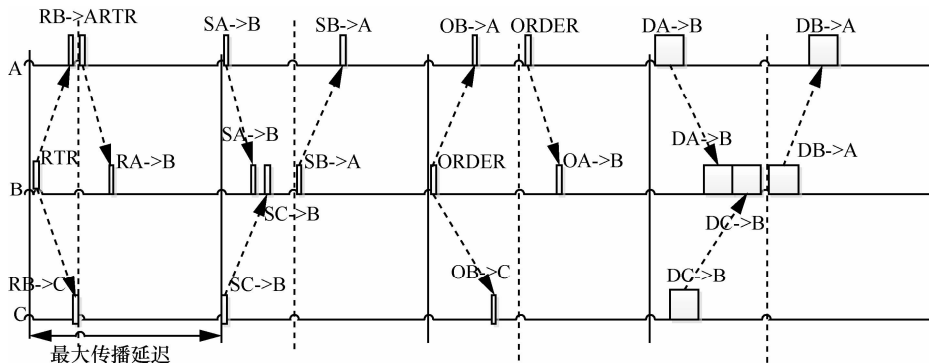


图 3 RIM-MAC 多会话

在其收到 SIZE 报文前, 其记录侦听到的 RTR 的报文个数 β , 此报文个数表示目前竞争信道的节点数目。

网络中的每个节点 i 可以测量网络中的剩余带宽 B_i

$$B_i = \frac{T_i}{T_m} C_i \quad (1)$$

其中, C_i 是节点 i 的信道带宽, 此带宽对于网络中的节点是一致的。 T_m 代表的测量时间, 定义为 8 倍的最大传播延迟。 T_i 是测量的节点 i 空闲时间。 分配给节点 i 可使用的带宽 ϕ_i'

$$\phi_i' = \mu \left(\frac{B_i}{\beta + 1} + \phi_i \right), \quad \mu \in [0, 1] \quad (2)$$

其中, ϕ_i 为节点 i 上次被分配的可使用带宽。 μ 的值如果取得太小, 能更好地保证网络公平性, 但是会造成带宽资源的浪费; μ 取得太大接近于 1, 能充分利用带宽资源, 但是网络公平性容易受到影响。 μ 在本文的仿真实验中, μ 取值 $\frac{1}{2}$, 通过第 4 节的仿真实验, FTA 算法能有效避免网络拥塞, 保证协议的公平性和稳定性。

4 仿真与性能评估

4.1 仿真场景及参数

本文的仿真实验是在 Aqua-Sim^[18] 平台上进行的, Aqua-Sim 是基于 NS-2 研发专用于水下传感网的仿真平台。 本文的仿真实验是在以下 3 种网络中进行。

1) 星型网络。 如图 4 所示, 星型网络是一个单跳网络, 由 4 个发送节点和一个接收节点组成, 发送节点与接收节点的距离是最大传播范围。 本文用星型网络展示 RIM-MAC 利用多会话实现数据并行传输对网络吞吐量的影响。

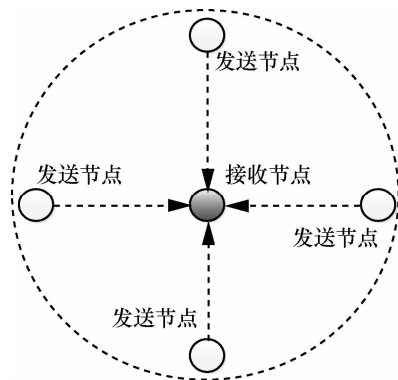


图 4 星型网络

2) 移动 ad-hoc 网络。 20 个节点被均匀的部署在以最大传播范围为直径三维区域内, 整个网络是个单跳网络。 网络的所有节点是随机移动的, 移动的模式基于 MCM 模型^[19], 最大移动速度是 0.3 m/s。

3) 树形网络。 如图 5 所示, 树形网络由 15 节点组成, 这些节点被部署 1 500 m × 1 500 m × 1 500 m 的区域内, 它们的最大传输范围为 750 m, 这样树形网络形成了一个两跳的多跳网络。 树形网络是水下传感网中的一种典型网络^[20,21]。 网络中所有数据分组都由位于网络底部的源节点产生, 路由节点只负责把源节点产生的数据分组转发给漂浮在水面的目的节点。 本文用树形网络展示 RIM-MAC 在多跳网络下的性能。

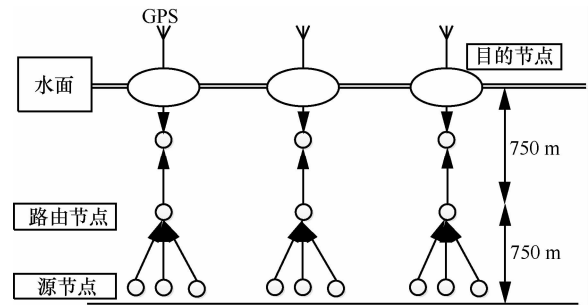


图 5 树形网络

本文中用到的水声通信的参数基于一种商用的水声通信调制解调器 UWM1000^[22] 设计, 网络带宽是 10 kbit/s, 发送功耗为 2 W, 接收功耗为 0.1 W, 空闲功耗为 0.01 W。 在网络中, 本文假设所有节点的最大传播范围是 750 m, 数据分组的长度固定为 256 byte, 控制分组的长度固定为 16 byte。 节点发送数据分组的速率相互独立且服从泊松分布。 本文在仿真中把节点的数据分组发送速率以 0.1 packet/s 的间隔由 0.1 packet/s 增加到 0.6 packet/s, 所有实验每轮的持续时间是 1 h, 每个实验重复进行 50 次, 然后把实验结果以置信区间 95% 取平均值。 本文用以下 3 个指标来评价协议的性能。

1) 网络吞吐量: 在仿真时间内所有收到的数据分组的字节数与仿真时间的比值。

$$Throughput = \frac{\text{接收数据分组数} \times \text{数据长度}}{\text{仿真时间}} \quad (3)$$

2) 端到端延迟: 所有数据分组产生的时间与被目的节点接收成功的时间差的平均值。

3) 平均功耗: 在仿真时间内所有节点消耗的功

耗与收到的数据分组数目的比值。

4.2 仿真结果及分析

本部分展示了 RIM-MAC、不带 FTA 的 RIM-MAC、RIPT^[9]、DOTS^[13]和 S-FAMA^[10]仿真的性能结果，并针对仿真结果进行了分析。

4.2.1 星型网络

根据图 6~图 8 的结果，可以看出随着网络负载增大，RIM-MAC 与不带 FTA 的 RIM-MAC 的吞吐量快速增长到最高值，RIM-MAC 比不带 FTA 的 RIM-MAC 的吞吐量最高值要高出 15%以上。当吞吐量达到最大值后，RIM-MAC 的吞吐量不再随着网络负载增加而增加；不带 FTA 的 RIM-MAC 的吞吐量到最大值后，会随着网络负载的增加急速下降，原因就是当网络负载增大后，控制分组的冲突率增大。另外，网络某些节点可能会一直占用信道，导致网络中的其他节点无法有效的发送数据分组，会进一步加大控制分组的冲突，造成网络拥塞，导致网络吞吐量下降。

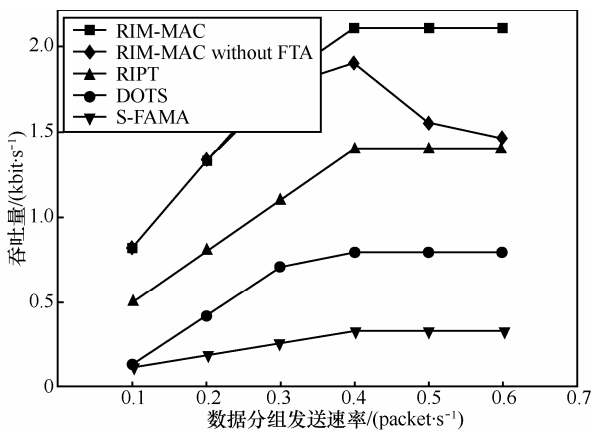


图 6 星型网络中协议的吞吐量

在星型网络中，4 个发送节点发送数据分组给位于网络中心的接收节点。RIM-MAC 是一个接收者发起握手的协议，在这种拓扑下，通过一次握手过程，可以接收所有邻居节点的数据分组，这提高了网络吞吐量。此外，发送节点还可以与接收节点建立多个会话，这进一步提高了吞吐量。RIPT 也是接收者发起握手 MAC 协议，虽然其仅与 DOTS 一样都是仅在接收端实现了时空复用，但是在这种网络中，RIPT 通过一次握手过程，可以接收所有邻居节点的数据分组，所以其网络吞吐量比 DOTS 和 S-FAMA 高。DOTS 和 S-FAMA 都是发送者发起握手的 MAC 协议，它们都需要 3 次握手过程才能接收完所有邻居的数据分组，所以它们吞吐量比

RIM-MAC 和 RIPT 低。

如图 6 所示，当数据分组发送速率到 0.4 packet/s 时，RIM-MAC 的吞吐量比 RIPT 高出约 50%，比 DOTS 高出约 162%，比 S-FAMA 高出约 536%。

4.2.2 移动 ad-hoc 网络

如图 7 所示，当数据分组发送速率到 0.3 packet/s 时，RIM-MAC 的吞吐量比 RIPT 高出约 53%，主要原因是 RIM-MAC 在避免冲突的前提下，在发送接收节点间建立的多个会话，同时传输数据分组，实现了网络的并行传输，增加了吞吐量。但是在 RIPT 中，发送与接收节点间同时只能建立一个会话，在长传播延迟的场景下，没有充分地实现空间复用。

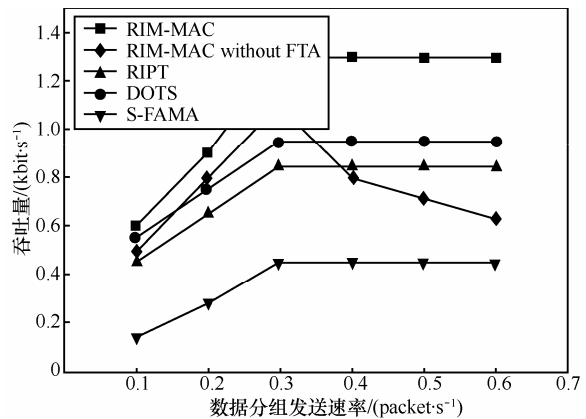


图 7 移动 ad-hoc 网络中协议的吞吐量

如图 7 所示，RIM-MAC 的吞吐量比 DOTS 高出 36%。DOTS 是一个发送者发起的 MAC 协议，它通过增加时空复用来实现数据并行传输，提高网络的吞吐量，但是它的时空复用仅发生在接收端，其信道利用率还有进一步提高的空间。RIM-MAC 利用本地信息避免了信道冲突，同时在节点间建立多会话，同时在接收和发送两端实现的时空复用，明显的提高的信道利用率。

如图 7 所示，RIM-MAC 的吞吐量比 S-FAMA 高出 189%。S-FAMA 协议将时间划分成时隙，所有的分组必须在每个时隙的开始进行传送，因此，时隙的长度必须能够避免发生冲突。该协议必须保证节点在发送数据分组之前首先获得信道使用权，从而能够实现数据分组的无冲突传输。它避免了数据分组的碰撞，由于水声信道的长传播延迟特性，节点间同时只能同时建立一个握手过程。在长传播延迟的场景下，该握手机制没有实现时空复用，会导致信道利用率不高。

4.2.3 树形网络

在树形网络中,所有的数据流都是从网络底部经过中间的路由节点转发到达水面的目的节点。路由节点作为中间节点,除了要接收来自于源节点的数据分组,还要负责把这些数据分组发送给目的节点,这样网络容易在路由节点处出现拥塞的情况。如图 8 所示,FTA 算法保证了网络吞吐量的稳定,有效地避免了信道在竞争节点间的不公平分配。在图 8 中,RIM-MAC 的吞吐量比 RIPT 高出约 67%,比 DOTS 高出约 43%,比 S-FAMA 高出约 233%。

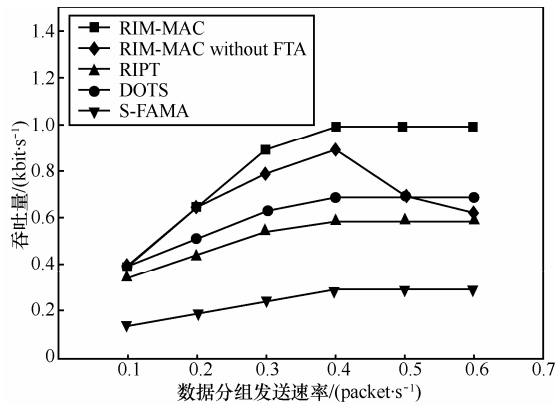


图 8 树形网络中协议的吞吐量

如图 9 所示,RIM-MAC 的端到端延迟低于其他 3 种协议。主要原因是,RIM-MAC 可以允许节点间建立多个会话,中间路由节点可以在参与接收底部源节点发送数据分组的会话的同时参与水面目的节点接收数据分组的会话,把从底部源节点接收的数据分组快速的转发给目的节点,降低了端到端的延迟。但是当网络负载增大时,RIM-MAC 的端到端延迟与其他协议的差距逐渐缩小。这是因为,网络负载的增大会增加控制分组的冲突,当网络吞吐量达到最大值后,继续增大网络负载,会引起控制分组冲突增多,增加网络的延迟。

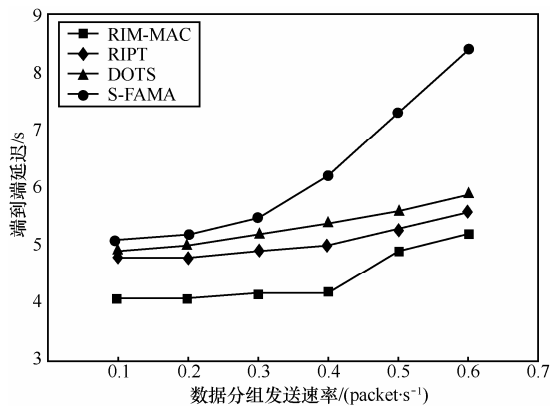


图 9 树形网络中协议的端到端延迟

如图 10 所示,RIM-MAC 的平均功耗高于其他 3 种协议,这是因为,一方面,为了避免信道冲突,节点除了发送数据外,一直处于侦听状态;另一方面,RIM-MAC 允许节点间建立多个会话,这会发送更多的数据分组,网络负载的增大会增加控制分组的冲突,当网络吞吐量达到最大值后,继续增大网络负载,会引起控制分组冲突增多,进一步增加系统功耗。

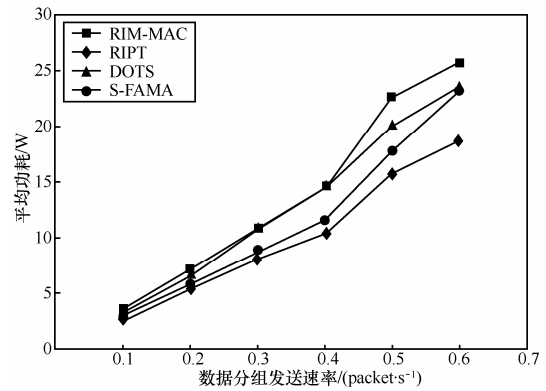


图 10 树形网络中协议的平均功耗

5 结束语

本文针对水下传感网中的长传播延迟和低带宽的问题,为了提高网络吞吐量,提出了一种接收者发起的多会话 MAC 协议,其利用本地信息,避免信道冲突;此外,通过允许节点间建立多会话,在接收和发送两端实现时空复用,提高信道利用率;为了保证网络的公平性,提出了 FTA 算法,有效地避免了网络拥塞。最后,通过在 3 种网络拓扑下的仿真实验结果表明,在长传播延迟的场景下,本文提出的 RIM-MAC 协议取得了比其他 3 种典型水下传感网 MAC 协议更好的吞吐量性能。

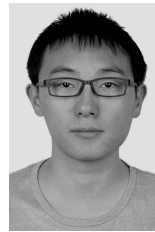
本文将来一方面要通过理论分析和仿真验证找到网络负载公平算法的 μ 的最优值;另一方面要把 RIM-MAC 运用到实际的水下环境,同时要从功耗、稳定性和吞吐量等方面提高它的性能。

参考文献:

[1] JENNIFER Y, BISWANATH M, DIPAK G. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(12):2292-2330.
 [2] 崔莉,鞠海玲,苗勇,等. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展,2005, 41(1): 163-174.
 CUI L, JU H L, MIAO Y, et al. Overview of wireless sensor networks[J]. Journal of Computer-Research and Development, 2005, 41(1): 163-174.

- [3] 郭忠文, 罗汉江, 洪峰, 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 Z W, LUO H J, HONG F, *et al.* Current progress and research issues in underwater sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(3): 377-389.
- [4] HAN G J, JIANG J F, BAO N, *et al.* Routing protocols for underwater wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(11):72-78.
- [5] CHEN K, MA M, CHENG E, *et al.* A survey on MAC protocols for underwater wireless sensor networks[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2014, 16(3): 1433-1447.
- [6] LIU L, ZHOU S, CUI J H. Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks[J]. Wiley Wireless Communications and Mobile Computing, 2008, 8(8): 977-994.
- [7] MELODIA T, KULHANDJIAN H, KUO L C, *et al.* Advances in underwater acoustic networking[A]. Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions[C]. 2013.804-852.
- [8] HAN G J, ZHANG C Y, SHU L, *et al.* Impacts of deployment strategies on localization performances in underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015,62(3): 1725-1733.
- [9] CHIRDCHOO N, SOH W S, CHUA K. RIPT: a receiver-initiated reservation-based protocol for underwater acoustic networks[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal, 2008, 26(9): 1744-1753.
- [10] MOLINS M, STOJANOVIC M. Slotted FAMA: a MAC protocol for underwater acoustic networks[A]. OCEANS 2006-Asia Pacific[C]. IEEE, 2007. 1-7.
- [11] GUO X, FRATER M R, RYAN M J. A propagation-delay-tolerant collision avoidance protocol for underwater acoustic sensor networks[A]. OCEANS 2006-Asia Pacific[C]. IEEE, 2007. 1-6.
- [12] LIAO W H, HUANG C C. Sf-Mac: a spatially fair mac protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. Sensors Journal IEEE, 2012, 12(6):1686-1694.
- [13] NOH Y, LEE H, HAN S, *et al.* DOTS: a propagation delay-aware opportunistic MAC protocol for mobile underwater networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(4): 766-782.
- [14] FULLMER C L, GARCIA-LUNA-ACEVES J J. Solutions to hidden terminal problems in wireless networks[J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 1997, (27):39-49.
- [15] SYED, AFFAN A, JOHN S. Time synchronization for high latency acoustic networks[A]. INFOCOM[C]. 2006.1-12.
- [16] LINA P, LUO Y, PENG Z, *et al.* Traffic estimation based receiver initiated MAC for underwater acoustic networks[A]. Wireless Mobile Applications And Services On Wlan Hotspots[C]. 2013.
- [17] ZHOU C, MAXEMCHUK N. Bandwidth Balancing in Mobile Ad hoc Networks[A]. WiMob[C]. 2010.15-20.
- [18] XIE P, ZHOU Z, PENG Z, *et al.* Aqua-sim: an ns-2 based simulator for underwater sensor networks[A]. OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi-Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges[C]. 2009.1-7.
- [19] CARUSO, ANTONIO, *et al.* The meandering current mobility model and its impact on underwater mobile sensor networks[A]. INFOCOM 2008, The 27th Conference on Computer Communications[C]. 2008.
- [20] LEE U, KONG J, GERLA M, *et al.* Time-critical underwater sensor diffusion with no proactive exchanges and negligible reactive floods[J]. Ad Hoc Networks, 2007, 5(6):943-958.
- [21] ZHOU Z, PENG Z, CUI J H, *et al.* Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks[J]. Mobile Computing IEEE Transactions, 2010, 10(3):335-348.
- [22] Linkquest underwater acoustic modems uwm1000 specifications[EB/OL]. <http://www.link-quest.com/html/uwm1000.htm>, 2014.

作者简介:



李超 (1987-), 男, 山东聊城人, 中国科学院计算技术研究所博士生, 主要研究方向为多感知信息融合、移动通信网络、水下传感网。

徐勇军 (1979-), 男, 安徽安庆人, 中国科学院计算技术研究所副研究员, 主要研究方向为多感知信息融合、物联网技术与应用。

刁博宇 (1989-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 中国科学院计算技术研究所博士生, 主要研究方向为水下延迟容忍网络协议优化、数据融合。

王峰 (1977-), 男, 山东济宁人, 博士, 海军装备研究院高级工程师, 主要研究方向为低能耗网络、传感器网络、物联网技术与应用。

王琪 (1985-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 中国科学院计算技术研究所助理研究员, 主要研究方向为无线多跳网络性能评价和性能优化等。