

水声传感网 MAC 协议综述

周密^{1,2} 崔勇¹ 徐兴福¹ 杨旭宁^{1,2}

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)¹ (西南电子电信技术研究所 成都 610041)²

摘要 海洋在人类发展中扮演着越来越重要的角色。水下通信技术作为人类认识海洋的重要手段,成为研究界的热点与难点。由于水下通信技术有不同于陆地无线通信的信道特点和性能要求,传统无线通信 MAC(medium access control)协议难以直接应用于水声通信,因此相继提出针对各种应用场景的水声 MAC 协议。在简述水声传感网(Underwater Acoustic Sensor Network, UWASN)特点和 MAC 协议设计准则后,根据信道获取方式将当前典型协议分为基于竞争和基于调度两大类。根据冲突处置方式进一步将基于竞争的协议分为随机多址和冲突避免,根据信道分配的动态性将基于调度的协议分为动态分配和静态分配。在此分类基础上,描述了近期出现的典型协议的设计思想、主要机制,并比较了协议在能耗、信道利用、吞吐量等方面的差异,最后指出提高 MAC 协议性能的发展方向。

关键词 水声传感网,基于调度的 MAC 协议,基于竞争的 MAC 协议,传输延时,冲突避免,节能性

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Survey of the MAC Protocols on Underwater Acoustic Sensor Network

ZHOU Mi^{1,2} CUI Yong¹ XU Xing-fu¹ YANG Xu-ning^{1,2}

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)¹

(Southwest Electronics and Telecommunication Technology Research Institute, Chengdu 610041, China)²

Abstract Nowadays the ocean plays an increasingly important role in the development of human society. As a basilic means to learn about the sea, underwater communication technology becomes a popular nodus in research. Different from the terrestrial wireless communication in channel characteristics and performance requirements, conventional wireless communication MAC(medium access control) does not apply to it. MAC protocols for various underwater acoustic applications were continuously proposed. After outlining the characteristics of underwater acoustic sensor network and the designing standards of MAC, current control mode was divided into contention-based protocol and scheduling-based protocol according to the pattern by which the channel was accessed. The contention-based protocols were further divided into random access and collision avoidance according to their modes of dealing with collision, while scheduling-based ones into dynamic allocation and static allocation according to dynamics of channel allocation. Under this classification, the design idea and primary mechanism of current main protocols were described, their performance differences were discussed such as energy efficiency, channel utilization and throughput, and a new development direction was presented for the improvement of the MAC protocols.

Keywords Underwater acoustic sensor network, Scheduling-based MAC protocol, Contention-based MAC protocol, Propagation delay, Collision avoidance, Energy efficiency

1 引言

随着科技进步,通信领域两个发展最快的分支——互联网和移动通信网日渐成熟。虽然海洋通信已经存在 40 多年,但是真正的大发展才刚刚崭露头角。高昂的线缆安装与维护费用、受限的目标活动范围以及对其他海洋活动(如正常航运)造成影响等缺点极大地限制了有缆通信在海洋环境中的应用,因此无线通信成为海洋通信的首要选择。水下声学传

感网(Underwater Wireless Acoustic Sensor Network, UWASN)就是以声波为信息载体而组成的无线传感网络。

UWASN 由多个传感器节点组成,根据传感器节点的功能可以应用于不同的场景:在科学研究上可以应用于合成孔径声学图像获取、海洋科学数据获取、洋流运动数据获取;在工业上可以应用于海洋资源勘探、海洋灾难救助等;在军事上可以应用于区域战术监测、水雷侦察、水下目标探测、跟踪与定位以及反潜战等^[1-3]。

到稿日期:2010-10-13 返修日期:2010-12-30 本文受国家自然科学基金项目(60911130511,60873252)、“九七三”国家重点基础研究发展计划项目(2007CB307105,2009CB320503)资助。

周密(1979—),男,硕士生,工程师,主要研究方向为网络协议设计与优化,E-mail:zhoumi_1979@126.com;崔勇(1976—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为无线网络与移动计算;徐兴福(1977—),男,硕士生,工程师,主要研究方向为信息工程与网络安全;杨旭宁(1977—),男,硕士生,工程师,主要研究方向为移动通信与信令技术。

目前国内外 UWASN 研究主要集中在调制方式、网络协议、水下时钟同步以及数据融合等问题。MAC (medium access control, MAC) 协议作为网络协议的重要组成部分,决定着信道资源分配,直接影响着网络整体性能,成为 UWASN 网络协议研究的基础工作。

2 水声传感网特点

水声传感网是将传感器节点以固定或移动的方式部署在大面积水域,采集和处理信息,并通过中继回传到岸基或船基处理中心的新型通信网络,是陆地传感网思想延伸到水下的新应用。作为水声传感网的传播媒质和信息载体,与陆地通信相比,水声信道与水声传感节点均有其独特性质,也面临着由此衍生出的挑战。

2.1 水声信道的特点

在海水里,光和电磁波的传输衰减特别大,即使是陆地上衰减最小的蓝绿光也达到 40dB/km,因此上述媒质不能满足人们对海洋通信的需要。然而在非常低的频率(200Hz 以下)下,声波在海洋中却能传播几百公里,即使 20kHz 的声波在水中的衰减也只有 2~3dB/km。因此,声波理所当然地作为水下无线通信的首选媒质。水声信道具有如下特点:

传播延迟大。声波在海水中的传播速度大约为 1500m/s,该速度使得传播延迟非常大(每公里约延迟 0.67s)。由于声波传播速度较之陆地上无线电波慢 5 个数量级,因此陆地无线 MAC 协议难以直接应用在水声网中。

误码率高。水声信道具有时间-空间-频率变化特性,所以多径干扰尤为突出。多径传输以及外来噪声会严重降低声波信号质量,增大信号在传输过程中的误码概率。

可用带宽窄。水下通信的有效声波频率范围为 30~300Hz,信号传输带宽高度依赖于传输距离,传播损失随距离增大而增加,因此水声信道可用频段非常有限,传播距离也有限。在 UWASN 中,要进行长距离通信,只能选择低码率。要选择高码率,只能进行短距离通信。

2.2 水下传感节点特点

动态性:由于水流运动、海洋生物和人类活动的影响,在水声网中大部分节点都存在一定程度的移动性。节点的相对移动使得网络拓扑不具有很强的稳定性,给协议设计带来一定困难。

功率受限:在海洋通信中,节点能量主要依赖于电池,但在水下更换节点电池也不太现实,所以最大化传感网的生命周期是水声网的首要目标。

计算和存储资源有限。作为一种嵌入式设备,要求成本低、体积小,故节点携带的计算和存储资源有限,使得节点处理信息的能力较弱。

部署成本高。无论是海面浮标还是海底锚定,以及科学实验中的湖试和海试,都需要诸多资源,因此 UWASN 的部署和数据回收成本都很高。

3 水声 MAC 协议设计准则和分类方法

3.1 水声 MAC 协议设计准则

MAC 协议处于水声网络协议的底层部分,负责分配节点之间有限的通信资源,是保证网络高效通信的关键协议。在设计 UWASN 的 MAC 协议时,应该考虑以下几个方面的因

素:

能量有效性。水下传感器通常依赖于电池供电,能量十分有限。节点空闲监听所消耗的能量远大于节点传送和接收数据时消耗的能量,同时串音和冲突也会造成节点能量不必要的浪费;基于握手方式的协议产生的大量控制消息也会造成能量的无谓消耗^[4]。因此水声网 MAC 协议设计中需要解决的首要问题就是如何实现能量高效利用。

节点动态性。因为节点能量耗尽,新节点的加入等都会引起网络拓扑结构的变化,所以设计 MAC 协议时应考虑其扩展性,以适应拓扑结构的动态性。

时钟同步。水声网具有传播延迟大且多径效应的特点,各节点间获得精准的时间同步很困难,使得需要精确时钟同步的技术难以有效应用。

网络拓扑。水声网的 MAC 协议设计与水下节点是稀疏分布还是密集部署密切相关。在稀疏部署时,由于节点之间距离较远,一个数据包的丢失都可能造成整个信息的丢失,因此需要很高的通信可靠性。在密集部署时,低功耗短距离的多跳水下声学网络会产生冗余报告。密集型部署虽然可以降低 MAC 协议对可靠性的要求,但也会增加能量消耗,缩短传感器节点的生命周期。

当然网络还有一些其他的重要因素,例如吞吐量、信道利用率、系统传输时延和公平性等。由于节点能量供应一直没有很好的解决方案,能量有效性仍然是传感网络 MAC 协议设计首要考虑的因素,比如引进苏醒/睡眠机制、减少空闲侦听、减少控制包信息、降低冲突重传和采用 tone 等。

3.2 水声 MAC 协议分类

根据不同的应用场景,国内外研究人员提出了多种 MAC 协议。目前 UWASN 中的 MAC 协议没有统一的分类方法,依据协议的信道获取方式,我们将协议分为基于竞争的 MAC 协议和基于调度的 MAC 协议。

基于竞争的 MAC 协议是按需申请信道。当节点有数据需要发送时,通过某种方式竞争信道,若检测到冲突,就按照退避策略让出信道,等到下一个周期重新竞争信道,直到发送成功或者放弃发送为止。基于竞争的协议根据冲突处置方式又继续划分为随机多址和冲突避免协议。在随机多址协议中,节点有发送需求就立即发送。出现冲突后,就退避让出信道,Aloha 就是此类协议的代表^[5-8]。冲突避免协议则是通过协商方式申请信道,协商成功就占用信道,不成功就执行退避算法。该类协议降低了由冲突引起重传的能量消耗,但是每次使用信道都要通过竞争才能够获得,与基于调度的协议相比需要大量的控制包开销。

基于调度的协议主要是采用某种算法周期性地给节点分配信道。目前基于调度的协议主要是采用 TDMA 方式分配信道。采用 FSSS 或 DSSS 的 CDMA 技术,能够有效抵抗衰减和多径效应,同时对时间同步的要求没有那么苛刻,比较适合水声通信,具有较大的发展前景。

4 基于竞争的 MAC 协议

虽然随机多址协议简单,实现方便,具有很好的时延特性,但冲突概率随着流量呈指数增长。当前的避免方式主要分为两类:一类是在两次发送之间加入与网络最大传输时延成正比的保护时间的冲突避免;一类是采用延迟预测、RTS/

CTS/DATA 和基于 tone 的信道预约机制。

4.1 利用保护时间的冲突避免协议

FAMA(floor acquisition multiple access)^[9]是基于 RTS/CTS 握手机制的协议。握手机制可以解决无线信道下的隐藏终端和暴露终端的问题。该协议采用以下两种手段来避免冲突:1)RTS 的长度大于最大传输延迟;2)CTS 的长度大于 RTS 的长度及两倍最大传输延迟及 CTS 的硬件转换时间。在负载较重的应用中,通过一次握手 FAMA 协议能够连续发送多个数据报文,相比 Aloha 协议有更好的吞吐性能^[10]。

虽然 FAMA 协议通过 RTS/CTS 控制包持续占用信道避免了冲突,但也带来了能量的无谓消耗和信道的低效利用。针对上述缺陷, Molins 等提出 s-FAMA(slotted FAMA)协议^[11],它在 FAMA 协议的基础上采用两种方式降低能量消耗:1)将整个时间轴划分为小的时间片,RTS/CTS/DATA/ACK 只能在时间片开始传输。时间片长度等于最大传输延时,消除了传统 FAMA 协议中控制信息过长的问题,从而节省了能量。2)根据节点接收到串音(Overhearing)消息的类型,每个节点静默不同的时间片,降低了功耗和提高了信道利用率。图 1 为采用 s-FAMA 协议的 A、B 两节点的一次成功握手。

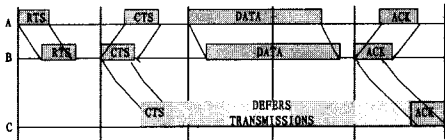


图 1 采用 s-FAMA 协议的 A、B 两节点的一次成功握手

在 s-FAMA 协议里,节点时间片都是网络最大传输延时,对于节点分布不均匀尤其是大部分节点临近而极少数节点较远的网络会使网络信道利用率降低。针对这些缺点, B. Peleato 等提出了 s-FAMA 的改进——ACPD(Adaptive Control Packet by Duration)协议^[12]。在控制包持续时间长度远小于传输延时的假设基础上,该协议允许节点针对不同的接收者使用不同长度的握手消息。握手控制包的长度正比于两个节点间的距离。接收节点收到一个 RTS 后,立刻回复 CTS 并开始监听信道等待数据包。监听过程中如果节点收到其他节点发送的 CTS,它会给对方发送一个非常短的公告包。发送节点如果收到其他节点发送的 CTS 或对方发送的公告,则终止传输。等待周期的长短也取决于节点之间的距离,该值可以由发送方通过测量 RTS/CTS 的往返时间间隔获得。改进的 ACPD 协议继承了 s-FAMA 的优点,并且时隙长度可变。通过该机制,同 FAMA 相比,协议的吞吐量提高了几倍,而且节点间不需要时间同步系统。但是该协议并未引入成功接收数据后的 ACK 消息,当冲突出现时主要依靠正常信号和串音信号的信噪比来解决,这就对节点的信号处理提出了更高的要求。

4.2 结合延迟预测的信道预约协议

在握手的基础上, PCAP (Propagation Delay Tolerant Collision Avoidance) 通过延迟预测让节点在等待 CTS 期间可以实施其他操作^[13]。利用水声通信中传输速度慢的特点,让节点在等待 CTS 时间段内完成其他操作,犹如按照操作所耗时间进行调度一样,使得网络传输在一个管道内进行。该协议使得节点能够为多个数据帧实施有计划的传输,从而降低了在高延迟信道里等待时间的浪费。

Guo Xiaoxing 等提出的 APCAP(adaptive PCAP)是水声网 MAC 层中的一种自适应传播延迟容忍的冲突避免协议^[14]。它包含可在传播延时较大的水声网中提高网络效率和吞吐量的改进握手机制。在改进的握手协议中,为了避免冲突而有意识让目的节点在接收到 RTS 消息后推迟 CTS 消息的发送,源节点在接收到 CTS 消息后也推迟发送数据帧,从而增加了延时。但是采用 MAC 层的管道技术(MAC Layer Pipeline,MLP),允许节点利用在等待传输信息时的空闲时间,即节点可以在等待响应的过程中为别的 MAC 服务数据单元发送数据。因此,MLP 通过减少时间浪费来提高网络效率。在该协议中,设定强制最大延时,来确保 RTS 帧的发送(TX RTS)、CTS 帧的接收(RX CTS)等管道“活动”彼此之间不发生冲突,解决了在水声网中由于非同步到达带来的传输冲突问题。

APCAP 提高和改进了传统 MAC 协议握手机制,目的节点和源节点有比较大的灵活性。它是针对水声网传播延迟长而特别设计的,有效避免了冲突和提高了网络效率。该协议在节点对网络拓扑知之甚少的网络中非常实用。然而 APCAP 的缺点也很明显:该协议有意延迟 CTS 帧和数据帧的传输,因此增加了源节点通过多跳到目的节点的端对端延迟。图 2 是 APCAP 协议的 MLP 示意图。

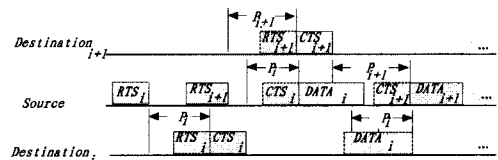


图 2 APCAP 协议的 MLP 示意图

4.3 结合空间复用的信道预约协议

在 MACA 协议中,源目的节点通过 RTS/CTS/DATA 3 次握手协商信道。MACA 采用包侦听机制,所有侦听到串音数据的相邻节点都转入静默状态,通过串音数据里面的传输持续时间确定自己的静默时间。当未收到 CTS 或者 CTS 数据有错时,则采用二进制指数回退算法确定退避时间^[15,16]。

源节点发送 RTS 后处于等待 CTS 状态,目的端发送 CTS 后等待 DATA 状态。在陆地无线通信中,这个等待时间很短,但是在水声通信中等待时间长。让节点在等待时间内空间复用,使得相邻节点处理一些自身的数据需求,可以大幅度提高系统吞吐量、提高信道利用率和降低系统时延。MACA-U^[17]协议正是利用这一思想的水声 MAC 协议。

MACA-U 给每个节点引入了 5 种状态: IDLE、CTD (CONTENTEND)、WFCTS、WFDATA、QUIET。如果节点有数据要发送,则从 IDLE 状态变迁到 CTD 状态。在竞争到信道后,源节点发送一个 RTS 控制包,同时节点状态变迁至 WFCTS,而目的节点发送 CTS 后状态变迁至 WFDATA。

在陆地无线通信中,一旦收到串音数据,节点就转入静默状态,该策略不会带来性能损失。在水声通信中,如果照搬陆地通信的策略,会导致网络节点静默时间过长,因此 MACA-U 修改了状态变迁规则。当节点在 WFCTS 状态或者 WFDATA 状态时,邻接点可以利用等待时间传输自己的 RTS 和 CTS 控制包,使得节点在一定程度并发利用有限信道,提高了系统性能。

在一个分布式网络中,每个节点都要扮演源节点和路由

器的角色。该协议改进了数据转发策略,它将流量分成两类:一类是需要中继的数据,一类是自己产生的数据,并对两类流量分别建立 FIFO 队列,将中继数据的传输优先级设置较高,在数据流量较大的应用下,数据丢弃带来的成本会更小,从而提高了端到端吞吐量。但是由于自身数据优先级较低,会对节点的缓存空间提出更高的要求。

MACA-MN^[18]则利用了多个邻接节点协同传输,以提高系统的吞吐率和降低传输时延。在多跳网络中,通过精心计算,该协议使用一次握手可以让多个邻接点同时传输数据队列,而且不需要时钟同步(图 3 示意了该协议的握手过程)。该协议的步骤是:首先广播 RTS(该 RTS 包含有接收者节点 ID、期望接收者节点传输数据的长度和该节点与源节点的传输延时),然后所有的接收者根据节点列表和对应的延时计算出本节点何时应答 RTS(距离源节点越近,响应 RTS 越快);源节点在指定时间段内收到了 CTS 包后根据节点间延时转发数据。如果遇到有节点不响应 RTS,为了不打乱原来的传输数据计划,对应的时间分配不变。若一个没有参与到传输的节点收到 xRTS 包,则通过解析数据来修改自己的静默时间。

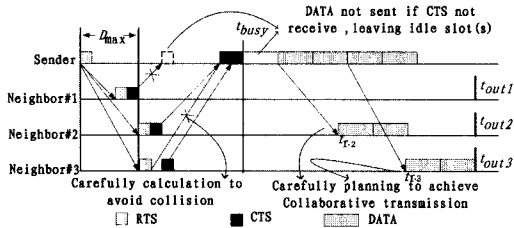


图 3 MACA-MN 3 次握手示意图

在该协议中,节点有两个独立的参数: T_{max} 和 M_{train} , 其中任何一个都能够触发 RTS 握手。前者是触发 RTS 的最大时间阈值,后者是触发 RTS 的数据长度阈值。由于在低负载情况下 T_{max} 才能够发挥作用,因此 T_{max} 的改变对性能的影响不大。在高负载网络里, M_{train} 的设置对于吞吐量十分关键,过大时节点主要是转发中继数据,同时对于节点的缓存要求比较高,降低了节点通信的公平性;过小则导致频繁地发送 RTS 包,降低了系统性能。为了取得更好的系统性能, M_{train} 必须综合考虑邻近节点的数量和节点的缓存空间。该协议通过多节点的协同传输取得了更高、更稳定的吞吐量,同时传输数据队列也提高了信道利用率并进一步减弱了多跳网络中隐藏终端的不利影响。

4.4 T-Lohi

T-Lohi^[19-21](Lohi 在夏威夷方言中的是“慢”的意思)是基于 tone 竞争机制的能量高效协议,它利用水声信道的特点来探测冲突并计数竞争者。该协议采用两个方法来节约能量:1)采用资源预留来消除数据冲突;2)采用在低功耗侦听下的唤醒接收器。每一帧由一个预约期(RP)和紧随其后的数据传输组成,每个 RP 包括直到一个节点成功预约到信道的一系列竞争循环(CRs)。如果在某一个 CR 中只有一个节点竞争,则该节点获得信道并在接下来的数据传输期内传输数据。如果在一个 CR 里面有多个竞争者,则节点采用退避算法选择后来的 CRs 再次竞争信道。根据竞争循环时间长度 CR_s 的不同,Lohi 协议提供了 3 种方式:Synchronized T-Lohi (ST-Lohi), Conservative Unsynchronized T-Lohi(cUT-Lohi)

和 Aggressive UT-Lohi(aUT-Lohi)。

ST-Lohi 将所有通信(包括竞争和数据传输)都同步在时隙里面,时隙长度为竞争周期 $CR_s = T_{max} + T_{tone}$ 。其中 T_{max} 是最大单向传播时间, T_{tone} 是 tone 探测时间,竞争信道的 tone 都在时隙起点送出。因此该方法能够提供无冲突数据传输,但是要求具有精确的时钟同步。针对该问题,cUT-Lohi 则认为只要探测到信道不忙,就可以随时开始竞争。为了防止最坏的结果出现,cUT-Lohi 采用的竞争周期 $CR_{cUT} = 2T_{max} + 2T_{tone}$ 是 ST-Lohi 竞争周期的两倍。虽然 cUT-Lohi 获得和 ST-Lohi 一样的探测效果,且避免了同步的复杂性,但是在冲突概率很小的低负载情况下,为避免冲突的双倍竞争周期就浪费很多时间。为了降低系统时延,aUT-Lohi 遵从 cUT-Lohi,但是将它的 CR 持续时间减少到 $CR_{aUT} = T_{max} + T_{tone}$,当遇到冲突后则采用指数退避算法,这样在流量较小的场景下可取得更好的性能。

同基于 RTS/CTS 的协议相比,T-Lohi 协议是一个具有创新性的、资源预留的竞争 MAC 协议,tone 唤醒接收器工作在极低功耗下,为该协议节约了大量能量。同时它在大部分场景下都有较好的性能,因而具有应用场景的普适性。但是 ST-Lohi 情况里存在源-目的节点失听(bidirectional deafness),虽然发生的概率很小,但是也会导致数据冲突;在 cUT-Lohi 里由于竞争节点只侦听了 T_{max} 而导致 tone-data 冲突和 data-data 冲突。

5 基于调度的协议

调度协议的基本原理是:采用某种算法将时隙/频率/正交码分配给指定节点,使得每个节点无冲突地访问信道,实现通信。信道分配既可以静态分配,也可以动态分配,因此调度协议是一种无冲突协议。当前基于调度的协议主要是以 TDMA 为主,亦可采用 FDMA 和 CDMA。由于水声信道的可用频带很窄,使得 FDMA 难以使用,而 CDMA 因其计算复杂度较高,因此应用较少。

5.1 动态信道分配的调度协议

在数据需要广播的应用场景下,源节点发出 RTS 包后,所有的目的节点都需响应 CTS,从而导致网络中的应答风暴(reply storm),例如上述的 MACA-MN 传输协议的 RTS/CTS 握手过程。针对该类问题,Diba Mirza 等提出了基于时隙的广播 MAC 协议——TB-MAC^[22]。在广播场景中,为解决应答风暴,该协议采用 NCTS(not clear to send)和 NACK(negative acknowledge)机制,即当节点接收正常就不用回应,当节点不愿意接收数据,就回送 NCTS,节点接收错误就回送 NACK,因此在一个错误概率较小的网络中大大降低了节点响应消息的规模。同时,该协议将 NCTS 和 NACK 报文修改为 tone,节点不需要仔细侦听以节省功率。为了能够明确区分 tone 的含义,亦即区分 tone 是表示 NCTS 还是 NACK,该协议引进时隙机制,NCTS 和 NACK 只能在特定的时隙里面传输。

该协议考虑了两种机制:1) TB-MAC-NR 就是有数据就随机选择一个开始时隙发送,随后在 NACK 槽侦听是否有 tone 来判断是否有冲突。该方法类似于 slotted-Aloha,只是将应用变为广播场景。在负载较轻的情况下,随机选择时隙发送数据冲突概率也会很小。2) TB-MAC:将时间轴划分为

等长的时隙,每一时隙只能传输指定类型的数据。当发送节点有数据传输时,就选择时隙发送 RTS,在接下来的时隙等待 NCTS。如果未收到 NCTS,则发送数据。为了检验数据是否被目的节点正确接收,在接下来的时隙侦听是否有 NACK 消息。如果没有,则表明数据被成功传输。该协议在广播应用中减少了大量回应包,从而节约了节点能量。因为只有未正确接收的节点才回送消息且消息为 tone,所以源节点无法判断目的节点是正确接收还是未收到 RTS。该协议适用于信道噪声较小且密集部署的场景。同时该协议采用时隙机制,因此需要时钟同步机制的支持。

Xie Peng 等提出的 R-MAC^[23] (reservation-based MAC) 是一种针对节能和公平的 RST/CTS 握手协议,其基本思想是节点周期性地唤醒/静默。当一个节点发送数据给另一节点时,发送方在接收方预约时隙,在预约好的时隙内发送数据。时隙预约基于延迟测量和距离计算。

R-MAC 有 3 个阶段:时延检测、周期公告和定期操作阶段。前两个阶段用于邻里节点的同步,第 3 个阶段用于节点的侦听和静默操作。该协议能够随着网络负载的变化而自动调整其分配方式。网络节点少时,采用随机竞争方式来预约数据的发送;网络节点多时,采用时隙分配方式来预约数据的发送,降低了能耗和减少了延迟。在 R-MAC 里,为了降低空闲状态和串音所造成的能量消耗,每个节点周期性地处于侦听模式和睡眠模式。

该协议采用时分复用的方式来占用信道,避免了数据冲突。同时节点周期性地唤醒和静默,使得每个节点都有机会获得信道,增加了网络的公平性;数据传输采用发送节点接收节点预约,非集中地调度和同步整个网络,增强了系统的健壮性。但是每个节点要保存相邻节点的调度,使得在调度完成后新节点加入较为困难,网络动态性降低,同时频繁的邻居发现降低了能效。

5.2 静态信道分配的调度协议

Ma Yutao 等提出的 C-MAC^[24] (cellular MAC) 是基于 TDMA 的 MAC 协议。它根据物理位置将水声网划分为许多六边形蜂窝单元,每个单元和邻接它的 6 个单元组成一个群。选取一个节点作为参考点,参考点广播包含自己位置的时隙确定帧,其他节点从接收到的时隙确定帧中提取参考点位置,并通过与汇点的相对位置决定自己的时隙。通过这种方式,所有节点的时隙很快就会定下来,一个群中每个节点就在预定的时隙里收发数据。

为了避免冲突,协议必须确保相同时隙的节点不能影响同一节点。图 4 中的虚线表示两个具有相同时隙节点之间的最短距离,这个最短距离为六边形边长的 $\sqrt{7}$ 倍。为了确保无冲突的可靠通讯,最短距离必须大于 $2R$ (R 表示通讯范围的大小),因此六边形的边长必须大于 $\frac{2\sqrt{7}}{7}R$ 。为了确保网络的连通性,同一个单元中可以有多节点。在这种情况下,节点只能共享该单元时隙轮流传输信息包。

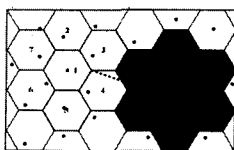


图 4 C-MAC 网络模型图

C-MAC 将信道划分为不同时隙,使得节点间无竞争地使用信道避免冲突,达到节能的目的;固定分配时隙,极大地保证了节点通信的公平性。同时每个时隙分为传输段和保护段,有效地抑制了时钟漂移和同步时钟的不精准。但是该协议在系统初始就要给每个节点确定数据操作时隙,降低了网络动态性;按照六边形将网络划分成蜂窝单元,要求网络节点物理位置分布较为均匀,这些都极大地限制了网络普适性。

对于数据收集应用的水声传感网来说,大部分网络节点都是为了周期性地收集感兴趣的数据。ST-MAC^[25,26] 将网络干扰分为 3 类:1)两个链路的目的节点相同;2)两个链路中节点既为发送节点又为接收节点;3)邻接点相互干扰。假定网络拓扑和负载已知的前提下,路由拓扑 $G(V, E)$, 其中 V 为传感节点, E 为传输链路、链路干扰关系和链路传输延迟。该协议将网络的冲突关系建模为时空冲突图 ST-CG (Spatial Temporal-Conflict Graph), 改图为一个有向图 $G'(V', E')$, 这里 V' 为 E, E' 为链路干扰关系。并将链路之间的传输时间差作为 E' 的权值,图 5 为通信冲突示意图。这样,各个链路的时隙分配就转换为有限制的图着色问题。ST-MAC 能够应用在任意路由结构,例如在 Mesh 网络中。同时该方法也可以扩展在基于频分复用协议的频带分配。

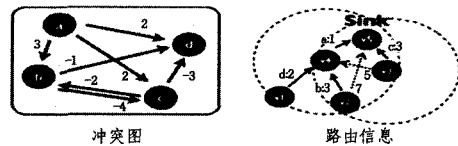


图 5 ST-MAC 的链路拓扑与冲突图

从该机制可以看出,小的时隙能够降低尺寸和提高信道利用率。由于链路之间的时间间隔,在流量较大的应用中,小时隙会导致吞吐量降低,因此需要根据流量类型设置时隙尺寸。同时,该协议是工作在网络节点固定、网络拓扑固定的情况下,因此对于网络的移动性支持很差。

6 水声传感网 MAC 协议比较

表 1 中的可扩展性是指网络拓扑扩展性,主要指的是网络节点的动态增删性。信道利用和吞吐量是指在低负载应用下的网络性能。普适性指的是该协议适应应用场景的指标。由于 UWASN 是一个相对很新的研究领域,应用场景广阔,因此 UWASN MAC 协议也是各具特色。正所谓一利必生一弊,上面介绍的协议也或多或少地存在缺点。因此在工程实施时必须根据应用特点选择特定的 MAC 协议。

从表 1 可以看出,基于调度的协议在系统运转初期就需要将资源分配好,新进节点会给系统拓扑带来扰动,引起资源的二次分配,因此该类协议的可扩展性能相对较差。而基于竞争的协议是在需要使用资源时才申请资源,新进节点只要等待当前传输完成就可以竞争资源,对拓扑动态变化的容忍性较好。在基于竞争的协议中,利用保护时间的冲突避免协议 s-FAMA 和 ACPD 虽然取得不错的能效指标,但是利用时分原理使得信道利用率降低,数据发送延迟时间加长;结合空间复用的信道预约协议 MACA-U 和 MACA-MN 充分利用了慢速传播和网络拓扑特性,使得网络中不同区域的节点同时传输数据,提高了系统信道利用率和吞吐量。

表1 MAC协议性能比较

	能量 有效性	可扩展 性	信道 利用	延迟 特性	吞吐量	同步 要求	普适性	并发
s-FAMA	较好	较好	差	差	差	需要	较好	/
ACPD	较好	较好	较差	一般	一般	不需要	差	/
PCAP	/	/	一般	差	较好	需要	一般	是
ADPCAP	一般	/	一般	差	较差	不需要	一般	是
MACA-U	较好	一般	较好	一般	一般	不需要	较好	是
MACA-MN	较好	较好	较好	较好	差	不需要	差	是
T-Lohi	好	较好	较好	一般	较好	不需要	较好	否
TB-MAC	较好	较好	较好	一般	一般	需要	差	否
ST-MAC	好	差	一般	差	一般	需要	一般	是
R-MAC	一般	差	/	一般	一般	不需要	较好	否
C-MAC	较好	差	一般	差	较差	需要	较好	否

结束语 通过竞争动态分配信道,基于竞争的MAC协议较好地克服了网络节点变化带来的问题,通常具有较好的可扩展性,在低负载应用中具有良好的吞吐性能,但是无法避免冲突重传问题,从而带来了一定程度的能量浪费。在冲突避免协议中,为解决冲突而在发送之间加入保护时间,通常保护时间与网络最大传播时间成正比。低速传播下的保护时间过长,使得该协议的效率非常低。在MACA协议中,采用了RTS/CTS/DATA信道预约机制来避免接收节点处的冲突,但在整个数据传输过程中约67%的时间用于控制指令的传输,增加了网络延迟,降低了数据吞吐量。基于调度的TDMA类MAC协议虽然没有冲突重传,节点在空闲状态能够转入睡眠状态,达到了节能的目的,但是TDMA类协议需要全局或者局部时钟同步,而在水下通信获取总时钟同步比较困难,从而降低了协议的普适性。同时,由于各节点接入时隙固定,网络拓扑变化适应性差。在低负载情况下,空闲时隙增多,固定的时隙分配增大了传输延迟,吞吐量也大为降低。

研究者提出了多种面向特定应用的MAC协议设计策略^[27-32]。通过研究与分析当前提出的各种应用于水声网络的MAC协议,我们认为,不同的应用要求不同的网络性能侧重点,因此不存在一个适用所有水声通信应用的通用MAC协议,也没有一个在各个方面都强于其他协议的协议。协议性能的指标本身就存在一定的矛盾,比如延迟性能和能量有效性,因此一个好的MAC协议是相对于具体应用的。但是能量有效性是各个协议最为关注的指标,它仍然是今后研究的重点课题。在现有研究的基础上,我们对UWASN MAC协议将来的研究方向和发展趋势做出如下展望。

1) 跨层优化设计。按照分层的观念设计通信协议,虽然可以让MAC层只需要关注上下层的接口而不需要关注其它层协议的变化,但是分层实现不利于能量、内存和CPU等资源的高效利用,尤其是在UWASN中资源限制较多的情景。因此将物理层、MAC层和网络层设计相结合,融合具体应用的网络拓扑特点,一体化综合设计网络协议,实现对网络节点的高效控制,降低系统开销,从而取得更好的网络性能。目前跨层设计在陆地传感网研究中已经成为热点^[33,34]。如何将陆地通信的跨层设计思想应用在水声传感通信中,将是未来提高能量有效性的重要手段。

2) 应用MIMO技术^[35-37]。MIMO作为新的物理层技术,能够实现空间多路复用,提高了链路容量和质量及MAC层的带宽和空间复用度,对设计MAC协议产生了重大的影响。如何在较窄的水声信道引入MIMO技术,充分利用MIMO的特性提高水声网络的信道利用率,将是另一研究热点。

3) 竞争与调度相结合的混合协议。基于竞争的MAC协

议在网络动态性和实时性方面比基于调度的协议要好,基于调度的协议其节能和吞吐量优于基于竞争的协议。设计二者结合的混合MAC协议,根据使用场景和流量类型自适应地采用协议类型来达到更好的网络性能。当然,混合式MAC协议存在计算复杂、成本较高的特点。随着硬件成本的降低和电路集成度的提高,设计计算复杂度较低的混合MAC协议,将是提高协议性能的重要手段。

参考文献

- [1] Cui J H, Kong J, Gerla M, et al. Challenges; Building Scalable and Distributed Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) for Aquatic Applications [R]. UbiNet-TR05-02. UCONN CSE, 2005
- [2] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks; research challenges[J]. Elsevier Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 257-279
- [3] Ramp S R, Rice J, Stacey M, et al. Planting the Seeds of an Observing System in the San Francisco Bay [C]// Proc of IEEE OCEANS'09. Bioloji; IEEE, 2009; 1-8
- [4] Estrin D. Wireless Sensor Networks Tutorial Part IV: Sensor Network Protocols [G]. Atlanta, Mobicom, 2002
- [5] 王毅, 高翔, 方世良, 等. Aloha-LPD: 一种用于水声通信网的MAC协议[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(1): 12-17
- [6] Syed A, Ye Wei, Krishnamachari B, et al. Understanding spatio-temporal uncertainty in medium access with aloha protocols[C]// Proc. of ACM WUWNet'07. Montreal, Canada; ACM, 2007; 41-46
- [7] 蹇强, 龚正虎, 朱培栋, 等. 无线传感器网络MAC协议研究进展[J]. 软件学报, 2008, 1(19): 389-403
- [8] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291
- [9] Fullmer C L, Garcia-Luna-Aceves J J. Floor acquisition multiple access(FAMA) for packet-radio networks[C]// Proc of ACM SIGCOMM'1995. Cambridge; ACM, 1995; 262-273
- [10] Chirdchoo N, Soh W S, Chua K C. Aloha-based MAC Protocols with Collision Avoidance for Underwater Acoustic Networks [C]// Proc of IEEE INFOCOM'07. Anchorage; IEEE, 2007; 2271-2275
- [11] Molins M, Stojanovic M. Slotted FAMA: A MAC protocol for underwater acoustic networks[C]// Proc of IEEE OCEANS06 - Asia Pacific. Singapore; IEEE, 2006; 1-7
- [12] Peleato B, Stojanovic M. A MAC Protocol for Ad-hoc Underwater Acoustic Sensor Networks[C]// Proc of ACM WUWNet'06. Los Angeles; ACM, 2006; 113-115
- [13] Guo X, Frater M R, Ryan M J. A Propagation-delay-tolerant Collision Avoidance Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks[C]// Proc of IEEE OCEANS'06 - Asia Pacific. Singapore; IEEE, 2006; 1-6
- [14] Guo Xiao-xing, Frate M R. Design of a Propagation-Delay-Tolerant MAC Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34(2): 170-180
- [15] Karn P. MACA- A new channel access method for packet radio [C]// Proc of ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference. 1990; 134-140
- [16] Bharghavan V, Demers A, Shenkar S, et al. MACAW-A Media Access Protocol for Wireless LANs [C]// Proc of ACM SIGCOMM'94. London; ACM, 1994; 212-225

(下转第17页)

- USA; ACM, 2006; 277-286
- [24] Xu J, Wang W, Pei J, et al. Utility-based anonymization using local recoding [C]// Proceedings of SIGKDD 2006. Philadelphia, PA, USA; ACM, 2006; 785-790
- [25] Wang K, Fung B C M, Yu P S. Handicapping attacker's confidence; an alternative to k -anonymization [J]. Knowl. Inf. Syst., 2007, 11(3); 345-368
- [26] Meyerson A, Williams R. On the complexity of optimal k -anonymity [C]// Proceedings of PODS 2004. ACM, 2004; 223-228
- [27] Aggarwal C C. On k -anonymity and the curse of dimensionality [C]// Proceedings of the 31st International Conference on Very Large Data Bases. Trondheim, Norway: VLDB Endowment, 2005; 901-909
- [28] Aggarwal G, Feder T, Kenthapadi K, et al. Achieving anonymity via clustering [C]// Proc. ACM SIGACT SIGMOD SIGART Symp Princ Database Syst. Illinois, USA; ACM, 2006; 153-162
- [29] Aggarwal G, Panigrahy R, Tom, et al. Achieving anonymity via clustering [J]. ACM Trans. Algorithms, 2010, 6(3); 1-19
- [30] 王智慧, 许俭, 汪卫, 等. 一种基于聚类的数据匿名方法[J]. 软件学报, 2010, 21(4); 680-693
- [31] 韩建民, 岑婷婷, 虞慧群. 数据表 k -匿名化的微聚集算法研究[J]. 电子学报, 2008, 36(10); 2023-2029
- [32] Yao C, Wang X S, Jajodia S. Checking for k -anonymity violation by views [C]// Proceedings of VLDB 2005. Trondheim, Norway; Association for Computing Machinery, 2005; 910-921
- [33] 宋金玲, 刘国华, 黄立明, 等. k -匿名方法中相关视图集和准标识符的求解算法[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(1); 77-88
- [34] Byun J, Sohn Y, Bertino E, et al. Secure anonymization for incremental datasets [C]// Proceedings of the 3rd VLDB Workshop on Secure Data Management. Seoul, Korea; Springer Verlag, 2006; 48-63
- [35] Xiao X, Tao Y. M -invariance: towards privacy preserving republication of dynamic datasets [C]// Proceedings of SIGMOD 2007. Beijing, China; ACM, 2007; 689-700
- [36] 宋金玲, 赵威, 刘欣, 等. k -匿名数据集的增量更新算法[J]. 计算机科学, 2010, 37(4); 146-150
- [37] Ghinita G, Tao Y, Kalnis P. On the anonymization of sparse high-dimensional data [C]// Proceedings of ICDE'08. Cancun, Mexico, 2008; 715-724
- [38] Abul O, Bonchi F, Nanni M. Never walk alone; Uncertainty for anonymity in moving objects databases [C]// Proceedings of ICDE'0. Cancun, Mexico, 2008; 376-385
- [39] 潘晓, 郝兴, 孟小峰. 基于位置服务中的连续查询隐私保护研究[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(1); 121-129

(上接第 10 页)

- [17] Ng H-H, Soh W-S, Motani M. MACA-U: A Media Access Protocol for Underwater Acoustic Networks [C]// Proc of IEEE GLOBECOM'08. New Orleans; IEEE, 2008; 1-5
- [18] Chirdchoo N, Soh W-S, Chua K C. MACA-MN: A MACA-based MAC Protocol for Underwater Acoustic Networks with Packet Train for Multiple Neighbors [C]// Proc of IEEE VTC'08. Spring Singapore; IEEE, 2008; 46-50
- [19] Syed A A, Ye Wei, Heidemann J. T-Lohi: A New Class of MAC Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks [C]// Proc of IEEE INFOCOM'08. Phoenix; IEEE, 2008; 231-235
- [20] Syed A, Ye Wei, Heidemann J. Comparison and Evaluation of the T-Lohi MAC for Underwater Acoustic Sensor Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(9); 1731-1743
- [21] Guerra F, Casari P, Zorzi M. World ocean simulation system (WOSS): a simulation tool for underwater networks with realistic propagation modeling [C]// Proc of ACM ENSS'09. California; ACM, 2009; 1-8
- [22] Mirza D, Lu Feng, Schurgers C. TB-MAC Efficient MAC-Layer Broadcast for Underwater Sensor Networks [C]// Proc of ISSNIP'09. Melbourne, Australian, 2009; 1-5
- [23] Xie Peng, Cui Jun-hong. R-MAC: An Energy-efficient MAC Protocol for Underwater Sensor Networks [C]// Proc of IEEE WSA'07. Chicago; ACM, 2007; 187-198
- [24] Ma Yu-tao, Guo Zhong-wen, Feng Yuan, et al. C-MAC: A TDMA-based MAC Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks [C]// Proc of IEEE NSWCTC'09. Wuhan; IEEE, 2009; 728-731
- [25] Hsu C-C, Lai K-F, Chou C-F, et al. ST-MAC: Spatial-Temporal MAC Scheduling for Underwater Sensor Networks [C]// Proc of IEEE INFOCOM'09. Rio de Janeiro; IEEE, 2009; 1827-1835
- [26] Syed A, Heidemann J. Time synchronization for high latency acoustic networks [C]// Proc of IEEE INFOCOM'06. Barcelona; IEEE, 2006
- [27] Kalofonos D N, Stojanovic M, Proakis J G. Performance of adaptive MC-CDMA detectors in rapidly fading Rayleigh channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(2); 229-239
- [28] Stojanovic M. Low complexity OFDM detector for underwater acoustic channels [C]// Proc of IEEE OCEANS'06. Boston; IEEE, 2006; 1-6
- [29] Hayajneh M, Khalil I, Gadallah Y. An OFDMA-based MAC protocol for under water acoustic wireless sensor networks [C]// Proc of ACM IWCMC'09. New York; ACM, 2009; 810-814
- [30] Stojanovic M, Freitag L. Multichannel Detection for Wideband Underwater Acoustic CDMA Communications [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(3); 685-695
- [31] Proakis J G, Manolakis D K. Digital Signal Processing (4th Edition) [M]. NJ, USA; Prentice-Hall, 2006
- [32] Cui Shu-guang, Madan R, Goldsmith A, et al. Joint Routing, MAC, and Link Layer Optimization in Sensor Networks with Energy Constraints [C]// Proc of IEEE ICC'05. New Jersey; IEEE, 2005; 725-729
- [33] Tay Y C, Jamieson K, Balakrishnan H. Collision-Minimizing CSMA and Its Applications to Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(6); 1048-1057
- [34] Rugin R, Mazzini G. A Simple and Efficient MAC-Routing Integrated Algorithm for Sensor Network [C]// Proc of IEEE Communications'04. New Jersey; IEEE, 2004; 3499-3503
- [35] Skalli H, Ghosh S, Das S K, et al. Channel Assignment Strategies for Multiradio Wireless Mesh Networks; Issues and Solutions [J]. IEEE Communication Magazine, 2007, 45(11); 86-95
- [36] Ma Jing, Zhang Ying-jun, Su Xin, et al. On capacity of wireless ad hoc networks with MIMO MMSE receivers [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12); 5493-5503
- [37] Gong M X, Midkiff S F, Mao S. On-demand Routing and Channel Assignment in Multi-channel Mobile ad hoc Networks [J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(1); 63-78