

一种并行传输的水声 Ad hoc 网络多址接入(PTMA)协议

高明生, 陆佺人, 姜卫东

(东南大学无线电工程系, 江苏南京 210096)

摘要: 由于存在“隐藏终端”和“暴露终端”的问题, 无线 Ad hoc 网络的应用受到极大的限制. 进一步, 由于水声信道的特点, 例如有用的频率带宽很窄, 强时变、多途和长传播时延, 使得设计水声 Ad hoc 网络具有自身特点和难度. 本文中, 我们为此提出了一种新的多址接入控制(MAC)协议, 即并行传输多址接入(PTMA)协议. 该协议基于如下思想: 为消除冲突而进行多信道预约, 这样能在多个信道上并行地传输数据; 为缩短等待 clear-to-send(CTS)的时间, 当 request-to-send(RTS)刚发送完就立即发送分组数据, 而不必收到 CTS 后再发. 通过使用 OPNET Modeler/Radio 仿真器得到的仿真结果显示: PTMA 协议能取得较之于适合无线 Ad hoc 网络的多址接入协议更高的吞吐性能和较低的端到端传播时延.

关键词: Ad hoc 网络; 水声信道; 多址接入控制; 并行传输

中图分类号: TN914.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)07-1271-04

A Parallel Transmission Multiple Access (PTMA) Protocol for Underwater Acoustic Ad hoc Networks

GAO Ming-sheng, LU Ji-ren, JIANG Wei-dong, ZHANG Hong-tao

(Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Due to the presence of the “hidden terminal” and the “exposed terminal” problems, the applications for radio Ad hoc networks have greatly been restricted. Furthermore, with the characteristics of the underwater acoustic channel, such as low available bandwidth, highly varying multipath, and large propagation delays, the designing of underwater acoustic Ad hoc networks is a more challenging task. In this paper, we propose a new multiple access control (MAC) protocol for underwater acoustic Ad hoc networks, namely, the parallel transmission multiple access (PTMA) protocol. This protocol is based on the following ideas: to resolve collision, the reservation for multiple channels is made, thus data packets may parallelly be transmitted on multiple channels; to reduce the time for waiting for the clear-to-send (CTS) packets, we begin to transmit data packets as soon as the request-to-send (RTS) packets have been sent without the receipt of the CTS packets. Simulation results, which were obtained by using the OPNET Modeler/Radio, show that the proposed PTMA protocol can provide higher throughput performance and lower end-to-end propagation delay than those that are suitable for radio Ad hoc networks within the underwater acoustic environment.

Key words: Ad hoc networks; underwater acoustic channel; multiple access control; parallel transmission

1 引言

无线 Ad hoc 网络是在分组无线网络基础上发展起来的. 其特点为: (1) 移动节点为对等实体, 通过无线链路连接; (2) 网络中没有固定基础设施 (例如基站) 支撑, 不能进行集中式管理; (3) 网络中的节点同时兼有主机和路由器功能, 往往需要通过中间节点转发来实现端到端的通信. 无线 Ad hoc 网络又是一种多跳的网络, 根据信道的动态变化以及分布式控制的特点, 设计适用于 Ad hoc 网络的多址接入控制(MAC)协议, 将直接关系到整个 Ad hoc 网络的性能.

传统的 MAC 协议^[1~7], 一方面并没有完全解决严重制约

无线 Ad hoc 网络性能的隐藏终端、暴露终端和侵入终端^[3]等问题; 另一方面, 无线 Ad hoc 网络的 MAC 协议不一定适合水声 Ad hoc 网络, 其原因在于: 相对无线信道而言, 水声信道传输条件非常恶劣, 特别是浅海水声信道, 是一个随机时空频变、强多径干扰、强噪声环境、可用带宽非常有限的信道. 因此, 要设计出适合水声信道特点的水声 Ad hoc 网络的 MAC 协议, 关键必须解决两个问题: (1) 尽可能的消除分组冲突; (2) 减少预约次数.

本文基于如下的思想: 一方面, 考虑到浅海水声信道, 具有传播时延长、强多径干扰、相对多普勒较高, 而且能使用的频带宽度非常有限等特点; 另一方面, 鉴于扩频通信已成为有

效解决这些问题的重要手段^[8-10],利用多个扩频码进行多信道的预约,为在多个信道上并行的传输数据提供了可能;同时,充分利用水声信道传播时延长的特点,为缩短等待 CTS 的时间,通过建立每个节点的所有邻节点(指与该节点相距单跳的节点)的信道使用状况表,当发送方在控制信道上传输完 RTS 后,延时 γ 秒(接收方收到 RTS 后传输 CTS 的时间),就在 RTS 中为接收方指定的业务信道上向接收方发送分组数据而不必收到 CTS 后再发,大大增加了一次成功传输的概率,有效的提高了网络的吞吐性能;提出了一种在预约控制信道的并行传输的水声网络多址接入(PIMA)协议.通过 OPNET modeler/Radio 网络仿真,结果表明:在水声环境下,该协议能取得较之于其它适合无线 Ad hoc 网络的 MAC 协议更好的吞吐性能和较低的分组传播时延.

2 协议模型

本文首先作如下假设:1)每个节点均使用相同固定的发射功率来发送;2)不考虑信道的捕获效应;3)不考虑侵入终端问题;4)分组传输出错当且仅当分组发生了冲突;5)对任何节点,数据的处理时间和收/发信道转换时间忽略不计;6)RTS 中包含 RTS 本身开始传输的时刻及将要传输的分组数据的长度信息,CTS 中包含 CTS 本身开始传输的时刻以及根据接收到的 RTS 中包含的信息而计算出的接收方接收分组数据实际所需时间长度信息;7)分组数据的传输时间、RTS/CTS 的传输时间以及最大的端到端传播时延分别为 δ 、 γ 和 τ ;8)每个节点产生分组数据均服从参数为 λ 的 Poisson 分布.

在系统初始化时,首先为每一节点分配一个唯一的标识号 ID,其取值范围为 $\Theta = \{1, 2, \dots, N\}$, N 为网络中的结点总数.同时假定系统共有 N_c 个子信道 $CH_j, j = 1, 2, \dots, N_c$,其中 CH_1 为公共控制信道,其余为业务信道.为每一节点建立一张该节点的所有邻节点的信道使用状态表.例如,表 1 记录了节点 i 的所有邻节点的信道使用信息

表 1 节点 i 的邻节点信道使用信息

邻节点 标识号	节点 属性	业务 信道	控制信道 起始时间	控制信道 定时器	业务信道 起始时间	业务信 道定时器
ID_i^1	Null	Null	Null	Null	Null	Null
ID_i^2	Sender	ID_i^1
...
ID_i^k	Receiver	CH_i^k

其中 $ID_i^m (m = 1, 2, \dots, k)$ 为第 i 个节点有 k 个邻节点中第 m 个邻节点的标识号;节点属性栏中的“Null”表示当前该邻节点既不发送也不接收,“Sender”表示该邻节点当前处于发送状态,“Receiver”表示该邻节点当前处于接收状态;业务信道栏表示该邻节点使用的某个具体业务信道;控制信道起始时间和控制信道定时器记录了节点 i 收到标识号为 ID_i^m 的邻节点的 RTS 或 CTS 后控制信道何时处于忙以及处于忙的时间;业务信道起始时间和业务信道定时器记录了节点 i 收到标识号为 ID_i^m 的邻节点的 RTS 或 CTS 后指定的业务信道何时处于忙以及处于忙的时间.

2.1 业务信道使用规则

(1)若首次使用业务信道,对照系统中所有的业务信道并依次检查表 1,若存在未被使用过的业务信道,则将其中之一作为指定的业务信道,其它未被使用过的以及表 1 中已处于空闲的业务信道作为自己另外可用的业务信道.

(2)若首次使用业务信道,对照系统中所有的业务信道并依次检查表 1,若不存在未被使用过的业务信道但表 1 中至少有一个业务信道空闲,则将其中之一作为指定的业务信道(此时亦称为信道抢占),表 1 中其它处于空闲的业务信道作为自己另外可用的业务信道.

(3)若上一次使用的业务信道未被抢占,则继续使用上一次的业务信道.

(4)若上一次使用的业务信道已被抢占,则按(2)进行信道抢占.

(5)若没有业务信道空闲,则实行二进制指数退避(BEB).

2.2 发送方发送 RTS 的准则

发送方对照系统中所有业务信道并检查自己的表 1:若任何一个邻节点既不在收也不在发,则在控制信道上向接收方发送 RTS,并在 RTS 中附带依据业务信道的使用规则选择的一个业务信道(作为随后发送数据的信道)以及其它可用业务信道的信息;否则不发送 RTS.

2.3 接收方响应 CTS 的准则

收到自己的 RTS 后,接收方对照系统中所有的业务信道检查自己的表 1:(1)若控制信道不空闲,则不响应 CTS;(2)若有自己的邻节点正在业务信道上接收数据,根据邻节点发送的 CTS 捎带的 CTS 的发送时刻与接收到 CTS 的时刻进行对比,计算出发送 CTS 的邻节点到自己的传播时间,再依据 CTS 中捎带的邻节点的数据接收所需时间计算出当前时刻邻节点完成数据接收所需的剩余时间,最后与自己完成数据接收所需时间(计算方法同上)进行比较.如果自己完成数据接收所需的时间小于或等于邻节点完成数据接收所需的最短剩余时间(可能有几个正在接收数据的邻节点),则向发送方响应 CTS,并在 CTS 中附带完成数据接收所需的总时间信息;(3)若任何一个邻节点既不在收也不在发,则向发送方响应 CTS,并在 CTS 中附带完成数据接收所需的总时间信息;4)其它都不响应 CTS.

需要指出的是:若某暴露终端或隐藏终端正在某个约定的业务信道上收(或发)分组数据而无法监听控制信道,会导致不能及时的更新自己的表 1(也即表的信息不准确).但是,当在该业务信道上收(或发)分组数据完成后,该业务信道应该仍然空闲.若该节点又有分组数据需要传输,根据业务信道的使用规则,仍然将原来使用的业务信道作为自己的首选业务信道.倘若该业务信道被自己的邻节点所抢占,那么该节点应该能在控制信道上监听到 RTS 或 CTS 消息,相应的更新自己的表 1,此时会选择其它可用的业务信道(假设存在),或进行退避(假设不存在).

2.4 协议流程

PIMA 协议流程图 1、图 2、图 3 和图 4.

图 1 为发送方(节点 i)在有分组数据到达的情况下,依据业务信道的使用规则和发送方发送 RTS 的准则,在控制信道上向接收方(节点 j)发送 RTS,并选取对节点 i 而言可用的业务信道中的一个用作后面的分组数据的传输,同时在 RTS 中附带了这个指定的业务信道以及属于节点 i 的所有其它可用的业务信道,然后延时 γ 秒(CTS 的传输时间,以便让节点 j 收到 RTS 后响应 CTS,再转入节点 i 指定的业务信道)在指定的业务信道上发送分组数据,并等待节点 j 响应的 CTS. 节点 j 正确收到属于自己的 RTS 后,根据接收方响应 CTS 的准则和业务信道的使用规则,在节点 i 指定的业务信道上不能接收数据,因而重新选择一个双方都可用的业务信道附着在随后在控制信道上给节点 i 响应的 CTS 中,然后转入双方重新约定的业务信道准备接收数据. 节点 i 收到来自节点 j 的 CTS 后,利用节点 j 指定的业务信道传输数据,节点 j 能成功的接收数据. 这是因为根据节点 i 发送 RTS 和节点 j 响应 CTS 准则,任一节点对其所有邻节点信道的使用状况信息都是准确而全面的,因此当接收方给发送方响应 CTS 后,不可能存在另外一个邻节点发送 RTS 或响应 CTS 而后使用与节点 i 和节点 j 商定的相同业务信道,从而毁坏分组数据. 图中 t_{mw_sc} 和 t_{mw_sl} 分别为控制信道和业务信道的强制等待时间; $1/\lambda$ 为分组数据到达的时间间隔.

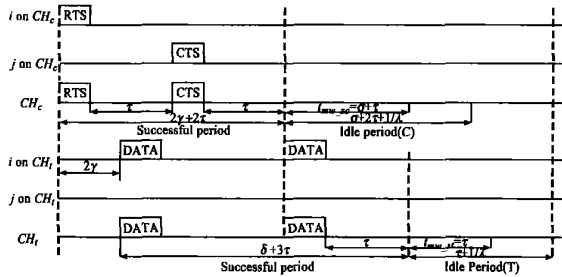


图 1 在由 CTS 中指定的业务信道上成功传输的 PTMA 协议流程

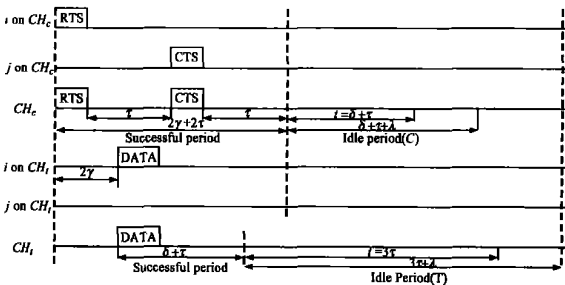


图 2 在由 RTS 中指定的业务信道上成功传输的 PTMA 协议流程

与在由 CTS 中指定的业务信道上成功传输不同的是: 当节点 i 在 RTS 中指定传输的业务信道正好也是节点 j 可用的业务信道,根据接收方响应 CTS 的准则,在给节点 i 响应 CTS 后就到 RTS 中指定的业务信道接收数据,此时不需在 CTS 中重新指定业务信道进行数据的重传. 图 2 为在由 RTS 中指定的业务信道上成功传输的 PTMA 协议流程.

图 3 表示因节点 j 没有空闲的业务信道,或者没有与节点 i 在 RTS 中指定的相同的空闲的业务信道,对节点 i 的 RTS 不作任何响应,同样导致传输失败的流程.

图 4 为节点 i 和 j 在进行传输过程中发生 RTS 冲突,导致传输失败,需要退避再进行重传的流程. 其中的 $Y \in [0, T]$ 为节点 j 滞后节点 i 发送 RTS 的时间,是一个随机变量,其均值为^[6]

$$\bar{Y} = \gamma + 2\tau - \frac{(1 - e^{-N\tau})}{\lambda} \quad (1)$$

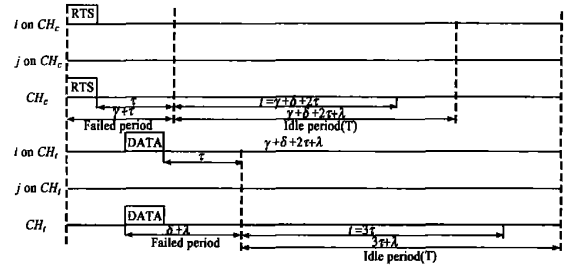


图 3 没有空闲业务信道的 PTMA 协议流程

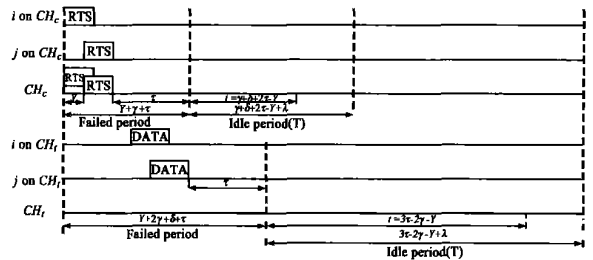


图 4 RTS 发生冲突的 PTMA 协议流程

3 仿真模型

吞吐量和分组的端到端传播时延是本文要考察的两个重要性能指标. 对于吞吐量,本文采用了类似于 F A Tobagi 等在文献[3]、C L Fullmer 等在文献[6]和 Z J Haas 等在文献[7]中的分析方法: 将信道上的传输周期看作是一个重复的过程,两个连续空闲期间(I)的间隔定义为一个忙期间(B),而一个忙期间可能是一个成功的数据传输期间(U),或是一个有冲突的期间,信道的吞吐量定义为 $S = \frac{U}{B+I}$ (2)

分组端到端时延定义为自分组的产生到成功到达目的地的平均时间.

本文假设网络频率总带宽为 10kHz,网络内的节点数为 20 个,随机分布于 10km × 10km 的平面区域,节点间的最大通信距离为 5km. 分组数据包的长度为 200bit,控制块的长度为 80bit. 使用单信道系统时,信道的数据传输速率为 10kbps,相应的 δ 和 γ 分别为 0.0195s 和 0.0078s; 本文采用信道总数为 5 个,其中一个为控制信道,其余四个为业务信道,则子信道的数据传输速率为 2kbps,相应的 δ 和 γ 分别为 0.0977s 和 0.0390s.

为了有效的评估 PTMA 协议的性能,本文采用按需 Ad hoc 路由算法——DSR(Dynamic Source Routing),并采用了 OPNET Modeler/ Radio 网络仿真器对协议进行了仿真,并与目前水声网络主要采用的多址接入协议 MACA^[11,12] 进行比较. 每次仿真结果取 12 次随机仿真所得到的平均值.

4 仿真结果

图 5 是 PTMA 协议和 MACA 协议在多跳水声 Ad hoc 网络

下,对于不同的分组到达率而得到的吞吐性能的比较.

从图 5 可以看出,当分组到达速率 λ 大于 0.02 而小于 0.06 时,PTMA 协议能取得的吞吐量约为 2.21×10^{-4} ;MACA 协议的吞吐量只有 1.28×10^{-4} 左右,MACA 协议的吞吐性能明显低于 PTMA 协议.

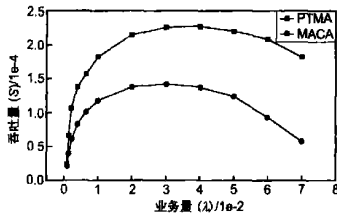


图 5 水声 Ad hoc 网络吞吐量随业务量的变化曲线

图 6 是 PTMA 和 MACA 协议在水声 Ad hoc 网络环境下由不同的分组到达率所得到的分组端到端平均时延,可以看出:一方面 PTMA 协议的平均时延低于 MACA 协议;另一方面随着业务量 λ 的增大,两种协议的平均时延反而减小,原因是 λ 增大,分组冲突增多,很多分组退避后仍然无法传输,反而导致平均时延下降(这里不考虑丢弃的分组).

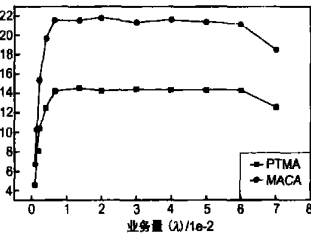


图 6 水声 Ad hoc 平均分组时延随业务量的变化曲线

5 结论

为降低分组传输冲突的概率,本文充分考虑到水声信道传播的长时延特性,提出了一种有效的水声 Ad hoc 网络的并行传输多址接入(PTMA)协议:首先,它通过为每一节点建立邻近节点的信道使用信息表,尽可能实时、动态地了解本节点通信范围内的信道利用状况.发送方在确认接收方空闲、控制信道和至少有一个业务信道也空闲时,向接收方发送 RTS,同时在 RTS 中指定接收方来接收分组数据使用的业务信道以及发送方当前所有可用的业务信道,然后延时 γ 秒(接收方发送 CTS 的时间)开始利用指定的业务信道发送分组数据,并等待接收方的响应.接收方在空闲条件下,很可能在收到 RTS 后并利用发送方在 RTS 中指定的业务信道随后成功地接收分组数据.这样做的优点是:一方面增大了一次传输成功的概率,另一方面也避免了使用传统多址接入协议中等待接收方响应 CTS 后再传输分组数据的方法,从而避免了因预约和来回传播时间过长而导致吞吐量急剧下降.

虽然与 MACA 协议一样,PTMA 协议本身也不具备对分组数据的纠错功能,但可以通过适当的 ARQ(自动重传请求)协议加以解决.尽管如此,通过 OPNET Modeler/Radio 的仿真仍然可以看出:在水声环境下,本文所提出的 PTMA 协议较之目前水声网络主要采用的 MACA 协议具有更优的吞吐性能和较低的端到端时延,具有重要的工程应用价值.

参考文献:

[1] N Abramson. The ALOHA system another alternative for computer communications[A]. In Proceedings of the Fall Joint Computer Conference

[C]. 1970. 2S1-85.

- [2] L Kleinrock, F A Tobagi. Packet switching in radio channels: Part I-carrier sense multiple access modes and their throughput delay characteristics[J]. IEEE Trans Commun., 1975, 23(12): 1400-1416.
- [3] F A Tobagi, L Kleinrock. Packet switching in radio channels: part II-the hidden terminal problem in carrier sense multiple access modes and the busy tone solution[J]. IEEE Trans Commun., 1975, 23(11): 1417-1433.
- [4] P Kam. MACA-A new channel access method for packet radio[A]. In ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conf[C]. 1990. 134-140.
- [5] V Bharghavan, A Demers, S Shenker, L Zhang. MACAW: A media access protocol for wireless LAN's[A]. In Proc ACM SIGCOMM'94[C]. 1994. 212-225.
- [6] C L Fullmer, J J Garcia-Lunar Aceves. Floor acquisition multiple access (FAMA) for packet radio networks[A]. In Proc. ACM SIGCOMM'95[C]. 1995. 262-273.
- [7] Z J Haas, J Deng. Dual busy tone multiple access (DBTMA)-A multiple access control scheme for Ad Hoc networks[J]. IEEE Trans Commun., 2002, 50(6): 975-985.
- [8] E S Sousa, J A Silvester. Spreading code protocols for distributed spread spectrum packet radio networks[J]. IEEE Trans Commun., 1988. 272-281.
- [9] R Kohno, R Meidan, L B Milstein. Spread spectrum access methods for wireless communications[J]. IEEE Commun Mag., 1995. 33-36.
- [10] M Stojanovic, J G Proakis, J A Rice, M D Green. Spread spectrum methods for underwater acoustic communications[A]. Proc IEEE OCEANS'98 Conf[C]. 1998, 2(9): 650-654.
- [11] E M Sozer, M Stojanovic, J G Proakis. Underwater acoustic networks[J]. J Oceanic Eng., 2000, 25(1): 72-83.
- [12] J A Rice, R K Creber, C L Fletcher, et al. Seaweb Undersea Acoustic Nets[R]. Biennial Review 2001, SSC San Diego Technical Document TD 3117, 2001. 234-250.

作者简介:



高明生 男, 1967 年出生于江苏金坛, 东南大学博士生, 主要研究方向为通信协议和网络的设计. E-mail: msgao@seu.edu.cn.



陆洁人 男, 1938 年出生于江苏无锡, 东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为统计信息处理、非线性信号处理、盲信号处理和水声信号处理.