

不确定传播时延下的水声网络保护间隔设定

郑英燮, 张伟, 许维胜

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 水下声波的传播时延及波动远大于无线电波, 许多借鉴陆地无线电波通信网络原理设计的水声传感器网络协议未能充分考虑和利用水声传播及其时延变化特性。据此给出了时分多址协议中相继传输数据包的冲突模型, 分析了保护间隔与簇头节点和传感器节点距离之间的关系, 并给出了保护间隔的设置方法。理论分析和仿真表明, 提出的保护间隔设定方法改善了传统保护间隔设置偏向保守的缺点, 可有效提升水声传感器网络的性能和效率。

关键词: 水声传感器网络; 保护间隔; 媒介访问控制(MAC)协议; 时分多址复用(TDMA)协议; 传播时延

中图分类号: TN929.3

文献标志码: A

Underwater Acoustic Sensor Network's Guard Time Setting with Uncertain Propagation Delay Considerations

JONG Yongsop, ZHANG Wei, XU Weisheng

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Compared with terrestrial radio waves, the underwater acoustic wave propagation is pretty slow and varies more greatly. A lot of current medium access control (MAC) protocol designings for underwater acoustic sensor networks are borrowed from the mature terrestrial networks and have not deeply considered the underwater acoustic propagation characteristics. Such characteristics and proposes a collision model of two consecutive packets in continuous time allocation case in time division multiple access (TDMA) protocols were considered. Then the relationship of the guard time and the distance between the cluster head node and the sensor nodes was analyzed. And finally a guard time settings policy was suggested based on this relationship. Theoretical analysis and simulations show that this approach can improve the conservative traditional guard time settings and can effectively improve the performance and efficiency of

underwater acoustic sensor networks.

Key words: underwater acoustic sensor networks; guard time; medium access control (MAC) protocol; time division multiple access (TDMA) protocol; propagation delay

水声传感器网络(UWSN)在海洋生态环境监测、离岸勘探、灾难预防、辅助导航等领域应用广泛, 社会效益和潜在战略应用价值巨大。与陆地无线传感器网络显著不同的是, 水下节点采用水声通信方式, 水下声信道具有许多与无线电信道不同的特性^[1-3], 如传播时延长、信道带宽低、信道错误率更高, 此外, 水下声传播速度会随温度、盐度、深度等多个环境因素改变而改变^[4-5], 传统陆地无线传感器网络所采用的媒介访问控制协议(MAC)设计及参数在水下应用时效率偏低, 甚至不可用。因此, UWSN 中 MAC 协议的设计得到了人们普遍重视^[6-10]。

传统 MAC 协议主要可分为基于竞争的媒介访问和无竞争媒介访问两大类。基于竞争的 MAC 协议被广泛用于各种自组织网络, 它在传播时延远小于数据包周期时效率较高, 但这一点在 UWSN 中并不总成立, 因为水下声波传播速度通常非常小。无竞争 MAC 协议通常采用时分多址复用机制(TDMA), 它在网络负载较重时性能表现出色。当 UWSN 网络结构不是很复杂时, 在工程上倾向于优先使用 TDMA。除 TDMA 以外, 频分多址(FDMA)和码分多址(CDMA)也可以实现无竞争媒介访问, 但由于水声信道的频带资源严重受限, FDMA 和 CDMA 并不适合于 UWSN^[11-12]。

TDMA 协议理论上可有效避免数据包冲突, 比检测到冲突后再启动竞争重传的竞争型 MAC 更适合在传播时延很大的 UWSN 中应用。传统单时隙 TDMA 协议的主要问题在于, 为了保证不同距离的

收稿日期: 2016-12-15

基金项目: 同济大学中央高校基本科研业务费(0800219318)

第一作者: 郑英燮(1977—), 男, 博士生, 主要研究方向为水声传感器网络。E-mail: zhengyingxie@163.com

通讯作者: 张伟(1975—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为无线传感器网络。E-mail: zhang_wi@tongji.edu.cn

2 个节点在一个时隙内均能完成通信,时隙必须由最大的传播时延决定。时隙的长度是数据包传输时间和网络中最大传播时延之和,该问题影响了信道利用率等网络效率的提高。针对单时隙 TDMA 协议的信道利用率较低的缺点,研究者还提出了基于连续时间的接入分配 TDMA 协议^[13-14],该类协议使得簇头节点连续接收从各传感器节点发送来的数据包,可降低接收数据包之间的空闲时间,提高网络效率。但由于水声传播时延的不确定性,有可能在簇头节点处相邻数据包重叠到达时导致冲突。因此,应保证簇头节点处相继到达的相邻数据包间隔一段时间,这就是保护间隔,它定义为上一数据包结束和下一个数据包到达之间的时间差。在已有连续时间分配 TDMA 协议^[15-16]中,保护间隔一般只能按经验设为固定值或按最保守值设置。如果保护间隔设置偏大,这导致网络效率下降。如何合理设定保护间隔避免数据包冲突,同时提高网络效率在 UWSN 领域的 TDMA 类 MAC 协议设计中就很重要。本文在考虑水下声传播速度变化特性的基础上,提出一种相邻 2 个数据包之间保护间隔设定的方法,改进连续时间分配 TDMA 协议保护间隔设置偏向保守的缺点。

1 集中式网络的结构与工作模型

提出的保护间隔设定方法适用于集中式 UWSN 的典型结构模型如图 1 所示。

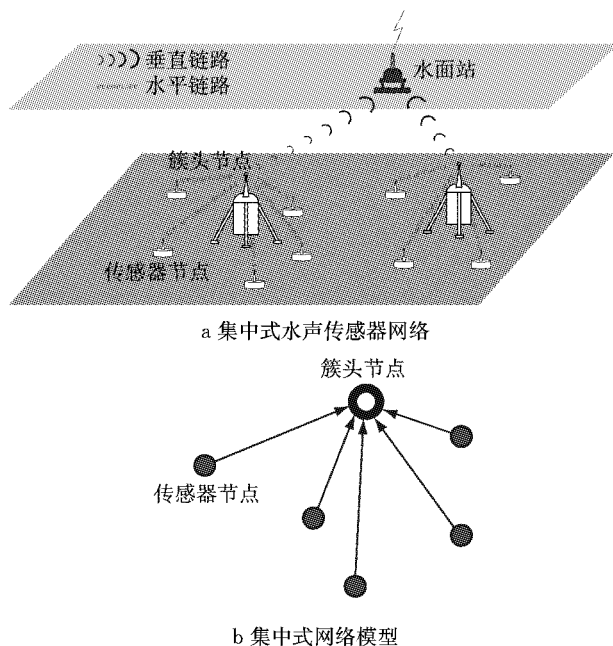


图 1 集中式网络的基本结构和网络模型

Fig. 1 Structure and network model of the centralized network

图 1a 中,一组传感器节点布置于水下,利用水声通信与簇头节点相互连接。水面站一方面利用水声通信跟各簇头节点通信,一方面利用无线电跟地面站或卫星通信,通过地面站和卫星接入到现有的陆地骨干网中。

簇头节点在初始化阶段通过交换数据包得到从自己到各传感器节点的传播距离信息。在连续时间分配 TDMA 协议中,簇头节点首先比较它与所有的传感器节点的距离,按从小到大的顺序排列,并且先使得最近的传感器节点优先发送数据包。

为表述方便,定义如下符号: T_{Syn} 为帧同步包传输时间; T_{data} 为数据包传输时间; i 为传感器节点标识,在基于 TDMA 的周期化数据采集,中, i 同时也是一个周期中数据包的序号; $T(i)$ 为从传感器节点 i 到簇头节点的传播时间; T_{min} 为最近的传感器节点(传感器节点 1)到簇头节点的单程传播时间; T_g 为固定的保护间隔设置值,保护间隔定义为中心汇聚节点处相继到达的数据包之间的时间间隔; $T_g(i)$ 为网关节点在与传感器节点 i 通信时的保护间隔设置值; $T_{\text{defer}}(i)$ 为传感器节点 i 从接收帧同步包到开始发送数据包的等待时间; N 为传感器节点数; P_c 为数据包之间的冲突概率。

图 2 给出了连续时间分配下的一个传送周期示意。簇头节点首先发送帧同步包(Syn), $T_{\text{defer}}(i)$ 为传感器节点 i 接收 Syn 后自己的数据包发送延时,该值包含在 Syn 包。注意这里传感器节点 i 中“ i ”不仅仅是传感器节点的标识(ID),而且其大小表示与簇头节点距离升序排列的位置,因此在基于 TDMA 的一轮数据收集中,如果每个传感器节点都分配一次

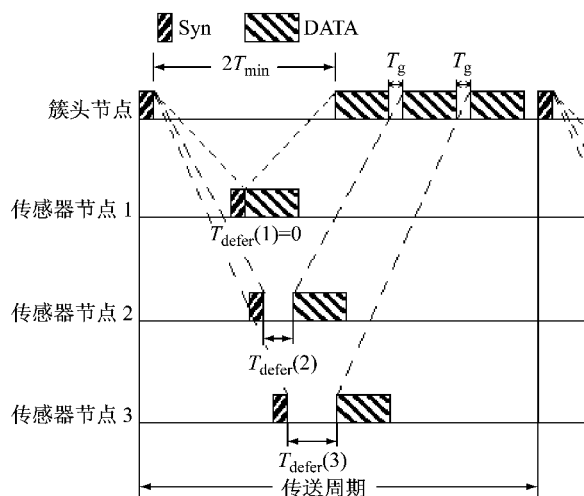


图 2 连续时间分配 TDMA 协议的一个传送周期示意

Fig. 2 A transmission period for continuous time allocation TDMA protocols

传输机会,则 i 同时也恰是数据包在当前数据采集轮次中的序号。簇头节点经过时间 $2T_{\min}$ 后开始接收各传感器节点发送的数据包 (DATA), 其中 T_{\min} 为最近的传感器节点到簇头节点的单程传播时间。因为各传感器节点的数据包是依次到达簇头节点的, 所以如果解决了相邻数据包之间的保护间隔设定问题, 那么也就不会存在更多连续数据包冲突的情况。因此, 重点考虑相邻数据包之间的保护间隔 T_g 。

现有保护间隔 T_g 的设置通常为固定值, 且只参考网络中最远传感器节点到簇头节点传播时延的波动, 因此, 对近距节点, 该设置值明显保守, 因为传播时延的波动与距离存在正相关, 故与近距节点数据包有关的保护间隔应可更小一些。这是传统保护间隔固定策略在应用于 UWSN 时仍应改进的原因之一。本文正是针对此缺点, 提出了一种考虑水声传播时延波动性的合理保护间隔设定方案。

2 基于声波传播时延变化特性的保护间隔设定

2.1 水声传播时延的变化特性

水声传播模型可表示为^[1]

$$C(z, S, t) = 1449.05 + 45.7t - 5.21t^2 + 0.23t^3 + (1.333 - 0.126t + 0.009t^2)(S - 35) + 16.3z + 0.18z^2 \quad (1)$$

式中: $t = T_P/10$, T_P 为温度, $^{\circ}\text{C}$; S 为盐度, $\times 10^{-6}$; z 为深度, km 。

文献[1]给出了不同水下环境的声传播速度, 一般在 $(1460 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, 1520 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$ 区间, 中心值为 $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。假设声波传播时延不确定性服从 Gaussian 分布, 首先分析传播时延随节点间距变化的统计特性。记两点之间距离为 R , 则数据包的传播时延为 $T = R/C$, 其中 C 为水声速率, 通常可取 $C = 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。考虑到实际中存在波动, 为便于分析, 不妨假定 C 的最大变化为 ΔC_{\max} , 即实际传播速度在 $(C - \Delta C_{\max}, C + \Delta C_{\max})$ 中, 则两点之间的传播时延的最大波动 ΔT_{\max} 与 ΔC_{\max} 的关系可表达为

$$T \pm \Delta T_{\max} = R / (C \mp \Delta C_{\max}) \quad (2)$$

由式(2)所给出的 ΔT_{\max} 为

$$\Delta T_{\max} = R \Delta C_{\max} / [C(C - \Delta C_{\max})] \quad (3)$$

记 $k_{\max} = \Delta C_{\max} / [C(C - \Delta C_{\max})]$, 则传播时延的最大波动可简记为

$$\Delta T_{\max} = k_{\max} R \quad (4)$$

式(4)表明传播时延的最大波动随着传播距离加长

而增大。在实际中, 近似取 $\Delta C_{\max} = 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[1], 故可得 $k_{\max} = 1.8265 \times 10^{-5}$ 。由于声波传播速率的影响因素众多以及实际中很难知道传播时延波动 ΔT 与之间的具体关系, 故这里重点考虑时延波动受距离影响最剧烈的情况。因为 ΔT 受多种而非单一因素影响, 如温度、盐度、深度、海流等, 故下面为声波传播时延的波动 ΔT 近似符合 Gaussian 分布^[13]。图 3 给出了 R 下的该分布示意。由 Gaussian 分布特性知, 传播时延 T 有 99.73% 的可能落在 $(T - 3\sigma, T + 3\sigma)$ 区间, 在工程实践中可认为 $\Delta T < 3\sigma$ 。考虑到 99.73% 的概率已经能够满足绝大部分工程需要, 故不妨假定 $\Delta T_{\max} = 3\sigma$, 结合(4)可得

$$\sigma = \frac{1}{3} \Delta T_{\max} = \frac{1}{3} k_{\max} R \quad (5)$$

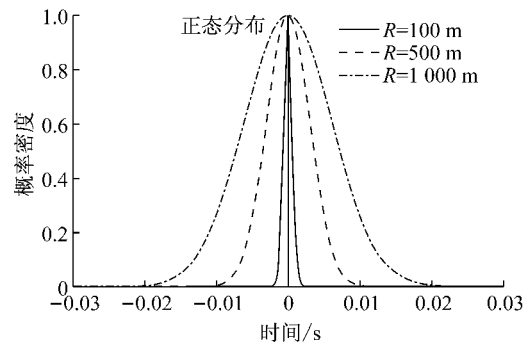


图 3 传播时延的最大波动随距离变化的特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of maximum variation of propagation delay with distance

水声传播时延波动随距离加长而增加, 所以原则上在长距离数据通信中应该把保护间隔设定得更大。而且, 相邻数据包之间的保护间隔与簇头节点到相关的 2 个传感器节点的距离有关, 可见其优化设置并非固定值。图 4 给出了基于该思想的改进连续时间分配 TDMA 的一个传送周期示意, 其中相邻数据包之间的保护间隔 $T_g(i)$ 是不同的, 且与到簇头节点距离相关。

2.2 冲突概率和保护间隔的关系

相继传输的数据包的冲突模型如图 5 所示。图 5 中数据包 i 和数据包 $i+1$ 由 2 个传感器节点独立发送。记函数 f_i 是在簇头节点处数据包 i 的尾端分布函数, 即最后一个数据位接收下来的时间分布, 函数 f_{i+1} 是数据包 $i+1$ 的始端分布函数, 即第 1 个数据位到达簇头节点的时间分布。记 $T_g(i)$ 为满足给定冲突概率 P_c 的相继数据包 (即数据包 i 和 $i+1$) 之间的保护间隔。记数据包 i 的尾端服从期望为零、标准差为 σ_i 的 Gaussian 分布, 数据包 $i+1$ 的始端服从期望

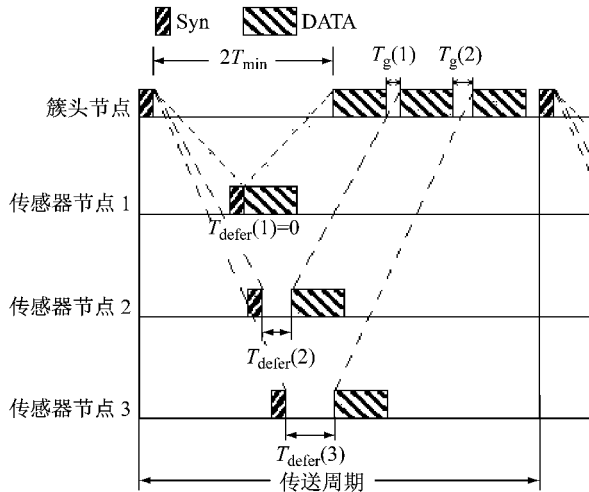


图 4 利用改进保护间隔设定方案的 TDMA 协议
Fig. 4 Improved protection interval setting scheme based TDMA protocol

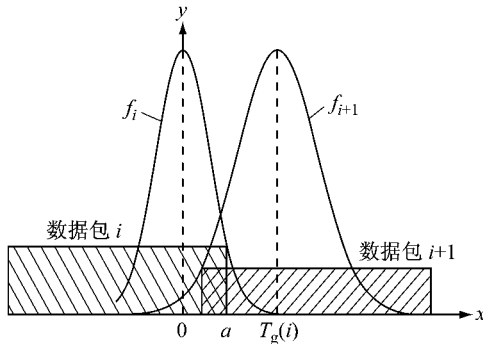


图 5 相继传输的 2 个数据包的冲突模型
Fig. 5 Conflicting model of two data packets transmitted one after another

为 $T_g(i)$ 、标准差为 σ_{i+1} 的 Gaussian 分布.

$$f_i(x) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}} \quad (6)$$

$$f_{i+1}(x) = \frac{1}{\sigma_{i+1} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-T_g(i))^2}{2\sigma_{i+1}^2}} \quad (7)$$

其中, σ_i 和 σ_{i+1} 分别为

$$\sigma_i = \frac{1}{3} k_{\max} R_i \quad (8)$$

$$\sigma_{i+1} = \frac{1}{3} k_{\max} R_{i+1} \quad (9)$$

式中: R_i 为簇头节点和传感器节点 i 之间的传播距离. 图 5 中把数据包 i 的尾端面 x 坐标值记为 a . 假如数据包 $i+1$ 的始端的 x 坐标值小于 a , 2 个数据包就会冲突. 因此对一个任何点 a , 相邻 2 个数据包的冲突概率 dP_c 如下:

$$dP_c = f_i(a) da \int_{-\infty}^a f_{i+1}(x) dx \quad (10)$$

因为 a 的范围是 $(-\infty, +\infty)$, 所以相邻 2 个数

据包的冲突概率为

$$P_c = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(a) \int_{-\infty}^a f_{i+1}(x) dx da \quad (11)$$

整理式(11)得

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^a f_{i+1}(x) dx &= \int_{-\infty}^a \frac{1}{\sigma_{i+1} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-T_g(i))^2}{2\sigma_{i+1}^2}} dx = \\ &= \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{a-T_g(i)}{\sigma_{i+1} \sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-\infty-T_g(i)}{\sigma_{i+1} \sqrt{2}}\right) \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{a-T_g(i)}{\sigma_{i+1} \sqrt{2}}\right) + 1 \right] \\ P_c &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} f_i(a) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{a-T_g(i)}{\sigma_{i+1} \sqrt{2}}\right) + 1 \right] da = \\ &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} f_i(a) \operatorname{erf}\left(\frac{a-T_g(i)}{\sigma_{i+1} \sqrt{2}}\right) da + \\ &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} f_i(a) da \end{aligned}$$

考虑 $\int_{-\infty}^{+\infty} f_i(a) da = 1$, 冲突概率为

$$P_c = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{a^2}{2\sigma_i^2}} \operatorname{erf}\left(\frac{a-T_g(i)}{\sigma_{i+1} \sqrt{2}}\right) da \quad (12)$$

给定簇头节点与邻节点的距离, 按式(8)和式(9), 可得函数 f_i 和 f_{i+1} 的标准差, 且由式(12)可见, P_c 是 $T_g(i)$ 的函数. $T_g(i)=0$, 即没有保护间隔时, $P_c=0.5$, 且 P_c 随着 $T_g(i)$ 的增大而减少. 式(12)本质上给出了 P_c 和 $T_g(i)$ 的关系, 原则上解此方程可得满足给定冲突概率时相邻数据包之间的保护间隔. 考虑到 $T_g(i)$ 的值难以从式(12)中直接解出, 故下面采用数值算法给出二者关系并进行近似求解, 以给出 $T_g(i)$ 的设定方法.

2.3 保护间隔的设定

图 6 给出了 3 个节点通信(含 1 个簇头节点)并在 $P_c=0.001$ 时通过数值方法得到的保护间隔随节点间距变化的关系. 簇头节点到各传感器节点的距离 R_i 和 R_{i+1} 在(100 m, 1 500 m)之间时, 保护间隔在(0.005 s, 0.043 s)区间. 由图 6a 可见, 当固定一个传感器节点和簇头节点间距的时候, 保护间隔随着另一个传感器节点和簇头节点间距的增大而增大. 从图 6b 可见, 当 2 个传感器节点到簇头节点的距离一起增大时, 保护间隔增大得更快. 根据该变化规律和图 6 曲线形状, 保护间隔随节点间距的变化可近似用指数函数描述, 如(13):

$$T_{g, \text{app}}(i) = a_0 + a_1 e^{\alpha R_i} + a_2 e^{\alpha R_{i+1}} + a_3 e^{\alpha(R_i + R_{i+1})} \quad (13)$$

式中: α 为指数. 考虑到图 6a 中 $T_g(i)$ 和 R_i 关系近似

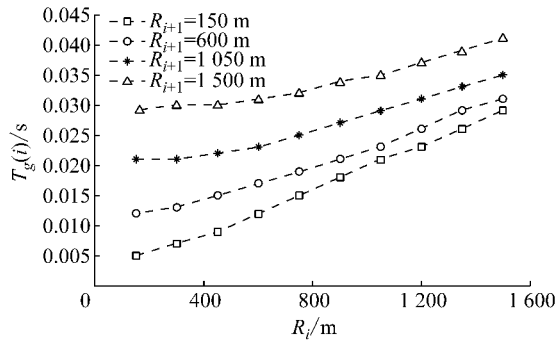
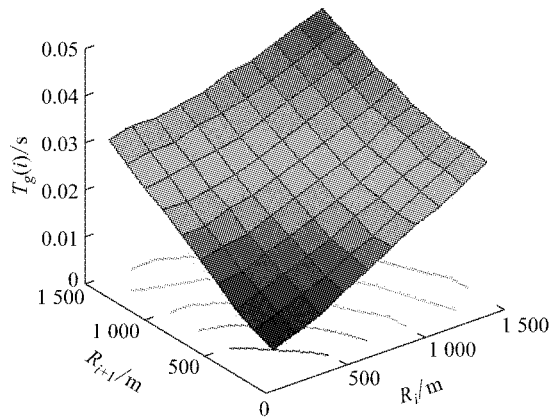
a R_{i+1} 固定时保护间隔 R_i 和簇头节点距离的变化b 保护间隔随 R_i 和 R_{i+1} 的变化

图 6 当 $P_c = 0.001$ 时相邻 2 个数据包之间的保护间隔
Fig. 6 Guard time between the neighbor two data packets when $P_c = 0.001$

为直线但形状略陡峭,故模型(13)中 α 可取一很小值. 实际中先选择 α 后再利用最小二乘估计法求取模型参数 a_0, a_1, a_2, a_3 . 多次尝试得到如下模型:

$$T_{g_app}(i) = -0.0771 + 0.0487e^{0.00042R_i} + 0.0487e^{0.00042R_{i+1}} - 0.0187e^{0.00042(R_i + R_{i+1})} \quad (14)$$

此时与图 6 算例数据的最大相对误差为 7.6%. 至此,簇头节点可根据自己到每个传感器节点的传播距离来计算相邻 2 个数据包之间的保护间隔. 而在实际工程实践中亦可以采用查表法获取保护间隔来提高计算效率.

3 方案仿真试验

3.1 仿真设计与参数设置

采用网络仿真方式对比 3 种 TDMA 协议实现的信道利用率和平均端到端时延,它们分别是固定时间片长度的传统单时隙 TDMA 协议 (Ori-TDMA)、保护间隔固定的 TDMA (fixed T_g)、本文保护间隔不固定的 TDMA (variable T_g). 其中,后 2 种都是采用连续时间分配方式.

在仿真过程中,传感器节点随机分布,簇头节点和传感器节点之间的距离在 100 m 到 1500 m 之间,帧同步包的长度为 300 bit,传感器节点数据包的长度为 500 bit,数据包传输速度设定为 1000 bps. 冲突概率为 0.001,簇头节点和传感器节点之间的最大距离为 1500 m 时,保护间隔固定方案的 T_g 为 0.043 s. 而本文方案得出的 $T_g(i)$ 总是比 0.043 s 小,从而可提高网络利用率. 下面分析的所有数据为仿真 1000 次得到结果的平均值.

3.2 评价指标的定义

为进一步仿真方便,这里先给出基于连续时间的分配方式 TDMA 协议 2 个评价指标的定义.

保护间隔固定方案中信道利用率 η 即成功传输的数据包所占用的传输时间除以总时间为

$$\eta = \frac{(1 - P_c)NT_{data}}{T_{Syn} + 2T_{min} + N(T_{data} + T_g)} \quad (15)$$

本文提出的保护间隔设定方案中信道利用率为

$$\eta_v = \frac{(1 - P_c)NT_{data}}{T_{Syn} + 2T_{min} + NT_{data} + \sum_{i=1}^N T_g(i)} \quad (16)$$

保护间隔固定方案中端到端时延(包括数据包在信道中传播时延和在发射缓冲区等待的时间)为

$$\tau(i) = T_{defer}(i) + T_{data} + T(i) = (i-1)(T_{data} + T_g) - 2(T(i) - T_{min}) + T_{data} + T(i) \quad (17)$$

本文提出的保护间隔设定方案中端到端时延为

$$\tau_v(i) = (i-1)(T_{data} + T_g(i)) - 2(T(i) - T_{min}) + T_{data} + T(i) \quad (18)$$

3.3 仿真结果与分析

图 7 比较了冲突概率为 0.001 时不同协议配置下的性能. 由图 7 可见,固定时间片长度的传统单时隙 TDMA 的信道利用率明显低于连续时间分配 TDMA.

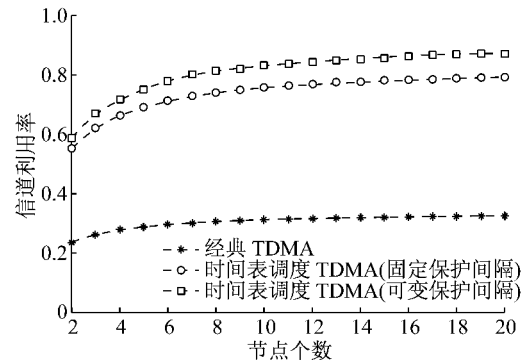


图 7 不同协议下的信道利用率

Fig. 7 Channel utilization under different protocols

此外,本文方案亦明显优于保护间隔固定的方案. 当有 20 个传感器节点时,本方案的信道利用率

可提高 10.4%。

图 8 显示了传感器节点数对应的平均端到端时延性能。传感器节点数小的时候,固定方案和本文提出的方案之间平均端到端时延差很小,可是随着网络规模增大而增大,本文方案总是更优,当具有 20 个节点时,平均端到端时延降低 9.6%。

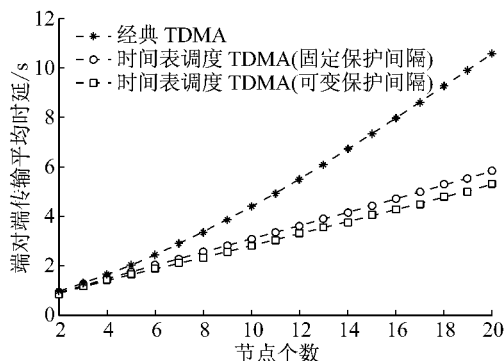


图 8 不同协议下的平均端到端时延

Fig. 8 Average end-to-end delay under different protocols

综上,考虑水下声传播速度变化的保护间隔设定方案明显优于固定方案,传统单时隙 TDMA 协议的网络效率最低。

4 结语

在考虑水下声传播时延变化统计特性的基础上提出了一种新型的保护间隔设置方法。首先给出了连续时间分配 TDMA 中相继传输的 2 个数据包的冲突模型,然后分析了保护间隔与簇头节点和传感器节点距离之间的关系,并给出了保护间隔设定方法。分析和仿真表明,该方法在信道利用率、平均端到端时延等指标上均优于保护间隔固定方案。

参考文献:

- [1] URICK R J. Principles of underwater sound[M]. 3th ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [2] AKYILDIZ I F, POMPOLI D, MELODIA T. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3):257.
- [3] HEIDEMANN J, YE W, WILLS J, *et al.* Research challenges and applications for underwater sensor networking [C]// Wireless Communications and Networking Conference, 2006. Las Vegas: IEEE, 2006:228-235.
- [4] 魏昕, 赵力, 李霞, 等. 水声通信网综述[J]. 电路与系统学报, 2009, 14(6): 96.
- [5] WEI Xin, ZHAO Li, LI Xia, *et al.* The review of the underwater acoustic communication network[J]. Journal of Circuits and Systems, 2009, 14(6): 96.
- [6] 张宏滔, 王忠康. 水下声通信网络的发展与应用综述[C]//船舶电气及通讯导航技术发展论坛论文集. 大连:中国造船工程协会, 2012:115-122.
- [7] ZHANG Hongtao, WANG Zhongkang. The development and application of the underwater acoustic communication network [C]// Proceedings of the symposium on the development of electrical and communication navigation technology for ships. Dalian: China Shipbuilding Engineering Society, 2012: 115-122.
- [8] MOLINS M, STOJANOVIC M. Slotted FAMA: A MAC protocol for underwater acoustic networks[C]// Oceans. Singapore: IEEE, 2006:1-7.
- [9] SYED A A, Ye W, HEIDEMANN J, *et al.* Understanding spatio-temporal uncertainty in medium access with ALOHA protocols[C]// The Workshop on Underwater Networks. New York: ACM, 2007:41-48.
- [10] MIN K P, RODOPLU V. UWAN-MAC: An energy-efficient MAC protocol for underwater acoustic wireless sensor networks [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2008, 32(3):710.
- [11] SYED A A, YE W, HEIDEMANN J. T-Lohi: A new class of MAC protocols for underwater acoustic sensor networks[C]// INFOCOM 2008. Phoenix: IEEE International Conference on Computer Communications, 2008:231-235.
- [12] FAN G, CHEN H, XIE L, *et al.* A hybrid reservation-based MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3):1178.
- [13] TAN H X, SEAH W K G. Distributed CDMA-based MAC protocol for underwater sensor networks [C]// IEEE Conference on Local Computer Networks. Dublin: IEEE Computer Society, 2007:26-36.
- [14] CLIMENT S, SANCHEZ A, CAPELLA J V, *et al.* Underwater acoustic wireless sensor networks: Advances and future trends in physical, MAC and routing layers[J]. Sensors, 2014, 14 (1): 795.
- [15] HONG L, HONG F, GUO Z, *et al.* A TDMA-based MAC protocol in underwater sensor networks[C]// International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. DaLian: IEEE, 2008:1-4.
- [16] PARK S. An efficient transmission scheme for underwater sensor networks[C]// Oceans. Bremen: IEEE, 2009:1-3.
- [17] 童峰, 陆佳人. 一种用于水声通信网的 TDMA 方案[J]. 通信学报, 2003, 24(4): 104.
- [18] TONG Feng, LU Jiren. A TDMA protocol for underwater acoustic network[J]. Journal on Communications, 2003, 24 (4): 104.
- [19] NGUYEN T H, SHIN S Y, PARK S H. Efficiency reservation MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[C]// International Conference on Networked Computing and Advanced Information Management. Gyeongju: IEEE, 2008: 365-370.