

A μ -MAC: 一种自适应的无线传感器网络 MAC 协议

古连华¹ 程良伦¹ ZHU Quan-Min²

摘要 结合基于竞争和调度机制的混合型方案是高效的无线传感器网络 MAC 协议的重要解决思路. μ -MAC 是一种典型的混合型 MAC 协议, 本文在深入研究 μ -MAC 的基础上, 提出一种自适应的混合型协议 A μ -MAC. 它针对动态流量的数据采集型应用, 解决了 μ -MAC 中动态拓扑适应性及时钟同步问题, 并提供了良好的流量自适应性. 仿真结果表明, A μ -MAC 增强了协议的扩展性和适应性, 具有更好的网络生存能力, 而保留了与 μ -MAC 相近的节能效率和时延性能.

关键词 无线传感器网络, 自适应, 混合型, MAC 协议, μ -MAC, A μ -MAC

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.00054

A μ -MAC: An Adaptive MAC Protocol for Wireless Sensor Networks

GU Lian-Hua¹ CHENG Liang-Lun¹ ZHU Quan-Min²

Abstract The hybrid mechanism combining contention-based and schedule-based ways is an important solution for MAC protocols of wireless sensor networks (WSN). μ -MAC is an effective hybrid MAC protocol of WSN. After a deep investigation of μ -MAC, an adaptive hybrid MAC protocol A μ -MAC is proposed for the dynamic-traffic data collection applications. It solves the problems of the adaptability to dynamic topology and clock synchronization in μ -MAC, and further supports better adaptability to load traffic. The simulation results show that A μ -MAC can enhance the expansibility and adaptability of the protocol and enable better network survivability, and yet has almost the same energy-efficiency and latency as μ -MAC.

Key words Wireless sensor networks, adaptive, hybrid, MAC protocol, μ -MAC, A μ -MAC

无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSN) 是一种特殊的无线多跳分布式网络, 它不需要固定网络的支持, 具有快速组网、休眠节能、抗毁性强等特点. WSN 相对于传统的无线网络, 有明显的资源受限和动态变化的特点, 对其通信协议提出了特别的要求. 介质访问控制 (Medium access control, MAC) 协议决定 WSN 无线信道的使用方式, 在传感器节点之间分配有限的无线信道资源, 是保证 WSN 高效通信的关键网络协议之一.

WSN 的特殊性决定了其 MAC 协议的设计指标与传统网络不同, WSN MAC 主要关注节能效率、时延、传达率 (可靠性), 协议的适应性和生存性也成为重要的评价指标^[1]. 而经典的无线网络 MAC 协议如 IEEE 802.11 不能适应 WSN 的特殊需求, 需要针对具体的应用模型研究 WSN MAC 协议. 现

有的 WSN MAC 协议, 根据信道接入方式大致可分为三类: 1) 基于竞争的, 如大多数典型的 WSN MAC 协议 S-MAC^[2]、T-MAC^[3]、WiseMAC^[4] 等; 2) 基于预约/调度的, 普遍采用 TDMA 机制, 如 EA-MAC^[5]、D-MAC^[6] 和 DEANA^[7] 等; 3) 两者混合的机制. 文献 [1] 和 [8] 指出结合两种方式的混合型 MAC 协议及跨层设计思想是高效 WSN MAC 的研究趋势. 竞争性 MAC 机制与调度机制的有机结合可以互补优势和平衡两者的不足, 取得更好的性能. 已经有学者提出一些混合型的 WSN MAC 协议, 如 Z-MAC^[9]、TRAMA^[10]、 μ -MAC^[11] 和 A²-MAC^[12]、CRMAC^[13]. 混合型 MAC 协议普遍算法过于复杂, 如 Z-MAC 和 TRAMA, 或研究不够充分, 如 A²-MAC. μ -MAC 是其中一种典型的混合型 WSN MAC, 算法简易可行, 且性能优越, 在针对周期性数据采集型网络的应用中能达到很好的效果, 但它在流量适应性和网络扩展性方面不理想.

本文在研究 μ -MAC 的基础上改善设计了一种自适应的混合型协议 A μ -MAC (Adaptive μ -MAC), 它扩展到动态流量的采集型网络应用, 继承 μ -MAC 高效的拓扑建立和时槽分配算法, 而使用一种改进的信道结构和运行控制. A μ -MAC 自适应于动态流量及动态拓扑, 却保留了与 μ -MAC 相近的节能效率和时延性能.

收稿日期 2008-10-15 录用日期 2009-04-01
Manuscript received October 15, 2009; accepted April 1, 2009
国家自然科学基金 (60673132), 广东省自然科学基金 (07117421, 8351009001000002) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60673132), the Guangdong Natural Science Foundation (07117421, 8351009001000002)
1. 广东工业大学自动化学院 广州 510006
1. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006
2. Intelligent Autonomous Systems Lab, University of the West of England, Bristol BS16 1QY, United Kingdom

1 μ -MAC 协议分析

1.1 μ -MAC 的应用模型及网络结构

μ -MAC 参考应用层的流量信息来提高 MAC 协议的性能. 它的应用模型是周期性数据采集型 WSN, 如环境监测应用. 网络中有一个独立于 WSN 传感节点之外的固定基站 (Base station, BS), 负责发出兴趣任务指令及汇聚报告数据, 起网络主控和数据集合功能. 网络绝大部分流量是从传感节点到基站的周期性数据包. μ -MAC 设计的目标是高节能效率, 同时提供可接受的时延和可靠性, 即包传达率.

μ -MAC 有几个前提: 假设有一个外部的信标源实现了本地同步; 网络拓扑不能频繁变化; 流量模式的信息可获得.

1.2 μ -MAC 的信道结构和运行

1) μ -MAC 的信道结构包含竞争期和无竞争期, 如图 1.

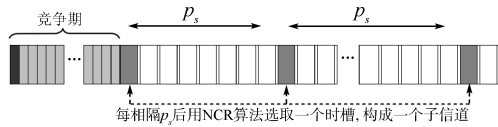


图 1 μ -MAC 的信道结构

Fig. 1 Channel structure of μ -MAC

竞争期采用分时槽的随机竞争接入方式, 为保证包 99% 传达, 根据文献 [14], 重发次数为 7, 则竞争时槽总数至少为 $7 \times 1.44 \times N$, N 为节点平均的两跳内邻居数. 竞争期传输控制指令, 进行网络拓扑建立 (邻居发现) 和子信道初始化.

无竞争期采用 TDMA 调度接入方式. 相邻两个时槽之间留有转换间隔, 以补偿同步漂移. 无竞争期传输主流的报告数据. 时槽选择采用高效的邻居感知竞争分解算法 (Neighborhood-aware Contention Resolution, NCR).

无竞争期复用了一般流量子信道 (General traffic, GT) 和传感报告子信道 (Sensor report, SR) 两种子信道: a) GT 子信道是每相隔大致相同的间隔 P_g 根据 NCR 算法选取一个时槽组成的. 间隔 P_g 决定了 GT 子信道分配的带宽, 是网络运行前固定设置的. μ -MAC 只有一个 GT 子信道, 传输控制信息; b) SR 子信道是根据传感兴趣任务需求的带宽, 在无竞争期每相隔至少 P_s 间隔选取一个时槽组成的. 间隔 P_s 决定了 SR 子信道分配的带宽, 而 P_s 根据应用层流量信息决定. 可存在 N 个 SR 子信道, 每个 SR 子信道服务于一个兴趣任务.

2) 协议运行基于 Interest/Reserve 流量预约机

制 (如图 2), 有三个步骤: a) 基站在 GT 子信道广播 Interest 包, 请求数据, 包括数据类型、报告频率、有效期, 中间节点进行带宽注册和绑定, 传递 Interest 包; b) 目标节点在 GT 子信道回发 Reserve 包, 逐跳传递回基站, 并一路上预约带宽, 激活 SR 子信道; c) 节点产生 Report 包, 使用 SR 子信道, 周期性地回送到基站.

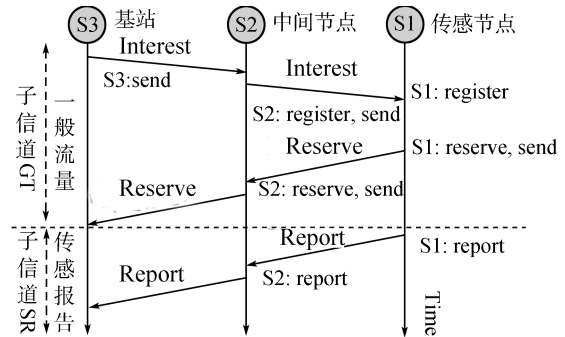


图 2 μ -MAC 协议运行

Fig. 2 μ -MAC protocol operation

1.3 μ -MAC 的主要机制

对于协议运行、时槽分配等, μ -MAC 主要有以下机制:

1) 协议的启动运行基于图 2 的流量预约机制. μ -MAC 提供了四个链路层命令: 两个数据通信命令 send、report, 和两个子信道建立命令 register、reserve. 流量预约过程传输三种类型的数据包: Interest、Reserve、Report.

2) 在竞争期建立拓扑信息采用 TRAMA 的 NP (Neighbor protocol) 协议算法^[10], 建立一致的两跳邻居信息表, 以便启动 NCR 算法分配时槽. NP 协议是简洁而高效的.

3) 子信道的时槽分配采用分布式的 NCR 算法选择子信道的前 n 个时槽, 在协议运行中按需不断补充确定未来 n 个时槽, 相邻两个时槽间隔 P 符合子信道的带宽需求. NCR 算法的要求是准确的两跳邻居信息表, 它能在各节点中单独计算在每个时槽的优先级, 并保证节点在拥有最高优先级 (拥有该时槽) 的时槽中传输数据不会与邻居冲突. 时槽选择信息表在控制包和报告包的头部捎带, 通告邻居节点. 故在节点拥有的时槽上无论是否有数据发送, 都需要传输一个维持包, 以便携带下 n 个时槽的选择信息.

μ -MAC 在拓扑建立, 特别是在时槽分配的算法机制上有极大的优势, 采用分布式的 NCR 算法分配时槽, 可保证无冲突的传输, 协议在 SR 子信道上采用了按需激活后续时槽的机制, 不仅为失效节点的检测带来方便, 而且在节点完成采集任务后可

以很容易自动还带宽予信道。

μ -MAC 的信道接入控制是高效的,且算法简单易行.在针对周期性数据采集型的 WSN 网络应用中能达到很好的性能.但该协议有一定的不足和局限性.

2 $A\mu$ -MAC 协议的设计

2.1 μ -MAC 的局限及 $A\mu$ -MAC 的提出

深入分析 μ -MAC,其不足及局限性讨论如下:

1) μ -MAC 的适用场合及迟钝的流量适应性. μ -MAC 针对周期性数据采集型的网络应用,其流量是可预测的,可从应用层信息获得,一旦由基站发起 Interest 数据请求,预约好一个带宽一定的 SR 子信道后,流量基本是固定的,直到传感任务结束或基站明确再次发起新的 Interest 请求,才可能改变子信道带宽.这对于原文的应用模型来说是合理的,因为此类应用存在以下特点: a) 被动性,数据采集型网络应用受控于基站,基站集中控制采集的数据类型、频率以及所需的信道带宽,传感节点只要被动接受和完成任务; b) 流量可预知性,分发具体的一个传感任务时,Interest 包中包含了确定的请求数据的大小和频率,流量需求立即可知,在任务作业期内也基本不存在流量的变动. μ -MAC 没有提供对动态流量的主动调整机制,因此在包含动态流量的应用场合中, μ -MAC 效率非常低.

2) μ -MAC 并没有解决节点同步问题,而是假设有一个外部的信标源实现了本地同步,MAC 层功能不健全.

3) 对于拓扑变化,如节点移除或加入, μ -MAC 并没有提供应对机制,需要依赖应用层来监控接收到的数据包从而发现拓扑变化,如果检测到节点失效,则由应用层触发基站重新广播请求传感数据.对于新节点的加入也需要由应用层触发.原文也没有进一步说明在应用层怎样启动更新过程.

针对以上问题,本文基于 μ -MAC,针对动态流量的采集型网络应用,设计了一种自适应的 MAC 协议 $A\mu$ -MAC.

2.2 $A\mu$ -MAC 协议的设计

$A\mu$ -MAC 沿用 μ -MAC 的网络结构,及其主要的控制策略和时槽分配算法,但扩展了应用模型,并使用一种改进的信道结构和运行控制,引入流量自适应机制.

1) $A\mu$ -MAC 扩展的应用模型. $A\mu$ -MAC 的应用包容 μ -MAC 的周期性数据采集模型,并扩展为动态流量的采集型应用模型.在这个模型中,传感节点以环境事件为驱动,主动向基站预约带宽和传输报告数据,并同时启动流量感知,如果发现所使用的

SR 子信道带宽不足或过度空闲,则将自动触发自适应调整.

概括之,动态流量的采集型网络有如下特点: a) 主动性,基站只作为一个数据集合中心,数据采集任务由传感节点根据环境情况主动产生; b) 事件驱动,传感节点起监控和数据采集功能,环境事件影响采集的数据类型和频度; c) 动态流量,环境变化,传感任务和数据亦随之变化,网络存在动态流量.应用实例如农田生态保护智能监控网络等.

2) $A\mu$ -MAC 采用与 μ -MAC 相似的信道结构,可参考图 1,分为随机竞争接入方式的竞争期,和 TDMA 调度接入的无竞争期,无竞争期复用了 GT 和 SR 子信道. R_c 定义为竞争期时长与无竞争期时长之比,是协议的一个参数.

$A\mu$ -MAC 在竞争期的第一个时槽加入同步信标,在此阶段,约定由某个参考节点(如编号最小的节点)触发本地同步.

3) $A\mu$ -MAC 的运行,基于流量感知和自适应调整机制. $A\mu$ -MAC 取消了图 2 中 μ -MAC 运行的 Interest/Reserve 流量预约过程,由基站主控方式改为传感节点主动调控方式,如图 3 所示.

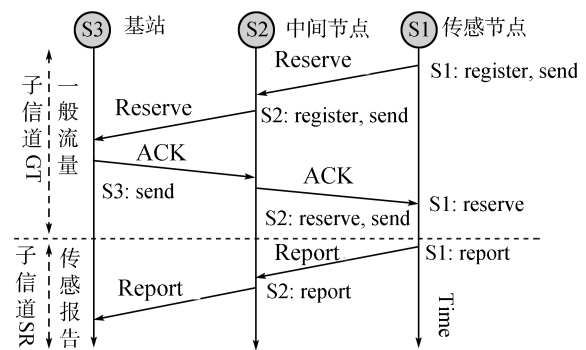


图 3 $A\mu$ -MAC 协议运行

Fig. 3 $A\mu$ -MAC protocol operation

$A\mu$ -MAC 的运行步骤为: a) 传感节点在 GT 子信道向基站发送 Reserve 包(由路由层协议决定传输路径),请求预约 SR 子信道的初始带宽(初始带宽需求根据传感节点的应用层信息获得),中间节点进行带宽注册和绑定,传递 Reserve 包; b) 基站在 GT 子信道回发 ACK 确认包,逐跳传回传感节点,并一路上预约带宽,激活 SR 子信道; c) 传感节点产生 Report 包,在已建立的 SR 子信道向基站发送报告,并监测节点的队列缓冲器; d) 当环境事件变化,传输任务需求变化,若流量波动超出阈值,节点将在 GT 子信道触发同 a)、b) 两步的 Reserve/ACK 流量自适应调整过程,预约新的带宽,以适应动态流量.

4) 在链路层引入对节点删除和加入的动态拓扑

适应性. A μ -MAC 引入了失效感知机制, 利用对接收包的监控来识别节点或路径失效. μ -MAC 的时槽预约是动态的, 只分配好未来 n 个时槽, 故当超过 n 个已预约的时槽后如果还没新预约时槽, 则可认为节点或路径已经失效, 则触发新的广播请求过程.

2.3 A μ -MAC 的主要机制分析

A μ -MAC 继承了 μ -MAC 的主要机制, 包括高效的邻居发现算法 NP 以及时槽分配算法 NCR. 但 A μ -MAC 扩展了协议的应用模型, 适用于传感节点主动式的动态流量监控网络. 同时 A μ -MAC 加入了 MAC 层同步功能, 并允许了网络对于路径/节点失效和新节点加入的动态适应性和扩展性.

1) A μ -MAC 的运行基于流量感知及自适应调整机制. μ -MAC 协议的节点维护一个队列缓冲器, 网络存在时延, 缓冲器可以在子信道尚未准备好或忙碌时暂存数据包. 由于针对周期性数据采集应用的特殊性, μ -MAC 对缓存器的要求不大, 且队列也不长, 主要是在协议启动阶段临时存储待发送的包.

A μ -MAC 取消了 Interest/Reserve 流量预约过程, 而让节点根据自身的流量需求初始一个从传感节点到基站的一定带宽的子信道. 然后节点检测自身的队列缓冲器, 如果队列在时间段 t_1 内的长度保持大于阈值 q , 则可认为预约的带宽不够, 可触发新的一次预约过程, 申请更大带宽的子信道; 如果在时段 t_2 内缓冲器保持空, 则可认为带宽冗余, 可触发新的预约过程, 减少占用的时槽数(带宽). t_1 、 q 、 t_2 是协议的关键参数, 决定流量感知的敏感程度.

这样改进的特点在于把 μ -MAC 拓展成为自适应流量变化、自动调整合适带宽子信道的协议, 减少了动态流量的传输延时, 而保留了 μ -MAC 的时槽分配机制的优越性.

2) A μ -MAC 协议在竞争期第一个时槽设置了一个同步信标, 在这个时槽邻居所有节点必须侦听, 由某个特定的节点发送参考时间戳, 其他节点接收到同步包后修正时钟漂移. 该同步机制是一个松散的本地同步策略, 时钟漂移 (Δs 级) 相对于时槽长度 (几十 ms) 可忽略, 且无竞争期时槽之间设置转换间隔补偿. 故本同步控制是满足应用要求的.

3) 对于动态拓扑, A μ -MAC 基于失效感知机制, 提供了良好的适应性. 监测接收包可以识别节点或路径失效. 因为 μ -MAC 节点初始只预约好子信道上前 n 个时槽, 而在流量过程中不断补充确定未来的 n 个时槽 (通过数据包头部携带分配信息表通告邻居节点), 保证数据流量连续传达. 如果邻居节点或传输路径失效, 可容忍 $n - 1$ 个数据包的丢失, 当超过 n 个已预约的时槽后如果还没有新预约时槽, 且传感任务尚未结束, 则可认为节点或路径已

经失效, 节点就在下个竞争期触发拓扑更新过程.

对于新节点加入, 在竞争期到来, 新节点与邻近节点群完成同步后, 就能在竞争期获取信道发送控制包, 请求加入, 节点接收到加入请求后, 触发拓扑更新过程. 上述的拓扑更新过程包括 NP 邻居发现协议, 两跳邻居内的节点都要更新邻居信息表, 并启动 NCR 算法更新邻居节点的时槽分配.

下节仿真实验将证明 A μ -MAC 协议在节能效率和时延性能上与原 μ -MAC 协议相近, 但却提供了良好的可扩展性及流量自适应性, 提高了网络的生存能力.

3 仿真与实验分析

本文提出的 A μ -MAC 协议在 NS-2^[15] 平台进行仿真, 实验数据用 Matlab 辅助分析. 为了对比评价, 同时实现了 μ -MAC 协议. 测试的性能指标为: 在不同的流量下的节能效率、时延及传达率. 实验模型参考原 μ -MAC 的实验, 结构如图 4 所示. 只有直接相邻两个节点能互相通信, 这种简化的结构帮助研究直接的 MAC 指标, 排除路由层选择的影响.

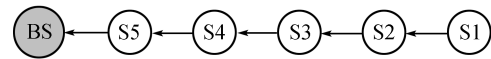


图 4 仿真实验模型

Fig. 4 Sensor field structure

A μ -MAC 和 μ -MAC 的主要参数为: 无线信道的速率为 20 Kbps, 竞争期时槽长度为 20 ms, 无竞争期时槽长度 40 ms (含转换间隔, 此期间可容长达 100 字节的数据包传输); 竞争期包重发最多为 7 次, 为保证 99% 传达率, 选择盈余的参数 $N = 25$, 故竞争期时槽总数为 $7 \times 1.44 \times N = 252$ 个; 发给基站的报告包为 50 字节; 实验中只实现一个 SR 子信道; NCR 算法采用 MD5 作为伪随机数产生器; 缓冲器为 20 个包; 参数 Rc 取为 1%. μ -MAC 的兴趣任务初始化为每秒 8 个包 (8 p/s) 并在实验中不改变. A μ -MAC 的 t_1 、 q 、 t_2 参数取为 10 个时槽、18 个包、4 个时槽. 实验仿真两种协议, 并多次运行, 结果及分析如下文所示.

3.1 节能效率实验分析

节能效率用节点的睡眠比例来间接衡量. 由图 5 可见, A μ -MAC 节点睡眠比例在流量变大时 (包间隔 $T_i > 8$ p/s) 低于 μ -MAC, 而在 $T_i > 8$ p/s 时睡眠比例稍高于 μ -MAC. 体现了 A μ -MAC 动态的 SR 子信道带宽, 可用节能效率换取负载适应.

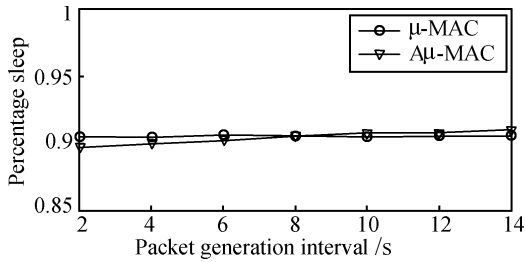


图 5 节点平均睡眠比例仿真实验图
Fig. 5 Average percentages of sleep

睡眠比例主要取决于参数 R_c 以及 SR 子信道分配使用的时槽数(带宽), 而 Aμ-MAC 并无改变信道结构上竞争期和无竞争期的设置和比例, 参数 R_c 不带来两个协议在节能效率的差异; 但 Aμ-MAC 随着流量的增大会自动为 SR 子信道分配更多的时槽以适应新的需求, 故在包产生间隔 T_i 小于初始值 8 p/s 时 Aμ-MAC 的节点平均睡眠比例降低, 而 $T_i > 8$ p/s 时, 节点睡眠比例也会自动调大. 这是节能效率与流量适应性之间的平衡和转换.

3.2 时延性能实验分析

图 6 和图 7 表示 μ-MAC 和 Aμ-MAC 的报告包时延. 图示三条曲线表示在编号 1、3、5 的节点中测试的平均队列时延. μ-MAC 并不保证数据包被立即传输, 而是保证根据包产生率对应分配足够多的时槽. 节点 n 不仅要传输自身的数据, 还要传递前 $n-1$ 个节点的数据, 故 5 个节点的通过负载和时延表现是不同的, 图中记录了其中三个节点的情况.

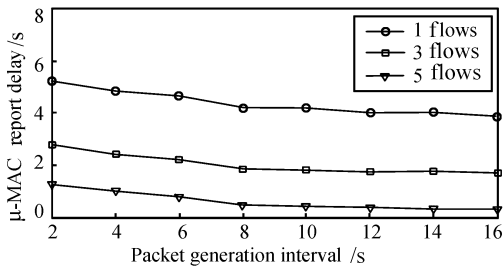


图 6 μ-MAC 报告包平均时延仿真实验图
Fig. 6 μ-MAC report delays in 3 nodes

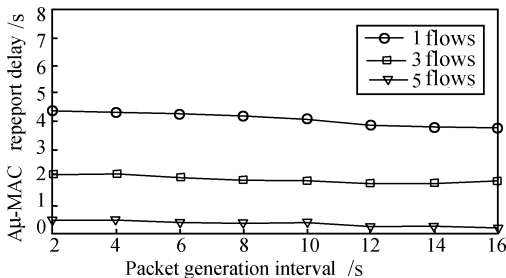


图 7 Aμ-MAC 报告包平均时延仿真实验图
Fig. 7 Aμ-MAC report delay in 3 nodes

由图 6 和图 7, 在包间隔 T_i 较大(流量小)时, Aμ-MAC 时延性能与 μ-MAC 相近, 但随着 T_i 减小(流量增大), μ-MAC 时延明显增大, 而 Aμ-MAC 却表现很稳定.

这是因为在流量增大时, 滞留在节点缓冲器中的包增多, μ-MAC 子信道的带宽(容量)是固定的, 流量过大, 会引起队列过长, 时延也明显增大, 负载过重时甚至可能出现丢包; 而 Aμ-MAC 子信道是自适应动态流量的, 可确保缓冲器的队列长度适宜, 保证时延性能.

3.3 传达率实验分析

图 8 所示是在不同流量负载下的传达率(1-丢包率), 可见 Aμ-MAC 在流量增大的情况下保持良好的包传达率, 保证很高的可靠性; 而 μ-MAC 在不堪重负时丢包率明显增大. 这与时延实验的分析是相似的, μ-MAC 的 SR 子信道不能应对动态流量, 负载变重时协议甚至无法正常工作.

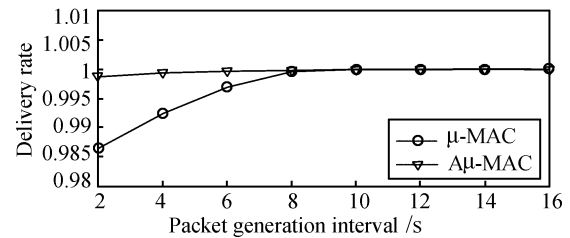


图 8 传达率仿真实验图
Fig. 8 Delivery rates

综上所述, Aμ-MAC 增强了协议的流量适应性, 同时保留了与 μ-MAC 在正常运行时相近的性能, 负载重时能以稍微降低节能效率来保证数据传输的可靠性.

4 结语与展望

本文着重研究结合基于竞争和基于调度的混合型 WSN MAC 协议 μ-MAC, 并指出其局限性, 提出了一种自适应的协议 Aμ-MAC. Aμ-MAC 针对动态流量的采集型 WSN 应用, 继承了 μ-MAC 主要的高效控制策略, 并进一步解决了 μ-MAC 的时钟同步以及动态拓扑适应性的问题, 使用一种改进的信道结构和控制方式, 提供了良好的动态流量自适应性. 仿真结果表明 Aμ-MAC 保持了与 μ-MAC 相近的节能效率和时延性能, 却能明显改善 μ-MAC 的动态负载流量适应性.

针对具体应用模型, 采用跨层设计和混合型 MAC 方案以及流量自适应机制是高效 WSN MAC 设计的发展方向. 本文的研究仍需进一步拓展和深入, 并在实际网络模型中实现应用.

References

- 1 Zheng Guo-Qiang, Li Jian-Dong, Zhou Zhi-Li. Overview of MAC protocols in wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(3): 305–316
(郑国强, 李建东, 周志立. 无线传感器网络 MAC 协议研究进展. 自动化学报, 2008, **34**(3): 305–316)
- 2 Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference on Computer and Communications Societies. New York, USA: IEEE, 2002. 1567–1576
- 3 van Dam T, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles, USA: IEEE, 2003. 171–180
- 4 El-Hoiydi A, Decotignie J D. WiseMAC: an ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks. In: Proceedings of the 9th IEEE Symposium on Computers and Communications. Alexandria, USA: IEEE, 2004. 244–251
- 5 Arisha K, Youssef M, Younis M. Energy-aware TDMA-based MAC for sensor networks. System-Level Power Optimization for Wireless Multimedia Communication. Berlin: Springer, 2002. 21–40
- 6 Lu G, Krishnamachari B, Raghavendra C S. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 18th International Conference on Parallel and Distributed Processing Symposium. Washington D. C., USA: IEEE, 2004. 224
- 7 Hou B C, Zhu G. An improved MAC protocol for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 1st International Conference on Innovative Computing, Information and Control. Washington D. C., USA: IEEE, 2006. 76–79
- 8 Messier G, Hartwell J, Davies R. A sensor network cross-layer power control algorithm that incorporates multiple-access interference. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, **7**(8): 2877–2883
- 9 Rhee I, Warrier A, Aia M, Min J. Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. San Diego, USA: ACM, 2005. 90–101
- 10 Rajendran V, Obraczka K, Garcia-Luna-Aceves J J. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles, USA: ACM, 2003. 181–192
- 11 Barroso A, Roedig U, Sreenan C. μ -MAC: an energy-efficient medium access control for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks. Washington D. C., USA: IEEE, 2005. 70–80
- 12 Zhou S, Liu R, Everitt D, Zic J. A²-MAC: an application adaptive medium access control protocol for data collections in wireless sensor networks. In: Proceedings of the International Symposium on Communications and Information Technologies. Washington D. C., USA: IEEE, 2007. 1131–1136
- 13 Ma G, Qiu D Y. An efficient MAC protocol based on hybrid superframe for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Washington D. C., USA: IEEE, 2008. 1–4
- 14 Bao L C, Garcia-Luna-Aceves J J. Hybrid channel access scheduling in Ad Hoc networks. In: Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Network Protocols. California, USA: IEEE, 2002. 46–57
- 15 Xu Lei-Ming. *NS and Network Simulation*. Beijing: Post and Telecom Press, 2005
(徐雷鸣. NS 与网络模拟. 北京: 人民邮电出版社, 2005)



古连华 广东工业大学自动化学院硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络, 嵌入式系统.

E-mail: gubi-gubi@126.com

(GU Lian-Hua Master student in the Faculty of Automation, Guangdong University of Technology. His research interest covers embedded system and

wireless sensor networks.)



程良伦 广东工业大学自动化学院教授, 主要研究方向为网络控制与系统集成, 网络与信息化控制, 嵌入式智能系统. 本文通信作者.

E-mail: llcheng@gdut.edu.cn

(CHENG Liang-Lun Professor in the Faculty of Automation, Guangdong University of Technology. His research

interest covers network control and integration, embedded intelligent system. Corresponding author of this paper.)



ZHU Quan-Min 英国西英格兰大学(UWE) 控制系统教授, 主要研究方向为非线性系统, 系统辨识和控制.

E-mail: quan.zhu@uwe.ac.uk

(ZHU Quan-Min Professor in control systems at the Faculty of Computing, Engineering and Mathematical Sciences (CEMS), University of the West

of England (UWE), Bristol, UK. His research interest covers nonlinear system modeling, identification, and control.)