

一种适用于低速无线传感器网络的 LR-MAC 机制研究

王明超

(无锡工艺职业技术学院 电子信息系, 江苏 宜兴 214206)

摘要:针对节点数量增加时无线传感器网络会产生数据包冲突增加和饱和吞吐量下降等问题,提出一种新的适用于低速无线传感器网络的 LR-MAC 机制. 该法采取当站点成功发送数据后,先进行一段时间的退避再参与信道竞争的措施来对 L-MAC 机制进行改进. 仿真结果表明,当网络规模发生变化时,LR-MAC 在性能上明显优于 L-MAC.

关键词:无线传感器网络;饱和吞吐量;分组丢弃概率;马尔可夫链模型

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2012.06.027

Study on low-rate wireless sensor network LR-MAC mechanism

WANG Ming-chao

(Department of Electronic Information, Wuxi Institute of Arts & Technology, Yixing 214206, China)

Abstract: Aiming at the problem that the increasing of the node in the wireless sensor networks may cause the lower saturation throughput and the higher packet collision. A novel channel access control mechanism for WSN, i. e. Low-rate MAC (LR-MAC) was proposed that the site firstly backoff for a moment after the site successfully send the data. The simulation results demonstrated that when the network size varies, LR-MAC performs much better than the L-MAC does.

Key words: wireless sensor network (WSN); saturation throughput; packet dropping probability; Markov chain model

0 引言

随着传感、无线通信、嵌入式系统以及微电子等高新技术的快速发展,具有数据收集、数据传输、信息融合处理等功能特点的传感器及由其构成的无线传感器网络(WSN)引起了人们的极大关注. WSN是由部署在检测区域内数量比较多且廉价的微型传感器节点组成的,它们通过无线通信的方式

形成了一个多跳的、自组织网络. 无线传感器节点的这些特性以及连接方式使其能够广泛应用于环境监测、城市交通管理、大型车间以及仓库管理等领域,也吸引了学术界的广大研究者对其进行深入研究^[1-5].

作为无线传感器网络协议栈的重要部分,介质访问控制(MAC)协议决定着无线信道的使用方式和信道资源的分配方式,成为WSN网络协议研究的

收稿日期:2012-06-05

基金项目:国家自然科学基金项目(60673185)

作者简介:王明超(1984—),男,江苏省宜兴市人,无锡工艺职业技术学院助教,主要研究方向为无线传感器网络性能分析与评价.

重点. Bianchi 首先提出了一个经典的马尔科夫链模型,该模型创造性地用数学模型的方式分析了无线局域网 MAC 协议在基本模式和 RTS/CTS 模式下的综合性能^[1]. J. Zheng 等^[2]在文献[1]的基础上提出 S-MAC 协议,该协议主要用来减少空闲侦听时所消耗的能量,但是当网络负载较小时,空闲侦听时间过长会造成系统整体性能下降. Y. Xiao 等^[3]引入自适应性占空比,减少了侦听时浪费的能量,但是当网络负载达到一定数量时,系统的整体性能仍不理想. 文献[4]提出一种适用于低速率无线传感器网络 L-MAC,该协议通过在马尔科夫链中加入对空闲状态的建模,从数学分析的角度上对 WSN 进行了分析,但是仿真结果表明,当一定区域中节点数量较多时,WSN 的网络性能表现得很不理想.

无线传感器网络有一个特点,即规模和节点密度都比较大,但是网络所要传输的数据量比较少. 这使得 WSN 站点间的碰撞加剧. 而一般的基于 WSN 的 MAC 层协议在数据传输成功后,站点直接参与竞争信道,当一定区域中的节点数量较多时,就会造成站点间的碰撞加剧,从而导致网络整体性能的下降.

针对上述情况,本文对 L-MAC 机制进行改进,提出了一种新的适用于低速率无线传感器网络 MAC 层机制 LR-MAC (low-rate MAC),以期网络规模发生变化时,其性能明显优于基本 L-MAC 机制.

1 新机制的数学分析模型

为了简化模型,本文做如下假设: 1) 网络共有 n 台设备,包括 1 台 PAN 网络协调器和 $n-1$ 台传感器节点; 2) 假设网络传输是在理想信道中进行的,并且过程中没有捕获效应.

1.1 马尔科夫链分析模型

为了方便起见,设定随机过程 $w(t)$ 和 $s(t)$, 分别表示设备在时隙为 t 时退避窗口的大小和设备在 t 时刻所处的退避阶段的随即过程; $\{s(t), w(t) = -1\}$ 和 $\{s(t), w(t) = -2\}$ 分别代表首次 CCA 检测和第 2 次 CCA 检测的随机过程; 概率 α 和 β 分别表示在第 1 次 CCA 检测和第 2 次 CCA 检测到信道中有其他站点传输数据包的概率; p_s 代表数据包成功发送的概率; p_f 代表数据包发送失败的概率; L 代表信道中传输数据包的长度^[6].

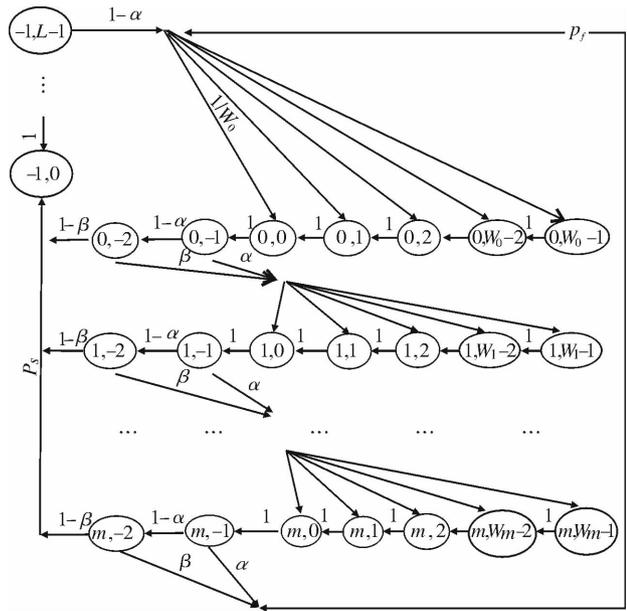


图 1 LR-MAC 协议的二维马尔科夫链模型

从图 1 可以看出,当数据包发送成功后,新机制 LR-MAC 区别于旧机制 L-MAC 的最大特点是: 当数据包发送成功后,先要进行一段时间的退避再竞争信道,该时间的长度在模型里面表示为 L , 为此可以得出数据流单步转移概率为

$$\begin{cases} P\{i, k | i, k+1\} = 1 & k \geq 0 \\ P\{0, k | i, 0\} = \frac{(1-\alpha)(1-\beta)}{W_0} & i < m \\ P\{i, k | i-1, 0\} = \frac{\alpha + \beta(1-\alpha)}{W_i} & i \in (1, m) \quad k \in (0, W_i - 1) \\ P\{0, k | m, 0\} = \frac{(1-\alpha)(1-\beta)}{W_0} + \frac{p_f}{W_0} \end{cases} \quad (1)$$

在公式①中,第 1 个等式表明在每个时隙的开始时刻,退避时间减 1; 第 2 个等式表明,当退避计数器退避到 0 时,如果要传输数据包,则要经过 2 次 CCA 检测; 第 3 个等式表明,在退避阶段 $i-1$, 数据包传输发生冲突,竞争窗口 CW 加倍; 第 4 个等式表明,达到最大退避阶段 m , 如果数据包传输成功,则还要进行一段时间的退避,再竞争信道. 如果传输失败,重新回到初始状态. 设

$$b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, w(t) = k\} \quad i \in (-1, m) \quad k \in (-2, \max(L-1, m-1))$$

为各状态的稳态分布,根据马尔科夫链规则有

$$b_{i-1,0}(\alpha + \beta(1-\alpha)) = b_{i,0} \quad 0 < i \leq m \quad (2)$$

由②式可以推出

图 1 是 LR-MAC 协议的二维马尔科夫链模型.

$$b_{i,0} = [(\alpha + \beta(1 - \alpha))]^i \times b_{0,0} \quad 0 < i \leq m \quad (3)$$

由公式(3)以及马尔科夫链规则,可以得出

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \left[(1 - \alpha)(1 - \beta) \sum_{j=0}^m b_{j,0} + p_f \right] \quad 0 < i \leq m \quad (4)$$

当 $i = 0$ 时,公式(4)变为

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0}$$

由马尔科夫链性质可知,图1中各种状态的转移概率总和为1,可以得出关系式

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} + \sum_{i=0}^m b_{i,-1} + \sum_{i=0}^m b_{i,-2} + \sum_{i=0}^{L-1} b_{-1,i} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \left[\frac{W_i + 1}{2} + 1 + (1 - \alpha) + L(1 - \alpha)(1 - \beta) \right] \quad (5)$$

$$1 = \frac{b_{0,0}}{2} [3 + 2(1 - \alpha) + 2L(1 - \alpha)(1 - \beta)] \cdot$$

$$\left(\frac{1 - (\alpha + \beta - \alpha\beta)^{m+1}}{1 - (\alpha + \beta - \alpha\beta)} \right) + W \left(\frac{1 - 2^{m+1}(\alpha + \beta - \alpha\beta)^{m+1}}{1 - 2(\alpha + \beta - \alpha\beta)} \right) \quad (6)$$

式(5)中, $W_i = 2^i W$. 数据包传输失败的概率 p_f 和成功的概率 p_s 分别为

$$p_f = b_{m,0}(\alpha + \beta - \alpha\beta) \quad (7)$$

$$p_s = \tau(1 - \alpha)(1 - \beta) \quad (8)$$

所有的数据传输发生在退避时隙为0的时刻,而不管退避阶段,所以站点分组传输概率为

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0}$$

把式(1)(6)(7)(8)代入,可得

$$\alpha = L[1 - (1 - \tau)^{N-1}](1 - \alpha)(1 - \beta) \quad (10)$$

$$P_{\text{send}} = (1 - (1 - \tau)^{N-1})(1 - \alpha)(1 - \beta) \quad (11)$$

$$\beta = \left[1 - \frac{P_{\text{send}}}{P_{\text{send}} \left(1 + \frac{1}{1 - (1 - \tau)^N} \right)} \right] (1 - (1 - \tau)^N) \quad (12)$$

$$\tau = 1 - \left(1 - \frac{\beta}{1 - \beta} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (13)$$

其中, P_{send} 表示数据包经过2次CCA检测后信道空闲后成功发送的概率.

1.2 饱和吞吐量分析

设 P_{tr} 为在一个随机选择的时隙内网络中至少有一次分组发送的概率,有

$$p_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (14)$$

饱和吞吐量指当负载持续增加时,系统能够达

到的最大吞吐量^[7]. 本文将系统的饱和吞吐 S 定义为成功发射有效载荷的信道时间在总的信道时间中所占的比重大小,因此可以得出

$$S = \frac{\text{在一个时隙内用于发送数据分组的有效载荷}}{\text{时隙的长度}} \quad (15)$$

$$S = \frac{p_s T_{E(p)}}{(1 - p_{tr})\sigma + p_s T_s + (p_{tr} - p_s)T_c} \quad (15)$$

把公式(10)~(14)代入公式(15),则可以得出系统的饱和吞吐量为

$$S = L \cdot N(1 - \tau)^{N-1}(1 - \alpha)(1 - \beta) \quad (16)$$

从公式(16)可以看出,新机制 LR-MAC 的饱和吞吐量和旧机制 L-MAC 最大的区别是加入了时间长度 L ,从而更加精确地模拟了站点成功发送数据包后再进行时间长度为 L 的退避.

1.3 分组丢弃概率分析

由图1可知,分组丢弃只会发生在退避阶段 $\{i, -2\}$. 令 $P_{i,drop}$ 表示数据包 i 的分组丢弃概率,所以有 $P_{i,drop} = p_i^{L_i+1}$.

2 LR-MAC 协议性能分析与评价

2.1 试验的模拟环境

为验证本文提出的 LR-MAC 机制的有效性,采用数学分析的方法对该协议和 L-MAC 协议进行性能仿真比较.

本文在一个单跳的星型网络场景并且节点处于一个能够相互监听的信道区域内进行仿真试验. 假设发送节点从10递增至100,进行 Matlab 数学分析所采用的系统参数见表1,假设 MAC 层发送的数据分组大小恒定,无线信道的传输速率为 1 Mb/s. 实验中所计算出的饱和吞吐量、分组丢弃概率都是利用模型中的相关公式和试验所使用的相关参数进行计算得出的.

表1 参数设置

参数	数值	参数	数值
数据包有效载荷	71 b	时隙 σ	20 symbol
MAC 帧头	14 b	MinBEO	3—5
PHY 帧头	7 b	amaxBE	5
信道速率	250 kb/s	MinBE1	3
SIFS	21.5 symbol	MaxCSMABackoff	5

2.2 结果及分析

图2给出了 LR-MAC 机制和 L-MAC 机制在不同站点数目下的饱和吞吐量的变化曲线. 从图2可

以看出,LR-MAC 算法在每个站点的饱和吞吐量都高于 L-MAC 算法;随着站点数的增加,2 种机制的饱和吞吐量表现出下降趋势,这是因为随着站点数目的增加,站点间发送数据包发生的碰撞明显增加,所以导致了饱和吞吐量的下降.但是 LR-MAC 算法的下降幅度明显比 L-MAC 算法平缓,这是因为 LR-MAC 算法加入了发送数据包成功后的一段退避时间,减少了碰撞,因此能很好地提升网络的整体性能.

图 3 给出了 LR-MAC 机制和 L-MAC 机制在站点数从 10 递增到 100 的情况下,站点分组丢弃概率的变化曲线.从图 3 可以看出,LR-MAC 机制在每一站点的分组丢弃概率始终低于 L-MAC 机制.随着站

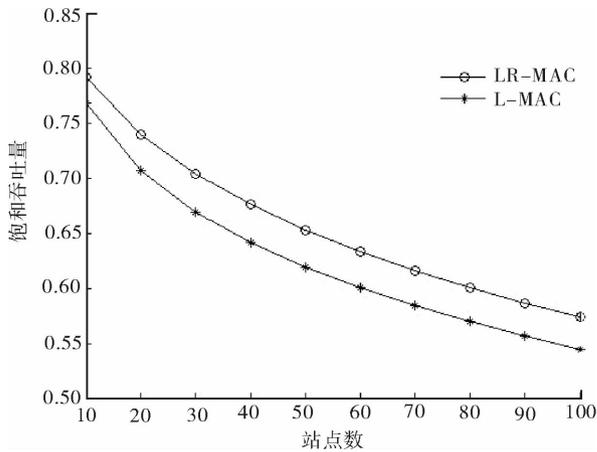


图 2 饱和吞吐量随站点数的变化

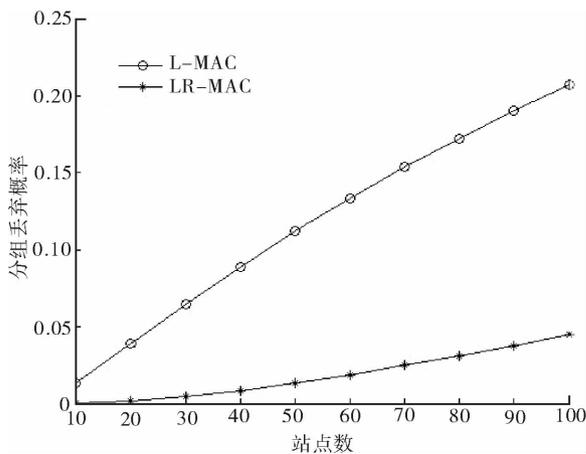


图 3 分组丢弃概率随站点数的变化

点数的增加,LR-MAC 机制和 L-MAC 机制的分组丢弃概率逐渐上升,这是因为随着站点数目的增加,站点间发送数据包发生的碰撞明显增加.

总体而言,本文提出的方法可以提高无线传感器网络的整体性能.

3 结语

针对 WSN 机制中站点成功发送数据包后立刻进行信道竞争所带来的问题,本文提出了一种新的适用于低速无线传感网络 MAC 层机制协议 LR-MAC. 该协议主要做出了如下改进:当站点成功发送数据后,先进行一段时间的退避,再参与信道的竞争. 试验结果表明:当网络规模发生变化时,LR-MAC 的饱和吞吐量明显优于 L-MAC 机制,且分组丢弃概率低于 L-MAC 机制. 下一步的工作将继续深入探讨如何提高高负载下无线传感器网络的综合性能.

参考文献:

- [1] Pollin S, Ergen M, Ergen S C, et al. Performance analysis of slotted carrier sense IEEE 802. 15. 4 medium access layer [C] // Proc of IEEE GLOBE-COM, San Francisco: IEEE Press, 2006: 1 - 6.
- [2] Zheng J, Lee J M. A Comprehensive Performance Study of IEEE 802. 15. 4. Sensor Network Operations [M]. New York: IEEE Press, 2006: 218 - 237.
- [3] Xiao Y, Pan Y. Differentiation QoS guarantee and optimization for real-time traffic over one-hop ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2005, 16(6) : 538.
- [4] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [5] Omprakash G, Rodrigo F. Collection tree protocol [C] // Proc of the 7th ACM Conf on Embedded Networked Sensor Systems, Berkeley: ACM Press, 2009.
- [6] 郑国强, 李建东, 周志立. 无线传感器网络 MAC 协议研究进展 [J]. 自动化学报, 2008, 34(3) : 305.
- [7] 孙利民, 李波, 周新运. 无线传感器网络的拥塞技术 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1) : 63.