

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2017.03.013

分层 M2M 网络中分簇节点 MAC 优化研究

刘云, 王海花

(昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明 650500)

摘要: 在密度节点分布的分层结构 M2M(Machine-to-Machine)网络中,同层簇头间和终端节点一般采用随机机制竞争信道,簇头或终端节点竞争信道机会相近,特别是簇头数据量较大就可能存在延时较大或丢包.为了减小簇头的延时和丢包率,提出了一种 BT-MAC 算法,在终端节点和簇头间竞争信道时,根据节点需发送数据量反比设定节点退避时间,因此簇头传输的数据量越大,算法设定的平均退避时间就越小,相当于簇头发送的优先级越高,从而减少碰撞,提高簇头接入信道的概率.仿真结果表明,对比常见的 DMAC 协议和 SMAC 协议,BT-MAC 算法能提高簇头接入信道概率达到较小的平均延迟,同时也能减少节点的平均能量消耗.

关键词: M2M 网络; 簇头; BT-MAC; 延时; 能量消耗

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2017)03-0504-05

The optimization of MAC in hierarchical M2M networks with cluster head

LIU Yun, WANG Hai-Hua

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In hierarchical M2M(Machine-to-Machine) networks with high-density of nodes, the interlayer cluster heads and terminal nodes generally adopt the random mechanism to compete channel, so cluster head or terminal nodes contend for the channel with similar opportunity, especially the cluster head has large amount of data to transmit, which may cause high delay or packet loss. In order to reduce delay and packet loss rate of cluster heads, then presents BT-MAC((Based on Traffic Medium Access Control) algorithm, when terminal nodes and cluster head compete channel, based on the amount of data to be sent algorithm with inverse proportion to set backoff time of the node. So the greater data cluster head transfer, the smaller average backoff time is, equivalent to set cluster head a higher priority, thereby collisions reduce, and the probability of cluster head increase. Simulation results show that BT-MAC algorithm can improve the channel access probability of cluster head thereby to achieve a smaller average delay and can reduce the average energy consumption of nodes, compared to the common DMAC protocol and SMAC protocol.

Keywords: M2M network; Cluster head; BT-MAC; Delay; Energy consumption

1 引言

随着物联网技术的发展,机器对机器(M2M)

通信正广泛应用于不同的领域^[1],特别在在大型物流系统高密度节点分布的物联网架构下,需要实现低成本、低延时和降低每个节点的能量消耗的分级

收稿日期: 2016-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(61262040)

作者简介: 刘云(1973-),男,云南昆明人,副教授,研究方向为无线通信. E-mail: liuyun@kmust.edu.cn

通讯作者: 王海花. E-mail: 871224384@qq.com

分簇节点的竞争接入控制优化一直是研究关注的热点.

USC/ISIDE 的 Wei Ye^[2-3] 等人较早提出了基于竞争的 SMAC 协议, SMAC 协议沿用了 802.11 的基本工作机制, 同时引入了周期性睡眠模式, 减小了空闲侦听带来的能量消耗, 降低了节点能耗. 由于周期性睡眠, 节点不一定能及时传递数据, 因此会使网络延时增加, 吞吐量降低. 为了减小网络延迟, Gang Lu^[4] 等人提出了 DMAC 协议, 该协议采用预先分配的方法来避免睡眠延迟, 并且引入了一种交错的监听睡眠调度机制, 从而减少数据在网络中的传输延迟. 但是 DMAC 协议不适用不规则数据流业务, 因此不适用有单个汇聚节点的分层 M2M 网络.

为了减小簇头的延时, 降低节点的平均能量消耗, 本文提出了一种 BT-MAC (Based on Traffic Medium Access Control) 算法, 该算法采用退避时间决定规则, 根据节点传输数据的量决定退避时间, 传输数据的量越大, 退避时间越小. 从而使簇头在接入信道时拥有高优先级, 避免了过多的竞争碰撞. 与 SMAC 和 DMAC 协议相比, BT-MAC 算法减少了延时和网络的能量消耗, 更适合高密度节点分布的 M2M 网络.

2 M2M 网络中竞争模型

分层结构的 M2M 网络由汇聚节点、簇头和终端节点组成. 底层终端节点发送数据给簇头并在簇头聚集后发送给汇聚节点, 或者直接发送给汇聚节点^[5].

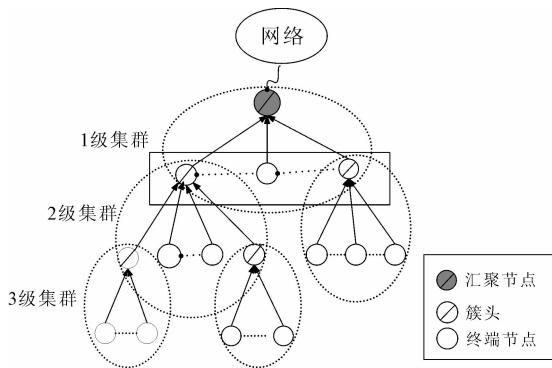


图 1 分层 M2M 网络模型

Fig. 1 The model of hierarchical M2M network

图 1 表示分层结构的 M2M 网络模型, 该网络中只有一个汇聚节点, 并且位于最顶层. 图中椭圆内的节点属于同一个集群, 方框内的节点表示同一

层. 共有 5 个集群, 每个集群有 100 个节点, 簇头和邻层节点是父-子关系, 因此簇头可能是下层节点的父节点, 也可能是上层节点的子节点, 属于同一集群的子节点通过竞争接入父节点的信道. 3 级集群的子节点都是终端节点, 并且随机独立的以不同速率产生数据, 可以随机竞争接入信道, 因此 MAC 协议可以采用 CSMA/CA^[6] (载波侦听多路访问/冲突避免); 2 级集群和 1 级集群的子节点中包括簇头和终端节点, 簇头传输的数据远远大于同一层终端节点传输的数据, 而在竞争信道时如果所有节点退避时间相近, 则会发生碰撞和重发, 增大簇头的延时或丢包率, 还会增加节点的能量消耗^[7-8], 因此考虑采用基于流量的退避机制.

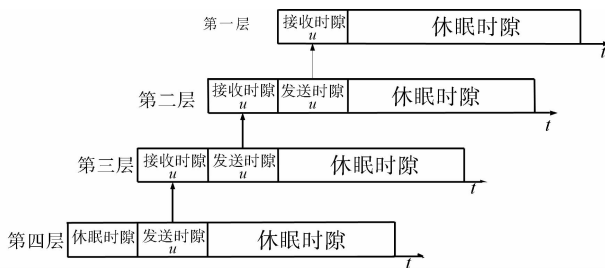


图 2 活动/休眠时间表

Fig. 2 Active/sleep schedule

由于簇头的任务包括数据融合、传输、处理, 负责传输的信息量庞大, 所以需要保持较高的同步精度. 对于分层结构的 M2M 网络, 采用如图 2 所示的按节点分层交错的活动/休眠时间表^[9,10]. 第一层对应图 1 的汇聚节点, 第二层对应 1 级集群的子节点, 以此类推. 定义接收时隙和发送时隙的长度相同, 都为 u , u 是通过系统设置的. 在休眠时隙, 节点不进行任何活动以节省能量; 节点发送时隙与下一跳节点接收时隙同步, 从而保证数据连续传输且避免了休眠延时^[11-14]. 综上所述, 采用基于流量的退避机制和按节点分层交错的调度机制能提高网络性能.

3 BT-MAC 算法

通过对 Q-CSMA^[15] 的分析并在此基础上, 提出了一种新的退避时间决定规则——BT-MAC 算法, 并且分析簇头采用 BT-MAC 算法时的信道接入概率, 验证此算法应用于有簇头的分层 M2M 网络的优越性.

3.1 退避时间决定规则

根据二进制指数随机退避算法, 当一个节点要发送数据时先检测信道, 信道空闲则发送数据; 如

果检测到信道忙碌,节点会等待一段随机时间后才发送数据;如果当前的退避时间到了而检测到信道仍然忙碌,退避时间就变成原来的两倍.由二进制指数随机退避算法确定的退避时间如下.

$$T_b = [2^i \times R] \times u \quad (1)$$

R 在一个周期 $[0, 1]$ 内均匀分布, $[2^i \times R]$ 是截断函数. i 是一个非负的变量,其初始值也是通过系统设置的,并且随着退避时间的更新而增加直到达到最大值 i_{\max} .若 i 达到最大值后信道仍然忙碌,则丢弃相关的数据包.

二进制随机退避算法适用于节点随机竞争信道,而在有簇头的分层结构 M2M 网络中,为了避免簇头延时较大或丢包,给簇头设置优先级,采用基于流量的退避时间决定规则算法表示如下.

$$T_b = \left[\frac{2^i}{f(N)} \times R \right] \times u \quad (2)$$

$$f(N) = L_p \times N \quad (3)$$

L_p 是终端节点的数据包长度.如果进行退避的是终端节点,则 $N=1$, $f(N)$ 是终端节点发送的数据量;如果进行退避的是簇头节点,则 N 是涉及到的已经把数据发送给此簇头的终端节点的数量, $f(N)$ 是簇头融合的数据量.因此退避时间是基于流量的, N 越大,退避时间越小,信道接入概率越大.

根据式(2),当 $(2^i / f(N)) \times R$ 小于 1 时,簇头的退避时间约为 0;当有两个簇头时,每个簇头的 $(2^i / f(N)) \times R$ 值都小于 1,在竞争信道时两个簇头的退避时间都特别小,则会立即发生碰撞并且重复碰撞直到两个簇头的 $(2^i / f(N)) \times R$ 值不同.为了避免簇头的数据被过早的丢弃,把簇头的 i_{\max} 设置成

$$i_{\max} = \log_2 N + i_{\max_ter} \quad (4)$$

其中, i_{\max_ter} 是终端节点 i 的最大值.所有节点 i 的初始值是相等的,因此节点的数据量决定节点接入信道的优先级.

3.2 簇头信道接入概率的分析

M2M 网络是低数据率的网络,在发送时隙的开始就退避的终端节点的数量很少.因此,当簇头开始退避时,进行退避的终端节点的数量最多有一两个,这种情况有利于分析簇头的信道接入概率.首先假设退避的终端节点的数量是 1. $c\omega_{ter} = 2^i$ 是终端节点竞争窗口的长度, $c\omega_{ch} = [c\omega_{ter} / N]$ 是簇头竞争窗口的长度,簇头和终端节点初始的 i 相同.如果离散随机变量 X 和 Y 分别是终端节点和

簇头的退避时间,则 X 和 Y 的概率密度函数如下.

$$f_X[m] = \begin{cases} \frac{1}{c\omega_{ter}}, & (0 \leq m \leq c\omega_{ter} - 1) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_Y[m] = \begin{cases} \frac{N}{c\omega_{ter}}, & (0 \leq n \leq c\omega_{ch} - 1) \\ 1 - \frac{N}{c\omega_{ter}} c\omega_{ch}, & (n = c\omega_{ch}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

簇头为了成功发送数据,必须满足 $p_r(Y < \Delta X + X)$, ΔX 是一个随机的偏移时间. $p_r(Y < \Delta X + X)$ 可以分成两部分:

$$p_r(Y < \Delta X + X) = p_r(Y \leq X) + p_r(X < Y < \Delta X + X) \quad (7)$$

由于 Y 远远小于 X ,所以 $p_r(X < Y < \Delta X + X)$ 可以忽略不计,因此 $p_r(Y < \Delta X + X) \approx p_r(Y \leq X)$. P_n 是簇头与终端节点第 n 次竞争接入信道时成功接入概率, p_1 可以表示为

$$\begin{aligned} p_1 &= P_r(Y \leq X) = \\ & \sum_{k=0}^{c\omega_{ter}} P_r(Y \leq X | Y = k) P_r(Y = k) = \\ & \sum_{k=0}^{c\omega_{ter}} \left(1 - \frac{k}{c\omega_{ter}}\right) \frac{N}{c\omega_{ter}} + \\ & \left(1 - \frac{c\omega_{ch}}{c\omega_{ter}}\right) \left(1 - \frac{N}{c\omega_{ter}} c\omega_{ch}\right) = \\ & c\omega_{ch} \left(1 - \frac{c\omega_{ch} - 1}{2c\omega_{ter}}\right) \frac{N}{c\omega_{ter}} + \\ & \left(1 - \frac{c\omega_{ch}}{c\omega_{ter}}\right) \left(1 - \frac{N}{c\omega_{ter}} c\omega_{ch}\right) = \\ & 1 - \frac{c\omega_{ch}}{c\omega_{ter}} \left(N \frac{c\omega_{ch}}{c\omega_{ter}} - 1\right) - \frac{N}{2} \frac{c\omega_{ch} (c\omega_{ch} - 1)}{c\omega_{ter}^2} \end{aligned} \quad (8)$$

由式(5)可得, $(c\omega_{ch} N) / c\omega_{ter} \approx 1$, $(c\omega_{ch} - 1) / c\omega_{ter} \approx 1 / (N + 1)$, 因此,

$$p_1 \approx 1 - \frac{1}{2(N + 1)} \quad (9)$$

比如,当 $N=3$ 时,第一次退避之后 $p_1 \approx 0.88$.

p_2 是簇头在第一次与终端节点竞争信道时失败第二次竞争成功的概率.

$$\begin{aligned} p_2 &\approx p_r(Y > X_1) p_r(Y - X_1 \leq X_2) \approx \\ & \frac{1}{2(N + 1)} (1 - p_r(X_1 + X_2 - Y \leq 0)) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, X_1 和 X_2 是终端节点第一次和第二次的退避时间且独立同分布, X_1 和 X_2 的时间差假设为 0. 考虑到两个离散随机变量之和的概率密度函数的连续卷积, $P_r(X_1 + X_2 - Y \leq 0)$ 可以表示为

$$\begin{aligned}
 P_r(X_1 + X_2 - Y \leq 0) = & \\
 & \frac{N}{c\omega_{ter}^3} \left(\frac{c\omega_{ch}(c\omega_{ch} + 1)(c\omega_{ch} + 2)}{6} + \right. \\
 & \left. \left(\frac{c\omega_{ter}}{N} - c\omega_{ch} \right) \frac{(c\omega_{ch} + 1)(c\omega_{ch} + 2)}{2} \right) = \\
 & \frac{N}{c\omega_{ter}^3} \left(\left(\sum_{k=0}^{c\omega_{ch}} \sum_{r=1}^k r \right) + \left(\frac{c\omega_{ter}}{N} - c\omega_{ch} \right) \sum_{r=1}^{c\omega_{ch}+1} r \right) \quad (11)
 \end{aligned}$$

根据式(7)和式(8),簇头两次退避的信道接入概率为

$$\begin{aligned}
 p_1 + p_2 \simeq & \\
 & 1 - \frac{1}{2c\omega_{ter}^3} \left(\frac{c\omega_{ch}(c\omega_{ch} + 1)(c\omega_{ch} + 2)}{6} + \right. \\
 & \left. \left(\frac{c\omega_{ter}}{N} - c\omega_{ch} \right) \frac{(c\omega_{ch} + 1)(c\omega_{ch} + 2)}{2} \right) \quad (12)
 \end{aligned}$$

由于 $(c\omega_{ter}/N) - c\omega_{ch} \simeq 0$, 因此 $p_1 + p_2$ 可以表示为

$$p_1 + p_2 \simeq 1 - \frac{1}{12N^2(N+1)} \quad (13)$$

根据式(13),当 $N=3$ 时, $p_1 + p_2 \simeq 0.997$. 因此,若 $N \geq 3$ 且退避次数不超过两次时,簇头的信道接入概率约为 1.

4 仿真分析

对比 SMAC 协议、DMAC 协议和 BT-MAC 算法的相关性能,用 MATLAB 对其仿真. 仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数表

Tab. 1 The data of simulation

参数名	参数值
调度周期	200 ms
占空比	10%
发送周期 u	10 ms
接收周期 u	10 ms
数据传输率	100 kbps
数据产生率	1/3s, 2/3s
终端节点数据包长度	100 bits
i 最小值	2
i 最大值	6
时隙	100 us
发送/接收/空闲功率	0.66/0.39/0.35w

仿真节点的数目为 $N=500$. 仿真图如下.

图 3 表示在不同的数据产生率下三种算法的平均延迟. 随着节点数量的增加,BT-MAC 算法、DMAC 协议和 SMAC 协议平均延时随之增加. 从

图中可以看出,节点数量和传输率相同时,BT-MAC 算法和 DMAC 协议的延时远远小于 SMAC 协议. 当仿真节点总数是 500,传输率是 1/3 s 时,BT-MAC 算法平均延时比 DMAC 协议减少 18%; 当传输率是 2/3 s 时,BT-MAC 算法平均延时比 DMAC 协议减少 23%.

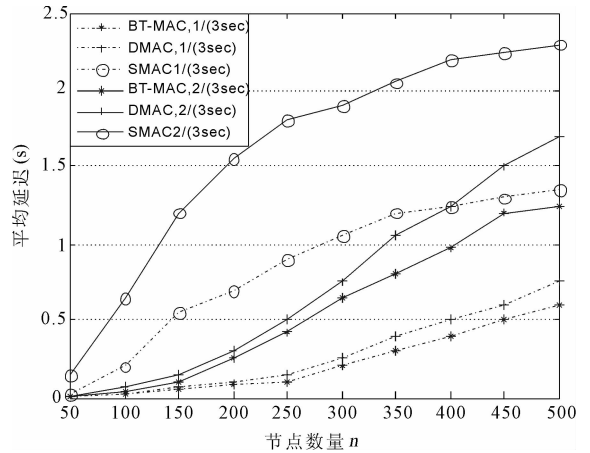


图 3 不同数据产生率下 BT-MAC、DMAC 和 SMAC 平均延迟比较

Fig. 3 The comparison of average delay between BT-MAC, DMAC and SMAC under different data rate

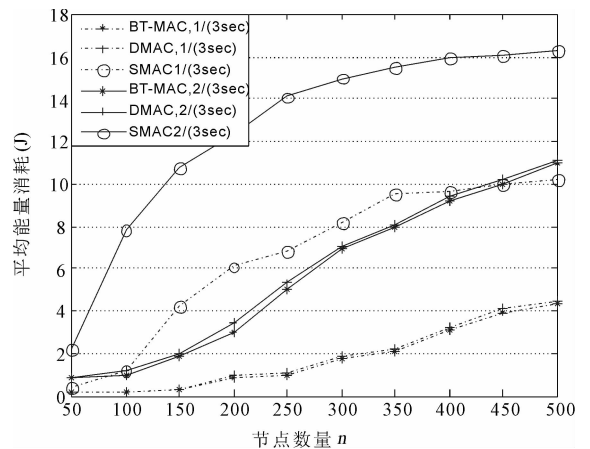


图 4 不同数据产生率下 BT-MAC、DMAC 和 SMAC 平均能量消耗比较

Fig. 4 The comparison of energy consumption between BT-MAC, DMAC and SMAC under different data rate

图 4 表示不同数据产生率下的平均能量消耗对比. 节点数量和传输率相同时,DMAC 和 BT-MAC 的平均能量消耗都远远小于 SMAC,BT-MAC 比 DMAC 略小. 在节点总数是 500、传输率是 1/3 s 时,BT-MAC 的节点平均能量消耗比 DMAC 减少约 5%. 因此 BT-MAC 算法在平均延

时和能量消耗方面都优于 DMAC 协议和 SMAC 协议。

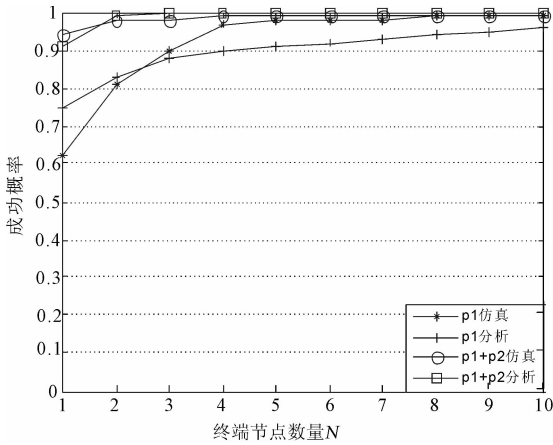


图 5 簇头信道接入概率

Fig. 5 The probability of cluster heads access channel

图 5 表示用 BT-MAC 算法时簇头的信道接入概率. 分析结果和仿真结果在一定程度上是一致的, 随着 N 的增大, p_1 与 $p_1 + p_2$ 的差距逐渐减小并且越来越趋近 1. 结论证明, BT-MAC 算法能增大簇头信道接入概率。

5 结 论

为了减小高密度节点分布的分层 M2M 网络中簇头的延时和能量消耗, 提出了一种 BT-MAC 算法, 用来提高簇头竞争信道的接入概率. 该算法采用退避时间决定规则, 根据节点的流量反比设置退避时间, 簇头传输的数据量越大, 退避时间越小, 优先级越高, 从而成功接入信道的概率越大. 仿真结果与 DMAC 协议^[4]、SMAC 协议^[2,3]相比, BT-MAC 能达到小的平均延时并且能减小节点的能量消耗。

参考文献:

[1] Kim J, Lee J, Kim J, *et al.* M2M service platforms: Survey, issues, and enabling technologies [J]. IEEE Commun Surv Tuts, 2014, 16: 61.

[2] 陶志勇, 袁永财. 适用于 S-MAC 协议的自适应随机退避机制研究 [J]. 计算机应用与软件, 2015 (12): 51.

[3] Huu P N, Tran-Quang V. An efficient method for gathering data considering energy and delay time on WSNs [C] // Proceedings of IEEE 5th International

Conference on Communications and Electronics, Vietnam: Hanoi University of Science and Technology, 2014.

- [4] 刘云璐, 蒲菊华, 方维维, 等. 一种无线传感器网络 MAC 协议优化算法 [J]. 计算机学报, 2012, 35 (3): 529.
- [5] Liu Y, Yuen C, Chen J, *et al.* A scalable Hybrid MAC protocol for massive M2M networks [C] // Wireless Communications and NETWORKING Conference. [S. L.]: IEEE, 2013: 250.
- [6] Hazmi A, Rinne J, Valkama M. Feasibility study of IEEE 802.11ah radio technology for IoT and M2M use cases [C] // Proceedings of IEEE Globecom Workshops, United Kingdom: University of Surrey, 2012.
- [7] Cheng C T, Tse C K, Lau F C M. An energy-aware scheduling scheme for wireless sensor networks [J]. IEEE Trans Veh Technol, 2015, 59: 3427.
- [8] 罗娅, 陈文. 一种安全的无线传感器网络分布式决策融合方法 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2015, 52(3): 499.
- [9] Beaudaux J, Gallais A. Heterogeneous MAC duty-cycling for energy-efficient internet of things deployments [C]. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2013.
- [10] Yang O, Heizelman W. Modeling and performance analysis for duty-cycled MAC protocols with applications to S-MAC and X-MAC [J]. IEEE TMC, 2012, 11(6): 905.
- [11] Rong B, Ephremides A. Cooperative Access in Wireless Networks: Stable Throughput and Delay [J]. IEEE Trans Inf Theory, 2012, 58: 5890.
- [12] 刘菁原, 刘云. WSN 中可容定位误差的地理位置路由算法优化研究 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2015, 52(2): 338.
- [13] Cheng C T, Tse C K, Lau F C M. A delay-aware data collection network structure for wireless sensor networks [J]. IEEE Sens J, 2011, 11: 699.
- [14] Verma P K, Verma R, Prakash A, *et al.* Throughput-Delay evaluation of a Hybrid-MAC protocol for M2M communications [J]. Int J Mobile Comput Mult Commun, 2016, 7: 41.
- [15] Ni J, Tan B, Srikant R. Q-CSMA: queue-length-based CSMA/CA algorithms for achieving maximum throughput and low delay in wireless networks [J]. Proc IEEE Infocom, 2015, 20(3): 1.