

EASA:一种分簇 Ad Hoc 网络高效自适应 TDMA 时隙分配算法

马 柯,俞能海,杨福荣

(中国科学技术大学,安徽合肥 230027)

摘 要: 提出一种适合于分簇 Ad Hoc 网络的高效自适应 TDMA 时隙分配算法 EASA. EASA 采用动态调整帧长以及根据簇内节点 MAC 层缓存队列长度进行自适应的时隙分配,解决了传统 TDMA 时隙分配算法中低传输速率节点占用不必要时隙的问题. 多个场景的实验结果表明,与传统 TDMA 时隙分配算法以及 802.11 相比, EASA 可以大大提高网络吞吐量,很好的提高网络整体性能.

关键词: 时分多址接入 (TDMA); 时隙分配算法; 分簇 Ad Hoc 网络

中图分类号: TP393.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 07-1678-05

EASA: An Efficient Adaptive TDMA Slot Assignment Protocol for Clustered Ad Hoc Network

MA Ke, YU Neng-hai, YANG Fu-rong

(University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract: TDMA has been introduced into ad hoc networks because of its ability to provide collision-free packet transmission. Slot assignment protocol is a vital part of TDMA technique which can affect the throughput of the network significantly. EASA, a novel efficient adaptive slot assignment protocol for clustered ad hoc TDMA network is proposed. The effectiveness of EASA has also been verified by simulation experiments in different scenarios. It is proved by simulation results that EASA can increase throughput of the network dramatically.

Key words: TDMA; slot assignment algorithm; clustered ad hoc network

1 引言

随着无线通信技术和硬件的发展,对无线 Ad Hoc 网络的关注越来越多. TDMA(时分多址接入)是一种提供无碰撞数据传输的 MAC 层技术,正因如此,如何在无线 Ad Hoc 网络中特别是分簇无线 Ad Hoc 网络中应用 TDMA 技术的研究也越来越多.

TDMA 技术将时间分为一个个的帧,每个帧中又分为若干个时隙^[1]. 通过将时隙分配给不同的节点, TDMA 可以调度各个节点在不同的时隙发送数据,从而提供无碰撞的数据包传输. 因此时隙分配是 TDMA 中最重要的部分,国内外的研究者在 TDMA 时隙分配算法上也做了许多工作. 许多研究者专注于寻找一种可以为全网提供无碰撞数据传输的时隙分配算法,这是一个广播调度问题(BSP),这一问题于 1981 年首先由 Baker 等人提出^[2], 而其中的一个子问题 TDMA 周期最小化问题于 1984 年被 Even 等人证明为是一个 NP-hard 问题^[3]. 各种不同的方法,如 MFA^[4]、混合算法 HNN-GA^[5]、遗传算

法^[6]以及基于模糊神经网络的算法^[7]都被提出以解决广播调度问题. 然而这些算法虽然可以解决广播调度问题,他们计算的时间都非常的长,无法真正应用到节点移动较为频繁且节点很难了解全网拓扑的 Ad Hoc 网络中. 同时秦勇等人研究了 TDMA 时隙分配对网络整体时延的影响^[8],发现 TDMA 时隙分配可以很大程度上改变网络性能,选取良好的时隙分配算法非常重要.

考虑到无线 Ad Hoc 网络不断变化的拓扑,时隙分配算法 ASAP 于 2003 年由 Kanzaki 提出^[9]. 2005 年 Kanzaki 进一步改进了 ASAP 算法并提出了 E-ASAP 算法. ASAP 和 E-ASAP 旨在利用节点的自主行为增强信道利用率. 近来一些旨在解决 TDMA 信道利用率不高的时隙分配算法^[10~15]也被提出. 然而这些算法和协议并未考虑到影响信道利用率的关键因素:一个节点在被分配了时隙后,是否有在此时隙内发送数据的意愿. 如果很多时隙都被分配到无须传输数据的节点,那信道利用率必然会非常低. 我们提出利用节点 MAC 层缓存队列长度分配时隙的 EASA 算法, EASA 可以用于分簇 Ad Hoc 网络.

2 EASA 的设计思想

时隙分配通常分两步完成: 第一步为设定帧长, 第二步为将时隙分配给节点. 每一个节点都至少需要被分配一个时隙以保证节点间信息的交互. 大部分的时隙分配算法旨在设定最小的帧长以降低时延. 通常在一个 TDMA 网络中最小帧长为节点传输范围内的节点数量, 传统的 TDMA 的时隙分配就是为每一个节点分配平均数量的时隙. 如果每个节点的数据传输需求相差很大, 信道利用率就会比较低. 而如果将帧长设定为比节点数量大的长度, 就可以通过别的手段提高信道利用率. 例如, 在一个八个节点的网络中, 传统的 TDMA 时隙分配算法将把帧长设定为 8, 并给每个节点分配一个时隙, 如图 1 中上半部分所示. 这时每个节点将占用 12.5% 的信道带宽. 若在此网络中只有一个节点 (如节点 5) 在发送数据, 其发送数据的速率为每 8 个时隙 3 个包, 则整个网络信道利用率只有 12.5%, 同时节点 5 的传输需求也无法得到满足. 如果我们将帧长设定为 16, 并将前 8 个时隙平均分配给 8 个节点, 后 8 个时隙分配给节点 5, 则信道利用率可以达到 37.5%. 节点 5 的传输需求得到了满足, 每个数据包都可以及时的被发送, 这样数据包时延也不会增大, 图 1 的下半部分给出了帧长为 16 时的时隙分配.



图1 第一个8节点网络的时隙分配示意

在多个节点需要传输数据的场景中, 使用较长的帧长也可以获得性能的提升, 这时需要根据每个节点不同的传输需求将额外的时隙按比例分配给有需求的节点. 以上述 8 个节点的网络为例, 其中有一个节点以 1 个包每 8 时隙、一个节点以 2 个包每时隙、一个节点以 3 个包每时隙的速率发送数据. 图 2 给出了传统的时隙分配和帧长为 16 的时隙分配, 显然后者能够取得较高的信道利用率及吞吐量. 基于这些例子, 我们推断使用较长的帧长并且将额外时隙按比例分配给需要传输数据的节点将有助于提高网络性能. 通过进一步的研究, 我们给出了如下定理:



图2 第二个8节点网络的时隙分配示意

定理 1 在一个拥有 N 个节点的网络中, 每个节点可以相互通信, 节点 i 以一个给定速度 V_i (单位为包/时隙) $i = 1, 2, \dots, N$ 传输数据, 将存在一个帧长 F , 当帧长 F 小于 F_i 时节点传输数据的需求将不能被满足.

证明 当帧长为 F 时, 一个帧共可以传输 F 个数据包. 由于 TDMA 需要为一个节点至少分配一个时隙, 只有剩余的时隙可以被动态分配, 所以在剩余 $F-N$ 个时隙中需要被传输的数据包个数 P 可以由式 (1) 计算得出:

$$P = \sum_{i=1}^N \max(V_i * F - 1, 0) \quad (1)$$

为了能满足所有节点的数据传输需求, 帧长 F 必须大于等于 $P + N$, 所以 F_i 就应当与 $P + N$ 相等. 对于给定的所有节点的数据包传输速率集合 V_i , F_i 可以用式 (2) 计算得出:

$$F_i = \sum_{i=1}^N \max(V_i * F_i - 1, 0) + N \quad (2)$$

然而, MAC 层的各个协议和算法并不能了解到当前的节点数据包传输速率, 所以我们不能直接利用数据包传输速率. EASA 使用 MAC 层的缓存队列长度来决定是否需要增大帧长以及时隙的分配. 每个节点的 MAC 层缓存队列长度由每个节点在每个帧的前 N 个时隙中发布, 由于数据量较小, 我们在 MAC 层包头中添加一个队列长度域以保存节点的缓存队列长度. 每个节点通过收集其他相邻节点的缓存长度以计算下一帧的帧长以及一帧中除了前 N 个时隙外的时隙分配.

除此之外, 如何确定帧长也是一个问题. 帧长过长会浪费许多时隙, 同时会增大时延, 帧长过短则会导致节点的传输需求无法得到满足, 信道带宽得不到充分利用. 增大帧长是为了增加信道利用率, 如果所有节点的缓存队列长度都很短而且并不增长, 则说明当前帧长可以满足所有节点的传输需求, 没有必要对其进行扩充, 因此 EASA 将只在当有一个或多个节点的缓存队列长度超过一定限额之时加倍帧长. 当所有节点的缓存队列长度都接近 0 时, 说明当前帧长有浪费时隙的嫌疑, 应当进行缩短, 所以 EASA 将在所有节点缓存队列长度都接近 0 时将帧长减半.

3 EASA 详细细节

在此我们给出 EASA 的一些定义及假设. EASA 是一个应用在分簇 Ad Hoc 网络中的 TDMA 时隙分配算法, 簇内的每个节点都能互相联系, 簇内的节点使用统一的帧长. 簇中的节点数量定义为 N , 簇中的节点 i 以 N_i 表示, 其中 i 为 1 至 N 间的整数. 节点 i 的 MAC 层缓存队列长度定义为 Q_i , 我们假定网络内的所有节点都是相同的, 其最大队列长度定义为 Q_{\max} . S_i 表示分配给

节点 i 的时隙数量, F 表示簇内的帧长, F_{\max} 表示算法允许的最大帧长。

EASA 是一种分布式算法, 每个节点都将运行一份 EASA 的副本. EASA 由三个步骤组成: 收集节点缓存队列长度、增加/减少或保持帧长及时隙分配. 下面具体给出三个步骤中节点的相应行为:

步骤 1 N_i 将在帧中的前 N 个时隙中被分配到一个时隙, 若 N_i 有数据包要传输, 则 N_i 将自身的 Q_i 写入此数据包的 MAC 包头中并进行发送, 若 N_i 无数据包传输则其发送一个空报文, Q_i 将被写入此空报文的 MAC 包头中. 节点通过侦听帧中的前 N 个时隙获取其他节点的缓存队列长度.

步骤 2 一个帧结束后, 节点检查其收集到的其他节点的 Q_i , 若一个或多个节点的 Q_i 大于等于 $Q_{\max}/2$ 且 F 小于 $F_{\max}/2$, 节点将下一帧的 F 加倍. 若所有节点的 Q_i 均小于 $Q_{\max}/10$ 且 F 大于 $2NC$, 节点将下一帧的 F 减半.

步骤 3 一个帧中的前 N 个时隙是保留的, 每个节点将在其中分配到一个时隙. 其余的时隙将依据节点的 Q_i 按照节点编号为序进行分配. S_i 可以以式 (3) 计算得出:

$$S_i = Q_i \times \frac{F - N}{\sum_{j=1}^N Q_j} \quad (3)$$

EASA 的流程如图 3 所示:

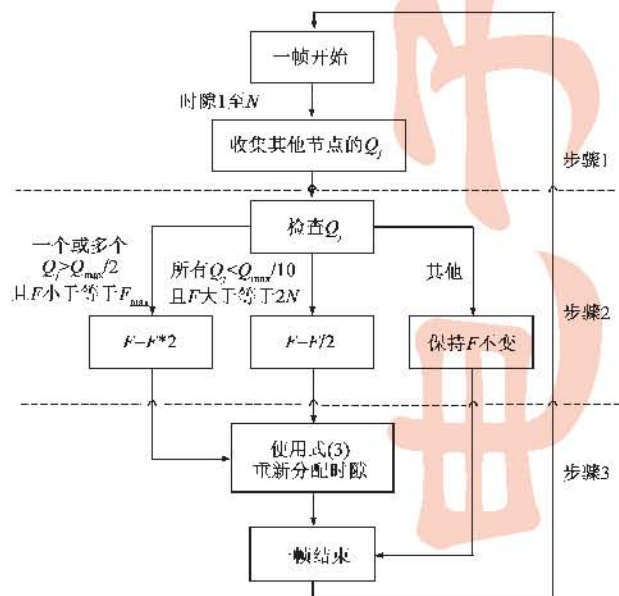


图3 EASA流程图

由于网络内的节点不需要使用额外的数据包来进行同步, EASA 的开销是很小的. EASA 只使用在 MAC 包头中添加的一个一字节长的域, 其在一个 N 节点的簇中的开销可以用式 (4) 计算得出:

$$O = \frac{N}{\sum_{i=1}^F L_i} \quad (4)$$

式 (4) 中的 L_i 表示在时隙 i 中所需传输的数据包长度, 通常来说 EASA 的开销 O 是小于 1% 的数.

4 仿真及结果分析

本文的仿真是在 NS2 平台下进行的, 我们在 3 个网络共 12 个仿真场景下进行了实验, 将 EASA 和传统 TDMA 及 802.11 的性能进行了比较. 网络中节点缓存大小设定为 50 个报文, 报文大小固定为 512 字节, 每个节点都被随机分配从 1 报文/秒到 10 报文/秒之间的数据传输速率. 我们定义 1 报文/秒至 4 报文/秒间的数据传输速率为低速, 4 报文/秒至 7 报文/秒为中速, 7 报文/秒至 10 报文/秒为高速. 网络中节点随机分配到各个簇中, 簇内节点之间可以直接通信, 簇间通信需要经簇头中转.

仿真在 3 个包含 4 个簇的网络中进行, 这 3 个网络分别由 20 个节点、40 个节点和 60 个节点组成. 在每个网络中我们进行 4 次实验, 每次实验的节点数据包传输速率分布不同, 分别为平均、低速高概率分配、中速高概率分配及高速高概率分配, 其中低速、中速及高速高概率分配中节点被分配到低速、中速及高速数据包传输速率的几率增加.

图 4、图 5 和图 6 为 20 个节点、40 个节点及 60 个节点网络中的仿真实验结果. 从图 4 中可以看出, EASA、TDMA 和 802.11 在 20 个节点的网络中的性能几乎相同, 这是因为每个簇内只有 5 个节点, 802.11 发生碰撞的概率非常低, TDMA 设定的帧长很短, 都能够满足节点数据传输需求. 如图 5 所示, 在 40 个节点的网络中, 当数据流量较低时三种算法性能相近, 而当数据流量上升时, 使用 EASA 时的网络吞吐量比 TDMA 及 802.11 要高. 在 60 个节点的网络中, 如图 6 所示, 不论数据流量低还是高, EASA 能获得的吞吐量都大大高于其他两个算法. 随着数据流量的增加, 使用 TDMA 和 802.11 时的网络吞吐量基本都没有增加, 这主要是因为节点密度高时使用 802.11 的碰撞几率就会大大增加而节点较

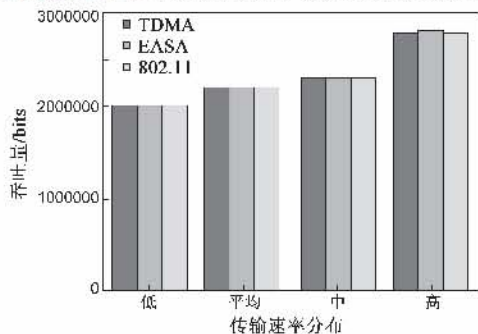


图4 20个节点网络吞吐量

多时固定的帧长无法高效的利用带宽. 在整个 60 个节点网络的实验中使用 TDMA 和 802.11 获得的网络吞吐量都只有 EASA 的 70% 至 78%.

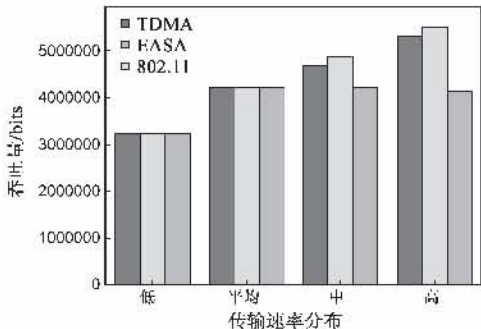


图5 40个节点网络吞吐量

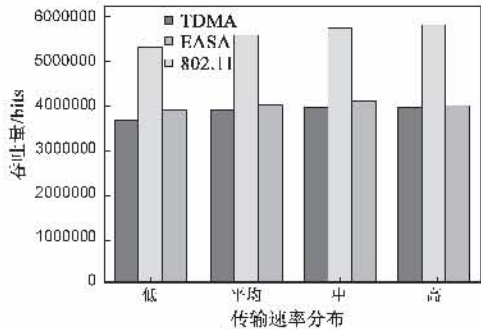


图6 60个节点网络吞吐量

表 1 为三个算法的数据包丢弃率,随着节点数量和数据流量的增加,数据包丢弃率将会提高.在 40 个节点和 60 个节点的网络中,数据流量较大时 802.11 的数据包丢弃率很高.而由于使用的是固定帧长,TDMA 的数据包丢弃率在 40 个节点和 60 个节点的网络中也比较高.与 TDMA 和 802.11 相比 EASA 在节点密度较大的网络中其数据包丢弃率依然比较低.

表 1 数据包丢弃率

	数据流量	TDMA	EASA	802.11
20 节点网络	低	0.0004	0.0004	0.0002
	平均	0.0005	0.0005	0.0003
	中等	0.0007	0.0006	0.0005
	高	0.0009	0.0008	0.0008
40 节点网络	低	0.0038	0.0020	0.0015
	平均	0.0277	0.0033	0.0027
	中等	0.0298	0.0032	0.0031
	高	0.065	0.008	0.19
60 节点网络	低	0.167	0.058	0.168
	平均	0.206	0.078	0.322
	中等	0.212	0.088	0.389
	高	0.284	0.125	0.465

5 总结和展望

本文提出了一种新的 MAC 层 TDMA 时隙分配算法 EASA. EASA 是一个高效自适应的时隙分配算法,它使

用动态的相比与传统 TDMA 来说较长的帧长,并使用节点的 MAC 层缓存队列长度动态的对时隙进行分配.实验结果表明了使用 EASA 可以获得较好的网络性能,特别是在节点密度较高的网络或数据传输率较高的网络中,使用 EASA 获得的性能提升将大大提高.

参考文献:

[1] T C Hou. On the cluster based dynamic channel assignment for multihop ad hoc networks[J]. Journal of Communications and networks, 2002, 4(1): 40 - 47.

[2] Baker D. The architectural organization of a mobile radio network via a distributed algorithm [J]. IEEE Transactions on Communications, 1981, 29(11): 1694 - 1701.

[3] S Even. On the NP-completeness of certain network testing problems[J]. Networks, 1984, 14(1): 1 - 24.

[4] Gangsheng Wang. Optimal broadcast scheduling in packet radio networks using mean field annealing[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1998, 9(6): 1292 - 1300.

[5] Salcedo-Sanz S. A hybrid Hopfield network-genetic algorithm approach for the terminal assignment problem[J]. IEEE Transactions on system, man and cybernetics, 2004, 34(6): 2343 - 2353.

[6] Zhang Xizheng. Efficient broadcast scheduling based on hybrid fuzzy hopfield network for ad hoc networks[A]. Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery[C]. Hai Kou, China: Hainan University, 2007. 555 - 560.

[7] Kanzaki A. Dynamic TDMA slot assignment in ad hoc networks[A]. Proceedings of 17th International Conference on Advanced Information Networking and Applications[C]. Xi'an, China, 2003. 330 - 335.

[8] 秦勇, 张军. TDMA 时隙分配对业务时延性能的影响分析[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2277 - 2283.

Qin Yong, Zhang Jun. Effect of TDMA timeslot assignment on traffic delay[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2277 - 2283. (in Chinese)

[9] Kanzaki A. On TDMA slot assignment protocol considering the existence of unidirectional wireless links in ad hoc sensor networks[A]. Proceedings of 7th International Conference on Mobile Data Management[C]. Nara, Japan, 2006. 125 - 125.

[10] Barnawi A. Performance of TDMA scheduling algorithms in the presence of data correlation in sensor networks[A]. Proceedings of 21st Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Niagara Falls[C], Ontario, Canada, 2008. 675 - 680.

[11] Yu Wang. A deterministic distributed TDMA scheduling algorithm for wireless sensor networks[A]. Proceedings of 3rd International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing[C]. Shang Hai, China: IEEE Com-

munications Society, 2007. 2759 – 2762.

- [12] Taormina. Reducing inter-cluster TDMA interference by adaptive MAC allocation in sensor networks[A]. Proceedings of First International IEEE WoWMoM Workshop on Autonomic Communications and Computing, Washington[C]. DC, USA: IEEE Computer Society, 2005. 507 – 511.
- [13] Haigang Gong. A two level TDMA scheduling protocol with intra-cluster coverage for large scale wireless sensor network[J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2006, 6(2B): 77 – 84.
- [14] T Wu. A self-reorganizing slot allocation protocol for multi-cluster sensor networks[A]. Proceedings of 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks[C]. Los Angeles, California, USA: IEEE Signal Processing Society, 2005. 309 – 316.
- [15] Xiong Zhuang. A TDMA-based protocol and implementation for avoiding inter-cluster interference of wireless sensor network[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology[C]. Gippsland, Australia: IEEE Computer Society, 2009. 1 – 6.

作者简介:



马 柯 男, 1982 年生, 中国科学技术大学电子工程与信息科学系博士生, 2006 年毕业于中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 获工学硕士学位, 主要研究领域为延时容忍网络协议. E-mail: make@mail.ustc.edu.cn



俞能海 男, 1964 年生, 教授、博士生导师. 1992 年 3 月毕业于清华大学电子工程系, 获工学硕士学位, 后获中国科技大学信息与通信工程学科工学博士学位. 现担任中国科学技术大学信息处理中心主任, 多媒体与通信教育部-微软重点实验室执行主任. 1999 年, 在日本东京大学做访问学者, 2004 年 1 月到香港中文大学做学术交流, 2008 年在美国哥伦比亚大学做高级访问学者. 主要研究方向: 宽带网络与多媒体通信, 网络多媒体信息检索与数据挖掘, 数字媒体安全等, 已发表学术论文 100 余篇.