

doi: 10.7690/bgzdh.2015.05.009

无线网格网 MAC 层协议研究

张记瑞, 黄圣春, 魏急波

(国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 针对有线网络已经不能满足人们对信息的获取要求的问题, 设计一种基于集中式动态分配的 TDMA 无线网格网 MAC 协议。基于时分多址技术(time division multiple access, TDMA), 分别分析了分布式和集中式 TDMA 网络结构。建立了一种集中式 TDMA 网络模型, 得到模型的时隙分配过程, 并对该网络设计协议进行 opnet 仿真测试。仿真结果表明: 集中式动态 TDMA 协议时延较小, 丢包大小也较少, 性能较为均衡。

关键词: 无线网格网; 时隙分配; 集中式; 动态分配

中图分类号: TP393.02 **文献标志码:** A

Research of MAC Protocols in Wireless Mesh Network

Zhang Jirui, Huang Shengchun, Wei Jibo

(School of Electrical Science & Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: We designed a time division multiple access (TDMA) wireless mesh network MAC protocol based on centralized dynamic allocation aiming at the problem that wired network cannot meet the requirement of getting information. We analyzed the distributed and centralized TDMA network structures separately based on TDMA. Then we built a centralized TDMA network model, got the time slot assignment progress of the models, and did opnet simulation tests to the network design protocol. The simulation results show that the centralized model has less time-delay and package-loss, has a more balanced performance.

Keywords: wireless mesh network; time slot allocation; centralized; dynamic allocation

0 引言

随着移动互联网的发展, 有线网络已经不能满足人们对信息的获取, 因此, 无线网格网(wireless mesh networks, WMN)技术应运而生^[1]。无线网格网由多个具有无线收发装置的网络节点构成。网络健壮性能较好, 具有自组织、自治愈等特点, 当部分网络节点损毁后, 不会影响整个网络的信息传输, 可避免在有线网络中由于基站或线路损毁导致的通信中断。区别于传统的单跳网络, 无线网格网具有多跳延展、网状拓扑等特点。无线网格网不依赖固定的基础设施, 可随时、随地便捷组网, 使得网络拓扑变化更加多样, 网络的延展性能得到提高。无线网格网的应用前景广阔, 不仅可以为商场、临时的大型活动中心进行组网, 也可以用于在有线网络设备设施损毁时的应急通信救援^[2]。基于此, 笔者对无线网格网 MAC 层协议进行研究。

1 基于 TDMA 的无线 Mesh 网络模型

时分多址技术^[3](time division multiple access, TDMA)是将时间分割成多个周期性的时帧(time

frame), 又将这些时帧划分为多个时隙(time slot)向基站发送信号, 在满足定时和同步的条件下, 基站可以分别在各时隙中接收到各终端的信号而不发生干扰。同时, 基站向各网络节点的传输也在划分的时隙中进行。这种通过划分时帧、时隙从而使各网络节点都在规定的时帧、时隙中传输的方式, 有效避免了由于竞争引起的发送和接收冲突, 提高了传输效率。

1.1 分布式 TDMA 网络

分布式 TDMA 网络中节点地位均等, 节点之间通过相互协商, 从而获得各自的发送时机。该网络的主要思想为相邻一跳范围内的网络节点不能同时传输, 否则会导致隐藏终端问题; 相邻两跳范围内的网络节点不能同时传输, 否则会导致暴露终端问题。该分配算法在分配效率较高, 但是还需要进一步研究如何获取网络节点的一跳和两跳内邻节点信息。同时随着网络中节点数的增多, 传输的效率也会有所下降。

1.2 集中式 TDMA 网络

集中式 TDMA 网络中, 网络节点分为 2 类:

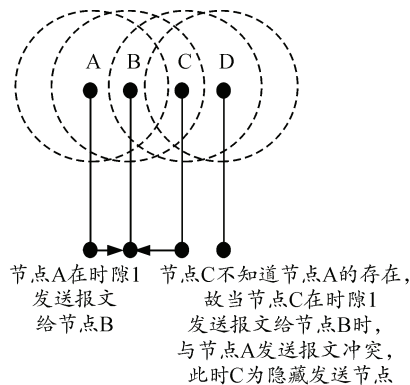
主节点和从节点。从节点建立两跳内邻节点列表，并反馈至主节点。主节点在搜集全网所有节点的网络拓扑信息后，将时隙分配给所有节点。全体网络节点按照主节点的时隙分配，在规定的时隙内发送信息。

集中式 TDMA 网络的优势在于由于主节点知道全网的拓扑结构，能够将单个时隙分配给尽可能多的不冲突的节点，所以在分布式 TDMA 网络的基础上，可以实现时隙重用的最大化。

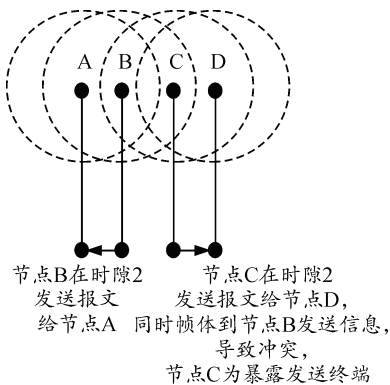
2 系统模型

2.1 隐藏终端和暴露终端^[4]

在无线 Mesh 网中，若一个节点的一跳范围内的 2 个相邻节点在同一时隙向该节点发送数据，则使得该节点无法正常收到数据，导致冲突，笔者称这样的问题叫隐藏终端问题，如图 1(a)所示；若一个节点需要接收相邻一跳内节点的数据传输，而该节点相邻两跳的另一节点也在传输数据，则会导致发送节点在覆盖范围之内而接收节点在覆盖范围之外，导致冲突，笔者称这一问题叫暴露终端问题，如图 1(b)所示。



(a) 隐藏终端



(b) 暴露终端

图 1 隐藏和暴露终端

2.2 干扰模型

笔者采用 K 跳干扰模型，该模型基于图论，模型直观明了，应用较为广泛^[5]。在该模型下，在 2 个网络节点的链路跳数不少于 K 跳的情况下，可以在同一时隙进行数据收发。为了克服隐藏终端和暴露终端带来的干扰，笔者设 K=2，即无线网络中的网络节点与其一跳邻节点和两跳邻节点均不在同一时隙收发数据。

2.3 网络模型

由于采用 K=2 的 K 跳干扰模型，所以应满足以下几个限制条件：

- 1) 同一链路上 2 个一跳邻节点不能分配在同一时隙；
- 2) 同一链路上 2 个两跳邻节点不能分配在同一时隙；
- 3) 网络中每个网络节点在一帧内都至少分得一个时隙。

对于无线网络，其静态拓扑结构可以考虑用一个图来 $G=(V,E)$ 模拟，其中 V 是有限的非空顶点集， E 是顶点的偶队组成的有序边集。假设一个无线网络的网络节点个数为 N ，那么该无线网络的网络拓扑结构就可以看作是一个的 $N \times N$ 二进制矩阵 R 。连接矩阵 $R=r_{ij}(i,j=1,2,\dots,N)$ 可表示为：

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & (i,j) \in E \text{ 且 } i \neq j \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (1)$$

假设一个时帧划分为 M 个时隙，根据上述限制条件 3，每个节点在一帧内至少分得一个时隙，可用 $M \times N$ 的二进制矩阵 $F=f_{mi}$ 来表示时隙分配方案，其中

$$f_{mi} = \begin{cases} 1 & \text{在第 } m \text{ 个时隙，节点 } i \text{ 可发送数据} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

根据上述表达式，可以得到对应的限制条件模型：

$$r_{ij} + f_{mi} + f_{mj} \leq 2, (i,j \in [1,N], m \in [1,M], i \neq j) \quad (3)$$

$$c_{ik} \cdot f_{mi} + c_{kj} \cdot f_{mj} \leq 1, (i,j,k \in [1,N], m \in [1,M], i \neq j \neq k) \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^M f_{mj} \geq 1 (j \in [1,N]) \quad (5)$$

同时，笔者可以得到一个时帧内节点 i 的传输效率 η_i ：

$$\eta_i = \frac{\text{一帧内节点 } i \text{ 分得的时隙数}}{\text{该帧帧长}} = \frac{\sum_{m=1}^M f_{mi}}{M} \quad (6)$$

那么，全网的传输效率则为 η ：

$$\eta_{\text{全网}} = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M f_{mi}}{MN} \quad (7)$$

所以，该网络模型的时隙分配问题可以归纳成求 \max_{μ} 。

3 时隙分配过程

笔者所设计的集中式 TMDA 网络是由 M 个自然帧构成一个超帧，自然帧分为控制帧和数据帧 2 种，规定每个超帧的第一帧为控制帧，剩余 $M-1$ 个帧为数据帧，每个自然帧的帧长可变^[6]。自然帧由 N 个固定时隙和动态时隙 2 部分构成。文中的协议设计中，每个超帧允许一个新节点入网。在每个超帧的开始时，主节点 (base station, BS) 的无线收发装置会给自然帧新增一个时隙用于从被动接收用户节点 (subscribe station, SS) 收发装置的入网，将允许新节点入网的时隙设为每个自然帧固定时隙的最后一个时隙，不妨设为时隙 N ，若新节点在第 R 个自然帧最后一个时隙入网 ($1 \leq R \leq M$)，剩下的 $(M-R)$ 个帧中不再新增时隙用于节点入网，即每个超帧内至多允许一个新节点入网。超帧时隙分配如图 2 所示，时隙分配过程如下：

- 1) 所有节点都会侦听其他节点广播，用于建立自己的一跳邻节点列表。
- 2) 所有节点都会侦听其他节点广播的一跳范围内邻节点信息，用于计算并建立自己的两跳邻节点列表。
- 3) 上电后，仅有主节点 BS 在网，主节点 BS 会广播当前的帧号以及该帧的总时隙数，当广播帧号为 1 时，意味着一个新的超帧开始，自然帧帧长增加一个固定时隙，新节点 SSNEW 在自然帧的最后一个固定时隙可申请入网。
- 4) 在每个超帧的第一个帧时，主节点 BS 均会提供一个时隙用于新节点入网。由于新节点 SSNEW 在申请入网时，会捎带发送给主节点 BS 自己的一跳和两跳邻节点列表。若在主节点 BS 已分配的时隙内，有 SSNEW 两跳以外的节点，则将 SSNEW 分配给其全部两跳外节点的时隙；若已分配的时隙内没有 SSNEW 两跳以外的节点，则将 BS 提供的新时隙分配给 SSNEW。

5) 每个节点广播时，其一跳邻节点要测得该节点与自己的信道质量，测量的目的在于当 BS 获得全网拓扑结构后，可以根据该信道质量来规划端到端传输的最优路径。

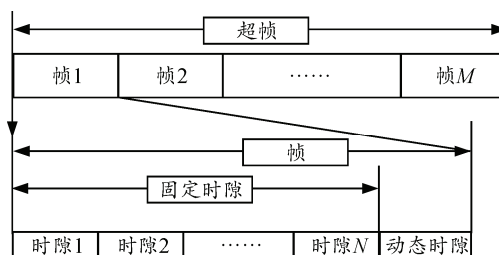


图 2 超帧时隙分配

4 opnet 仿真

笔者对该网络设计协议进行了仿真测试，仿真软件采用 opnet14.5，在网络中选取了 10 个节点，随机分布在一个边长为 10 km 的正方形区域范围内，节点的有效半径为 3 km。其中，mobile_node_0 为主节点 BS，其余 9 个节点为从节点 SS，如图 3 所示。同时，保持节点位置和覆盖范围不变，对基于 CSMA/CA 的算法和基于 TDMA 固定时隙分配算法进行 opnet 仿真。

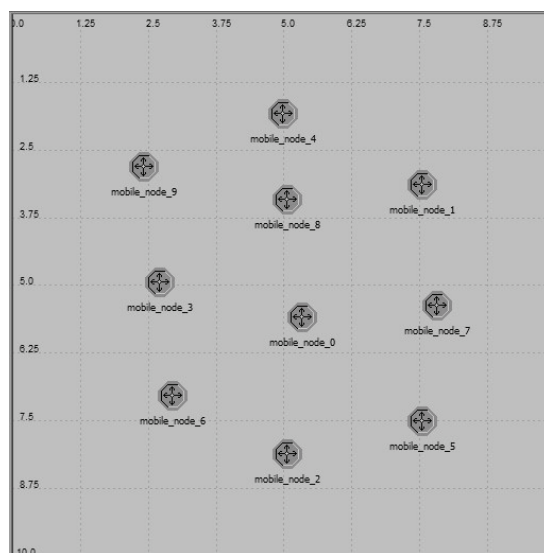


图 3 opnet 网络仿真场景图

笔者从协议仿真的吞吐量 (Throughput)、负载 (Load) 和数据丢失 (Data dropped) 3 个方面，将设计的基于 TDMA 的集中式动态时隙分配算法与经典

的基于 CSMA/CA 的算法和基于 TDMA 固定时隙分配算法进行比较。

3 种算法的吞吐量仿真结果如图 4 所示。

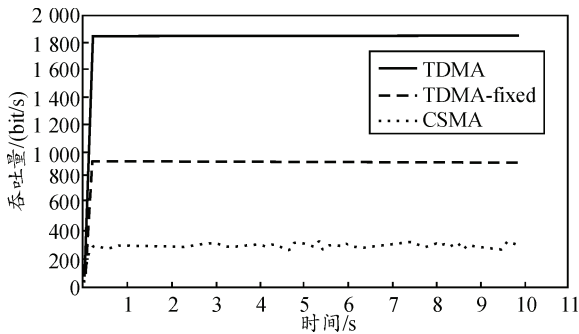


图 4 3 种算法的吞吐量对比

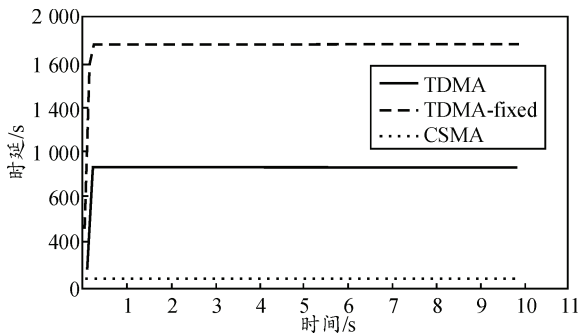


图 5 3 种算法时延对比

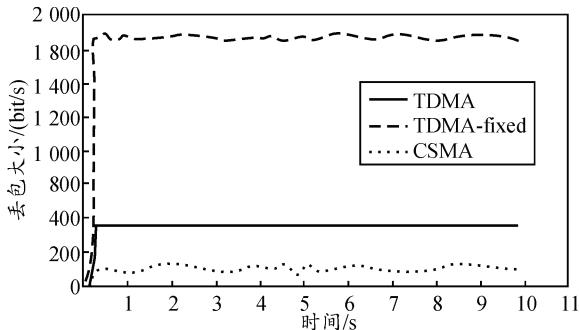


图 6 3 种算法丢包大小对比

由图 4 可看出：相较于固定时隙分配算法 (TDMA-fixed) 和基于载波侦听的算法 (CSMA)，集中式动态 TDMA 协议在吞吐量上有极大的优势，

TDMA 的吞吐量是 TDMA-fixed 2 倍，是 CSMA 的近 6 倍，达到了 1 800 kb/s。

3 种算法的时延和丢包大小仿真结果分别如图 5 和图 6 所示。

通过对 3 种算法的时延和丢包大小的对比仿真可知：集中式动态 TDMA 协议的时延是 TDMA-fixed 的 1/2，约为 1.4 s；而数据丢失仅为 TDMA-fixed 的 1/4，只有 380 kb/s。由此可以得出：集中式动态 TDMA 协议时延较小，丢包大小也较少。综合考虑吞吐量大小，集中式动态 TDMA 协议性能较为均衡。

5 结语

未来的协议研究中，跨层的思想将会成为热点。将 MAC 层和路由层有机结合，也会成为未来协议研究的总体趋势。对于两跳外的节点，如何能够从路由协议的角度实现通过主节点分配最优的路由路径，从而减小时延，优化时隙分配，进一步提高协议效率将是以后研究的重点。

参考文献：

- [1] Beljadid A, Hafid A S. Design of Wireless Mesh Networks: Expansion and Reliability Studies[C]. IEEE "GLOBECOM" proceedings, 2008: 1-6.
- [2] Ian F. Akyildiz, Wang Xudong. A Survey on Wireless Mesh Networks[J]. IEEE Radio Communications, 2005(9): 23-30.
- [3] Ricardo C. Carrano, Luiz C. S. Magalhães, Débora C. Muchaluat Saade and Célio V. N. Albuquerque[J]. IEEE 802.11s Multihop MAC: A Tutorial. IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, 2011, 13(1): 52-66.
- [4] IEEE Standard for Wireless Lan Medium Access Control(MAC) and physical Layer(PHY) Specification[S]. New York: ANSI/IEEE Std 802.11,1999.
- [5] 姜欣, 杜建凤. Mesh 核心关键技术现状分析[J]. 现代电信科技, 2009(6): 50-54.
- [6] 曾智慧. 基于 IEEE 802.16 标准的无线 Mesh 网络研究 [D]. 上海: 同济大学, 2010.