

下来进行簇间-簇内通信、数据传输以及邻居发现操作. 在一个超帧开始的时候, 如果节点侦听不到簇首的信标, 则调整到 BC 上去接收, 待成功接收之后, 接下来就进行频谱感知. 在频谱感知阶段, 如果检测到了主用户, 则终止所有的操作, 等待下一帧的到来; 如果主用户不存在, 则继续执行簇间-簇内通信、数据传输以及邻居发现操作. 在下一个超帧开始的时候又重复上面的操作. 在整个超帧时段, 经验数据库为节点的数据传输和邻居节点发现提供评价支持.

3 经验数据库及参数

网络中的每个节点都包含一个数据库用于存储它在网络中的传输行为以及对这些行为的评价, 称这个数据库为经验数据库. 经验数据库可以用来支持节点在网络中的多个行为, 例如帮助节点快速的找到邻居节点, 为节点提供经验值用于组建新的簇, 帮助簇首选择最佳的信道进行数据传输.

由于认知网络的节点只是频谱资源的使用者而非拥有者, 节点的可用信道在不同的时间不同的地点是不尽相同的. 然而在实际中, 大多数节点的移动范围通常会在一个固定的区域内, 在此区域中节点可用信道的变化情况可以通过长时间的记录而发现其中的规律值. 基于上述考虑, 本文的经验数据库以地理位置为基本的考虑因素, 数据库中存储若干条记录, 每条记录包含如下的五个参数:

C_{xy} 节点的地理位置;

C_i 信道 i 成为簇内 CCC 的次数;

t_i 信道 i 被节点用于数据传输的总时长;

W_i 在信道 i 上传输的总的比特数;

t_m 该条记录被修改的时间.

地理位置是经验数据库中每条记录的核心参数, 其他参数均用于记录节点在该地理位置附近的行为. 考虑到节点的存储空间有限, 设置每个节点最多包含十条记录.

将上面的两个参数 t_i 和 W_i 作为节点在信道上的数据通信的评价, 两个参数由下面的两式定义:

$$t_i = \sum_{k \in T} t_k \quad (1)$$

$$W_i = \sum_{k \in T} w_k \quad (2)$$

上两式中, T 是节点接入信道 i 的次数. t_k 是节点第 k 次接入信道 i 时用于数据传输的时长, w_k 是节点第 k 次接入信道 i 时传输的比特数. 当考虑选择信道进行节点间的数据传输时, 某个信道上已经传输的比特数 (W_i) 越高, 选择该信道用于下一次数据传输的可能性就比其他的信道高.

当节点需要进行邻居节点发现或是向簇首节点提供信道选择信息时, 节点需要从经验数据库中获取相应的信息. 它首先计算当前所处的地理位置与经验数据库中记录的所有地理位置的距离. 如果存在这样一条记录, 它的地理位置距当前节点所处的位置最近, 并且两者之间的距离值在节点的三跳范围之内, 则节点可以使用该条记录的经验值, 并根据当前行为产生的评价来修改这条记录. 如果节点找不到满足上述条件的记录, 则它添加一条以当前地理位置为核心参数的记录到经验数据库中. 如果当节点希望添加新记录的时候, 经验数据库中已经存在了十条记录, 则节点将删除修改时间最早的一条记录.

4 仿真分析

作为性能比较, 将本文提出的基于分簇结构的 MAC 协议 (称为 CLMAC) 与其他两个协议进行比较: (1) 采用跳频序列的 MAC 协议^[8], 称为 SMA; (2) 基于分簇的 MAC 协议^[9], 称为 CogMesh. 采用三个性能指标对以上三个 MAC 协议进行比较分析, 仿真软件采用 ns-2.

仿真参数设置为: 在 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的区域中随机放置 100 个次用户节点, 10 个主用户, 网络中总的信道数量为 $N=12$, 次用户之间的通信距离为 500 m, 主用户之间的通信距离为 2 km, 且主用户独立的接入每个信道中. 网络中数据传输率为 1 Mbps, 每个数据包的大小为 512 bytes, 其他的网络参数主要参考 IEEE 802.11. 共进行 100 次独立实验, 每次实验运行 1000 s, 取实验的平均值作为最终结果.

图 8 所示为在不同的网络负载下三种协议能达到的吞吐量. 在网络负载低的时候, SMA 协议得到了比其他两个协议较大的吞吐量. 由于 SMA 协议操作简单, 它使得节点对独立的去竞争信道, 在轻负载下需要通信的节点对能够快速的找到信道进行通信, 因而 SMA 协议的吞吐量快速的增加. 当网络负载继续增加时, SMA 协议的吞吐量增加的不明显, 这是由于网络

负载的增加,进行竞争的节点也增加了,信道利用率下降.反观 CogMesh 和 CLMAC 协议,随着网络负载的逐渐增大,吞吐量增加比较明显.由于 CogMesh 和 CLMAC 协议均是基于分簇的 MAC 协议,各簇的簇首节点管理着簇内的资源分配,尽量为簇内节点提供无冲突的信道接入,则网络中所有可用信道的利用率较高,从而获得较大的网络吞吐量.本文的 CLMAC 协议增设了簇间-簇内通信时段用于协调相邻簇之间的信道使用,这个传输机制为相邻的簇提供了无冲突的频谱接入,而且本文的 CLMAC 协议在设计分簇算法的时候就将最大化网络吞吐量作为主要的考虑因素.因而本文的 CLMAC 协议能够得到比 CogMesh 协议更大的吞吐量.当网络负载继续增大的时候,节点的丢包率增大,所有协议的性能均出现下降.

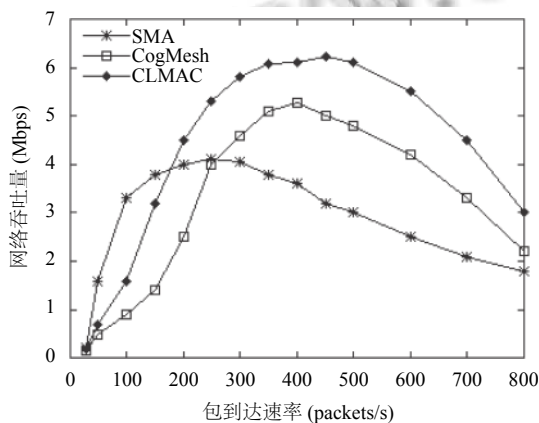


图8 在不同负载下的网络吞吐量

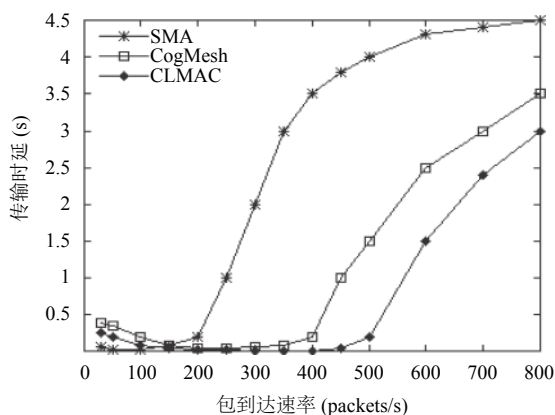


图9 在不同负载下的传输时延

图9所示为在不同的网络负载下三种协议的平均时延.在轻负载网络下, CogMesh 和 CLMAC 协议表现出比 SMA 协议较高的时延,这是由于基于分簇结构

的 MAC 协议需要进行簇内节点的协商,等待簇首节点安排信道的使用,因而它们的包传输时延较大.而 SMA 协议不是中心控制结构,需要通信的节点对一旦竞争到某条信道中,它们就开始数据传输,且在轻负载情况下,节点间信道竞争不激烈,数据包传输时延最小.当网络达到中高负载时, SMA 协议的信道竞争激励,节点对需要等待很长的时间才能接入到信道中,传输时延不断增加.而其余两个基于分簇的协议中,簇首充分考虑簇内的业务需要,为簇内节点提供无冲突的信道接入,则它们的时延增加的比较平缓.本文的 CLMAC 协议在信标时段和频谱感知时段均提供了相同的机制以保护簇内的 CCC,维持了簇结构的稳定,因而它提供的传输时延略低于 CogMesh 协议.

5 结束语

本文在次用户时钟同步的情况下提出了一种基于簇结构的 MAC 协议,该协议以超级帧作为基本的处理对象,超级帧的各个时段均对应簇节点的具体操作,以此支撑簇结构稳健地应对主用户操作.仿真结果表明,基于分簇结构的 MAC 协议相比较于基于跳频序列的 MAC 协议,在中高网络负载情况下能获得更好的网络吞吐量以及较低的传输时延.而本文提出的 MAC 协议能获得比 CogMesh 协议更好的综合性能.

参考文献

- 1 Akyildiz IF, Lee WY, Chowdhury KR. CRAHNS: Cognitive radio ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(5): 810–836. [doi: 10.1016/j.adhoc.2009.01.001]
- 2 Haykin S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(2): 201–220. [doi: 10.1109/JSAC.2004.839380]
- 3 Akyildiz IF, Lee WY, Vuran MC. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127–2159. [doi: 10.1016/j.comnet.2006.05.001]
- 4 Theis NS, Thomas RW, Dasilvs A. Rendezvous for cognitive radios. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(2): 216–227. [doi: 10.1109/TMC.2010.60]
- 5 Lazos L, Liu S, Krunz M. Spectrum opportunity-based control channel assignment in cognitive radio networks. *Proceedings of IEEE SECON*. 2012. [doi: 10.1109/SAHCN.2009.5168974]

- 6 Wang XY, Wong A, Ho PH. Stochastic medium access for cognitive radio ad hoc networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(4): 770–782. [doi: [10.1109/JSAC.2011.110409](https://doi.org/10.1109/JSAC.2011.110409)]
- 7 Chowdhury KR, Akyildiz IF. OFDM-Based common control channel design for cognitive radio Ad Hoc networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(2): 228–238. [doi: [10.1109/TMC.2010.160](https://doi.org/10.1109/TMC.2010.160)]
- 8 Bian K, Park J, Chen R. A quorum-based framework for establishing control channels in dynamic spectrum access networks. *Proceeding of the 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York, NY, USA. 2009. 25–36. [doi: [10.1145/1614320.1614324](https://doi.org/10.1145/1614320.1614324)]
- 9 Chen T, Zhang H, Maggio GM, *et al.* CogMesh: A cluster-based cognitive radio network. *Proceedings of IEEE DySPAN*. 2011. 168–178. [doi: [10.1109/DYSPAN.2007.29](https://doi.org/10.1109/DYSPAN.2007.29)]
- 10 Sabharwal A, Khoshnevis A, Knightly E. Opportunistic spectral usage: Bounds and a multi-band CSMA/CA protocol. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2007, 15(3): 533–545. [doi: [10.1109/TNET.2007.893230](https://doi.org/10.1109/TNET.2007.893230)]
- 11 Xiang J, Zhang Y, Skeie T. Medium access control protocols in cognitive radio networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2010, 10: 31–49. [doi: [10.1002/wcm.v10:1](https://doi.org/10.1002/wcm.v10:1)]