

车载自组织网络协作 MAC 协议研究

叶 翔 章国安 程黛月

(南通大学电子信息学院 南通 226019)

摘 要 车载自组织网络(Vehicular Ad Hoc Network, VANET)的关键技术之一就是设计一个高效的媒体接入控制(Medium Access Control, MAC)协议。MAC 协议因对网络的吞吐量、时延和丢包率等具有重大影响而成为研究热点。针对车载自组织网络对 MAC 协议的特殊性要求,提出了一种基于协作方案的 TDMA MAC 协议,即 C-TDMA MAC。该协议中,当源节点到目的节点间直接传输失败时,其邻近辅助节点利用未被预留的时隙协作重传其先前侦听到的数据包到目的节点,而不影响其它数据包的正常传输。数值分析和仿真结果表明,所提出的协议提高了数据包成功传输的概率。

关键词 车载自组织网络,媒体接入控制,协作通信,时分多址

中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.11.036

Research on Cooperative MAC Protocol for Vehicular Ad Hoc Network

YE Xiang ZHANG Guo-an CHENG Dai-yue

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract The design of the medium access control (MAC) protocol is one of the key technologies of the vehicular ad hoc Networks(VANET), which directly impacts the network performance such as the access fairness, throughput delay and the packet-lost-radio etc. We presented a cooperative scheme for TDMA MAC due to the requirements of the MAC agreement in VANET, called C-TDMA MAC. In cooperative TDMA MAC, neighboring nodes use the unreserved time slots to cooperatively relay a packet not reaching its target receiver, without affecting the normal transmission of other data packets. Numerical analysis and simulation results show that the proposed protocol improves the successful probability of packet transmission.

Keywords VANET, Medium access control(MAC), Cooperative communication, Time division multiple access(TDMA)

1 引言

VANET 的开发与运营由于不可靠的无线传输介质的障碍,与其它形式的无线网络相比具有一些独特的挑战。节点高速移动、网络拓扑结构变化快及频繁的链接断裂以及高优先级安全信息的严格时延限制等是 VANET 的一些共同挑战^[1]。基于 TDMA 的 MAC 协议因其信道分配简单、数据传输无需复杂的控制信息、机制成熟、可靠性高、易用性强而得到了广泛的研究^[2]。然而由于 VANET 的动态拓扑,TDMA MAC 协议可能会导致时隙的浪费。当在一个邻域内没有足够的节点使用一帧中所有的时隙时,损失就会发生。此外,一旦传输失败,即使在未被预留的时隙期间信道是空闲的,源节点也必须等待,直到下一帧重传^[3]。协作通信作为未来无线移动网络的关键技术,在对抗无线信道衰落、获取分集增益、提高网络吞吐量、降低网络时间延迟、减少丢包率等方面,是

非常有效的方法^[4]。

基于 TDMA 的协作 MAC 协议已经被提出以用于提高通信系统的传输性能。在 Ad Hoc 无线网络中,文献[5,6]采用协作策略提高网络的吞吐量性能。文献[7]提出基于多天线的协作 TDMA,通过协作重传来获得发射分集,与传统 TDMA MAC 协议相比,该 MAC 协议在瑞利衰落环境下提高了网络吞吐量,然而在多跳网络下并不是很有效。文献[8]提出了动态协作 TDMA MAC(DC-TDMA)用于多跳网络以充分利用空闲时隙,通过用微时隙来动态选择空闲时隙,该动态协议在多跳网络下能够明显提高网络吞吐量;然而由于微时隙的开销,DC-TDMA 的性能可能比传统的 TDMA MAC 性能更差。

针对上述协议存在的不足,本文提出了一种新型的协作 TDMA MAC 协议,即 C-TDMA MAC。其通过辅助节点来重传失败的数据包,并且重传是在未被预留的时隙中执行的。

到稿日期:2014-11-10 返修日期:2015-01-09 本文受国家自然科学基金项目(61371113,61401241),交通运输部应用基础研究资助项目(2013-319-825-110)资助。

叶 翔(1989—),男,硕士生,主要研究方向为车载网 MAC 协议;章国安(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为车载网、认知无线 Mesh 网络等,E-mail:gzhang@ntu.edu.cn(通信作者);程黛月(1990—),女,硕士生,主要研究方向为车载网 MAC 协议。

通过引进协作避免了数据时隙的浪费并降低了系统时延,提高了数据包传输成功的概率,继而提高了网路的吞吐量;并且在协议中,簇的形成、时隙的分配、协作的执行都是采用同一种分布的方式。另外,辅助节点也不是固定的,它会随着信道状况以及网络拓扑结构的变化而变化。

2 系统模型

2.1 网络拓扑结构

(1)一个多车道公路上移动的车辆构成一个 VANET。车辆在道路上是随机分布的。假设在观察期内忽略所有车辆的相对运动,它们彼此之间相对静止,保持一个固定的网络拓扑结构。

(2)移动车辆根据泊松分布分布在车道上,密度为 ρ ,在长度为 l 的车道上发现 i 辆车的概率为

$$p(i, l) = \frac{(\rho l)^i e^{-\rho l}}{i!}, i = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

(3)所有车辆具有相同的传送/接收范围 r ,因此,在参考节点的传输范围内的平均节点数为 $2\rho r$,且在传输范围 r 内,所有车辆的通信能力都是相同的。

VANET 节点分布的近似模型如图 1 所示。

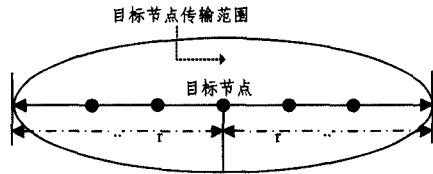


图 1 VANET 节点分布近似模型

2.2 信道模型

信道时间轴被划分成帧,每一帧又进一步被划分成时隙,每个时隙时间间隔恒定,每个帧的时隙数也是固定的,记为 F 。因此,为了获得稳定的传输性能, F 必须大于 $2\rho r$,使得位于 $2r$ 单位路段内的每一个节点都能获得一个时隙。

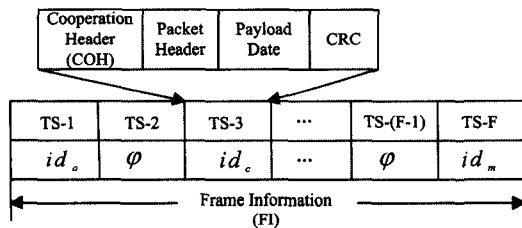


图 2 协作 TDMA MAC 帧结构, $\varnothing$ 表示一个空区域

帧信息(FI)是 id 区域的一个集合, id 是一个标识符,表示一个节点的 id 。每个 TS 致力于一帧的相对时隙。FI 的基本网络结构如图 2 所示。在 s^a 时隙,目的节点 D 一旦成功接收到源节点 S 的数据包,就认为 s^a 时隙属于 S,然后节点 D 发送节点 S 所对应时隙的 id 。节点 D 成功地从节点 S 接收到一个数据包后,就能知道:(1)作为它的单跳邻节点 S 的存在;(2)节点 S 是 s^a 时隙的主人;(3)节点 S 的所有单跳邻节点和它们的对应时隙。如果在一个时隙中没有信号,则节点认为它是没有被预留的时隙。在这种情况下,FI 区域上没有被预留的时隙,相对应的 TS 是空闲的,如图 2 中的 TS-2。这

里的 id 是一个时隙和节点的身份识别,并且它还有助于对传输的确认。当接收到节点 D 的 FI 时,如果它的 FI 中不包含节点 S 的 id ,就可以认为 S-D 的传输失败;反之,则确定传输成功。

3 协议分析

3.1 协作的执行

在源节点到目的节点的传输中,当直接传输失败时,一个辅助节点成功接收到那个重发数据包,此刻如果目的节点在辅助节点的传输范围内且至少存在一个未被预留的时隙 TS,则辅助节点能够对源节点和目的节点提供协作,并在时隙 TS 中执行。当一个辅助节点决定参与协作时,它将通过数据包中的协作头传输其决定。协作头中包含:协作意向、传输失败发生时源节点的时隙索引及用于重传的时隙的索引这 3 条信息,并在辅助节点的时隙中被传输。其它潜在的辅助节点在接收到该辅助节点的协作决定时就会暂停它们的协作意向。所以辅助节点是第一个提供协作和执行协作的节点。但是,当这些潜在的辅助节点不在同一个单跳范围内时,这些辅助节点就可能在目的节点处发生碰撞。为了避免这种碰撞,目的节点会传输一个协作确认(C-ACK),在 C-ACK 中,目的节点传输第一个潜在辅助节点的 id 。协作确认的传输强迫其他潜在的辅助节点暂停它们的传输,避免了一切可能的碰撞。协作传输过程,如图 3 所示。

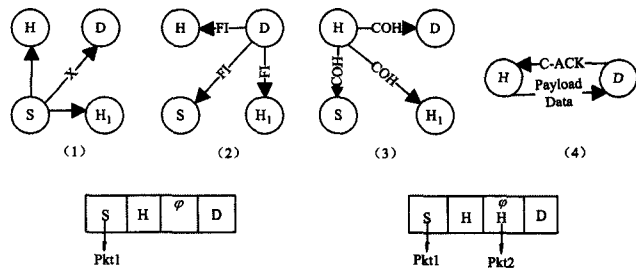


图 3 协作传输过程

源节点传输一个数据包到目的节点,若辅助节点通过检测目的节点的 FI 判断传输失败,则辅助节点 H 提供协作。当辅助节点从目的节点接收到协作确认时,重传没有到达目的节点的数据包。在此期间,节点 S 能够在它的时隙传输一个新的数据包(Pkt2),而那个没有传输成功的数据包(Pkt1)将由辅助节点 H 在一个未被预留的时隙重传到目的节点^[8]。这种方法既提高了数据包成功传输的概率,又降低了时延。

3.2 性能分析

评估 MAC 协议的方法之一就是评估它处理信道错误的能力。在基于 TDMA 的 MAC 协议中,每帧成功传输的时隙数就是这种能力的一种体现。一个时隙中的数据包能否传输成功取决于信道的质量以及与其他数据包的碰撞情况。为了便于分析,假定网络中的所有节点都已经被完美地同步并都已经预留了它们的时隙,并且忽略节点之间的相对流动性,使得每个时隙只供自己所属的节点传输,因此不同的节点在传输数据包时不会造成任何碰撞。在源节点的传输范围内,车辆能够成功接收到传输的数据包的概率仅取决于信道质量

p , p 值越小表明信道质量越差。

3.2.1 TDMA MAC

在基于 TDMA MAC 协议中, 每一个节点都预留了一个时隙, 该时隙只允许预留的节点传输数据包。

设源节点与目的节点之间的距离为 $u(u \leq r)$, 在它们传输范围内的节点数为 N_0 , 则这些节点沿着 $2r-u$ 单位长度分布。若 u 均匀分布在 $[0, r]$, 那么源节点和目的节点之间的平均距离为 $1.5r$, 则将 $l = 1.5r$ 代入到式(1)中得到 N_0 的最大概率密度函数:

$$P\{N_0=u\} = \frac{(1.5\rho r)^u e^{-1.5\rho r}}{u!}, u=0,1,2,\dots \quad (2)$$

在一帧的 F 个时隙中, 设随机变量 U 表示一帧中未被预留时隙的数目, X 表示成功传输的时隙数目, 因此给定 $U=j$, 有 $0 \leq X \leq F-j$, 则 X 的数学期望和 U 的概率密度函数为

$$E[X|U=j] = (F-j)p \quad (3)$$

$$P\{U=j\} = \begin{cases} 1 - \sum_{i=1}^{F-1} \frac{(2\rho r)^i e^{-2\rho r}}{i!}, & j=0 \\ \frac{(2\rho r)^{F-j} e^{-2\rho r}}{(F-j)!}, & 0 < j \leq F-1 \end{cases} \quad (4)$$

从式(3)、式(4)得到成功时隙的数学期望 $E[X]$ 为

$$E[X] = p \sum_{j=1}^{F-1} (F-j) \frac{(2\rho r)^{F-j} e^{-2\rho r}}{(F-j)!} + pF(1 - \sum_{j=1}^{F-1} \frac{(2\rho r)^j e^{-2\rho r}}{j!}) \quad (5)$$

3.2.2 C-TDMA MAC

针对 TDMA MAC 协议存在的不足, 提出一种协作方案。如果源节点到目的节点的直接传输失败, 一个辅助节点就会在一个未被预留的时隙重传这个丢失的数据包。根据前面讨论, 如果发生以下情况, 协作会被诱发。

事件 A: 在源节点和目的节点的单跳范围内至少存在一个潜在的辅助节点来重传没有到达目的节点的数据包。这些辅助节点接收到的来自源节点的数据包的概率服从二项分布。在 S 和 D 的单跳范围内的节点数目 $N_0=k$, 如果 $k \leq 2$ 则潜在的辅助节点就不存在; 如果 $3 \leq k \leq F$, 则有 $k-2$ 个节点可以作为辅助节点; 如果 $k \geq F$, 在一帧中仅有 $F-2$ 个节点预留了时隙, 此刻没有空闲的时隙, 不能执行协作。则事件 A 发生的概率如下:

$$P\{A\} = \sum_{k=3}^F (1 - (1-p)^{k-2}) \frac{(1.5\rho r)^k e^{-1.5\rho r}}{k!} + (1 - (1-p)^{k-2}) (1 - \sum_{k=0}^F \frac{(1.5\rho r)^k e^{-1.5\rho r}}{k!}) \quad (6)$$

事件 B: 有了辅助节点, 还必须至少存在一个未被预留的时隙供潜在的辅助节点传输。事件 B 发生的概率如下:

$$P\{B\} = p\{U > 0\} = \sum_{j=1}^{F-1} \frac{(2\rho r)^j e^{-2\rho r}}{j!} \quad (7)$$

事件 A 和事件 B 是相互独立的。对于每一次失败的直接传输, 协作决定的概率 p_{coop} 如下:

$$p_{\text{coop}} = p\{A\} p\{B\} \quad (8)$$

通过协作, 不管是直接传输还是协作中继传输, 传输都是成功的。因此, 在协作的条件下成功传输的概率 p^{coop} 为

$$p^{\text{coop}} = p + p(1-p)p_{\text{coop}} \quad (9)$$

通过协作, 在一帧中成功传输的时隙数的数学期望在式(5)中改变为

$$E[X_{\text{coop}}] = p^{\text{coop}} \sum_{j=1}^{F-1} (F-j) \frac{(2\rho r)^{F-j} e^{-2\rho r}}{(F-j)!} + p^{\text{coop}} F(1 - \sum_{j=1}^{F-1} \frac{(2\rho r)^j e^{-2\rho r}}{j!}) \quad (10)$$

我们用每帧中成功传输的时隙数来评估 MAC 协议的性能。 $E[X]$ 和 $E[X_{\text{coop}}]$ 分别表示 TDMA MAC 和 C-TDMA MAC 成功传输的时隙数, 可以由式(5)和式(10)计算得到。 C-TDMA MAC 的标准化时隙数增益为

$$\sigma = \frac{E[X_{\text{coop}}] - E[X]}{E[X]} \quad (11)$$

4 仿真实验与分析

在计算机中用 Matlab 进行仿真来比较 TDMA MAC 和 C-TDMA MAC 的性能差异。假设一条路设置为两个车道, 两个车道上车辆密度保持相等, 用 p 值的变化来表示不同的信道质量。在不同的情景下, 对 TDMA MAC 和 C-TDMA MAC 每帧成功传输的时隙数和时隙数增益进行比较。

图 4 和图 5 比较了 TDMA MAC 和 C-TDMA MAC 两种协议成功传输的时隙数。从中可以看出, 协作的引入使得 C-TDMA MAC 成功传输的时隙数多于 TDMA MAC。然而在两个极端条件下, 即 $p=0$ 和 $p=1$ 时, 这两种协议表现出相同的预期。当 $p=0$ 时, 由于信道错误, 所有的传输都失败; $p=1$ 时, 信道条件极好, 所有的直接传输都成功, 此时协作是没有必要的。当 p 从 0 开始增加时, 协作的优势开始显现。通过协作, 成功传输的时隙数提高的速率随着信道质量的提高而提高, 更好的信道质量增加了协作传输的概率。另一方面, 随着信道质量的进一步改善, 直接传输的成功率也增加, 减少了协作的需要从而得到了较小的成功时隙数增益。

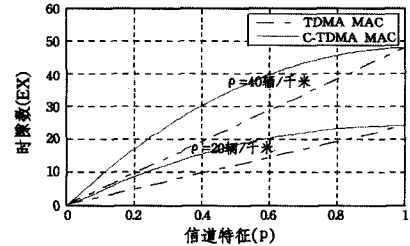


图 4 $r=300\text{m}$, $F=60$ 时不同车辆密度下的时隙数比较

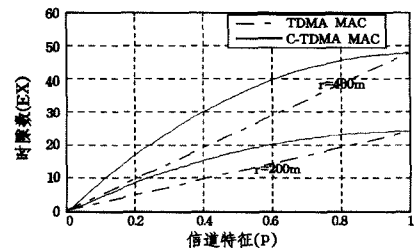


图 5 $\rho=30$ 辆/km, $F=60$ 时不同传输范围下的时隙数比较

图4反映了车辆密度对成功传输的时隙数的影响,密度越小表示在 $2r$ 单位长度内车节点数越少,这会增加未被预留时隙的数目。在TDMA MAC中,未被预留的时隙将会被闲置,而在C-TDMA MAC中协作的引入利用了这些未被预留的时隙,增加了数据包成功传输的可能性。图5反映了传输范围对成功传输的时隙数的影响,传输范围越大表明该范围内的车节点数越多,使得每帧具有较高的时隙利用率。

从图6和图7可以看出在一个特定的 p 值下,时隙数增益达到最大值,随着 p 值的进一步增加,增益减小。 p 值较大时,直接传输成功的可能性也增大,因此协作可能不会被诱发。当 p 适中时,直接传输可能会遭受信道差错,因此协作能够帮助重传没有到达目的节点的数据包。当 p 值较小时,辅助节点可能遭受到信道错误而不能成功传输,协作增益并不明显,并且当节点数与时隙数接近时,此时没有足够的时隙可供协作,时隙数增益会降低,因此,要想能够执行协作,必须要保证时隙数大于节点数。

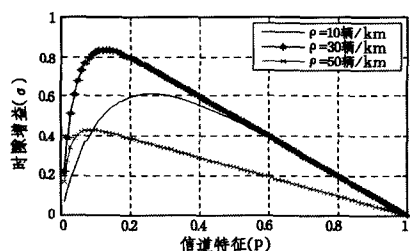


图6 $F=60, r=300m$ 时时隙增益的变化

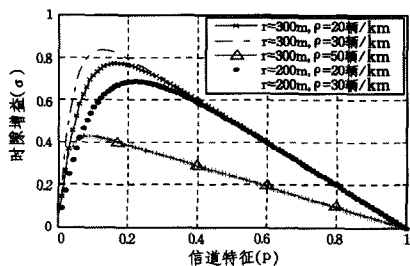


图7 $F=60$ 时时隙增益的变化

图6描绘了在不同的车辆密度下 p 取不同值时,两种协议时隙数增益的比较。当 p 从10增加到30时,时隙数增益随之增加,这是因为当节点密度增加,辅助节点数也增加。然而随着节点密度的进一步增加,未被预留的时隙数在减少,不能提供足够的空闲时隙来提供协作,导致协作增益减少,例如当 p 从30增加到50时。图7中随着 p 和 r 的增加,潜在辅助节点数增加,提高了协作增益。 $[r=200, \rho=30]$ 和 $[r=300, \rho=20]$ 这两种情况下时隙数增益是相同的,因为它们的车节点数目相同。当车节点数目大于时隙数时,不能提供协作,时隙数增益就会减少。例如对于参数对 $[r=300, \rho=50]$,节点数目和时隙数一样,导致其与其他情况相比时隙数增益较小。

结束语 本文针对车载无线网络的特点和TDMA MAC协议存在的不足,提出了一种协作TDMA MAC协议。在源

节点到目的节点直接传输失败时,通过一个辅助节点继续传输先前侦听到的那个丢失数据包,从而提高了数据包成功传输的概率,并且辅助节点的重传是在未被预留的时隙中传输的,因此协作传输不会暂停邻近节点的直接传输,从而不会增加邻近节点接入信道的等待时间,这也避免了与其他节点传输的数据包发生碰撞。即使源节点到目的节点之间的信道状况很差,这种方式也能够提高传输的可靠性,降低网络的时延。仿真结果表明,本文所提出的C-TDMA MAC协议与原协议相比,传输性能有较大改善。

参考文献

- [1] 金艳华. 车载无线自组织网MAC协议研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2010
Jin Yan-hua, Research on Medium Access Control of Vehicular Ad Hoc Network[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010
- [2] 管铮, 赵东风, 余介夫. 一种TDMA无线传感器网络MAC协议能量有效性分析[J]. 计算机科学, 2012, 39(6A): 151-153
Guan Zheng, Zhao Dong-feng, Yu Jie-fu. Analysis Model for the Efficient of the TDMA MAC for Wireless Sensor Network[J]. Computer Science, 2012, 39(6A): 151-153
- [3] 李建东, 盛敏, 李艳红, 等. 通信网络基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011
Li Jian-dong, Sheng Min, Li Yan-hong, et al. Communication Networks, A First Course[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011
- [4] 唐伦, 柴蓉, 戴翠琴, 等. 车联网技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013
Tang Lun, Chai Rong, Dai Cui-qin, et al. Internet of Vehicles Technology and Application[M]. Beijing: Science Press, 2013
- [5] Korakis T, Tao Z, Slutskiy Y, et al. A cooperative MAC for ad hoc wireless networks[C]// IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops. 2007: 532-536
- [6] Yi L, Hong J. A new cooperative communication MAC strategy for wireless ad hoc networks[C]// IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science. 2007: 569-574
- [7] Yang Z, Yao Y-D, Li X, et al. A TDMA-based MAC protocol with cooperative diversity [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(6): 542-544
- [8] Lee J-K, Noh H-J, Lim J. Dynamic cooperative retransmission scheme for TDMA systems [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(12): 2000-2003
- [9] Lee J-K, Noh Hong-Jun, Lim J. A Cooperative TDMA MAC Protocol using Dynamic Slot Assignment Scheme[C]// International Conference on Information Networking (ICOIN). 2013: 216-220