



专题:异构网络

VANET/LTE-Advanced 异构网络中基于协议序列-IEEE 802.11p 的信道接入机制

徐哲鑫,蔡苓玲,林 潇,吴 怡

(福建师范大学光电与信息工程学院 福州 350007)

摘 要:提出了 VANET/LTE-Advanced 异构网络架构,并重新规划信道使用及接入模式,提高车载设备之间通信的有效性,增强公平性并兼顾自由度。以车辆间通信为研究对象,深入剖析并比较 IEEE 802.11p MAC 协议,基于协议序列信道接入机制,提出基于协议序列-IEEE 802.11p 的信道接入算法,将“基于调度”与“基于竞争”的信道接入结合,完善 IEEE 802.11p MAC 层协议。仿真结果表明,基于协议序列-IEEE 802.11p 的信道接入机制与 UI 模式及 IEEE 802.11p 模式相比,实现了用户平均吞吐量和平均数据分组发送时延性能的权衡,具有理论价值和实用价值。

关键词: VANET; LTE-Advanced; 异构网络; 协议序列; 信道接入

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015235

Protocol Sequence-IEEE 802.11p Based Channel Access Mechanism in VANET/LTE-Advanced Heterogeneous Network

Xu Zhixin, Cai Lingling, Lin Xiao, Wu Yi

(College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: VANET/LTE-Advanced heterogeneous network was proposed by combining LTE-Advanced with VANET. The utilization of channel and channel access mode was reconfigured in order to improve the system performance. Aiming at the V2V communication, the performance of channel access mechanism based on IEEE 802.11p and protocol sequence were analyzed and compared with each other. And then, protocol sequence-IEEE 802.11p based channel access mechanism was proposed, which combines the scheduling-based and competition-based mechanism to completing the standard of IEEE 802.11p. Through simulation with MATLAB, it shows that protocol sequence-IEEE 802.11p based channel access mechanism can tradeoff the performance between UI-based and IEEE 802.11p-based ones in user average throughput and average packet delay, which has important theory meaning and practical value.

Key words: VANET, LTE-Advanced, heterogeneous network, protocol sequence, channel access

收稿日期:2015-08-23;修回日期:2015-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61571128), 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (新教师类) 资助项目 (No.20133503120003), 福建省自然科学基金资助项目 (No.2013J01224), 福建省科技厅工业科技计划重点项目 (No.2014H0019)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571128), The Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No.20133503120003), The Natural Science Foundation of Fujian Province (No.2013J01224), The Key Projects of Science and Technology Plan for Industry of the Science and Technology Department of Fujian Province (No.2014H0019)

论文引用格式: 徐哲鑫, 蔡苓玲, 林潇等. VANET/LTE-Advanced 异构网络中基于协议序列-IEEE 802.11p 的信道接入机制. 电信科学, 2015235
Xu Z X, Cai L L, Lin X, *et al.* Protocol sequence-IEEE 802.11p based channel access mechanism in VANET/LTE-Advanced heterogeneous network. Telecommunications Science, 2015235



1 引言

随着无线通信技术和计算机技术的高速发展,车载自组织网络(vehicular Ad Hoc network, VANET)作为智能交通系统(intelligent transportation system, ITS)的重要组成部分,已经得到学术界和工业界的广泛关注^[1-3]。然而, VANET 的高动态的拓扑动态性、高速的节点移动性、短暂的链路连通性、数据类型的多样性及自组织通信等特有属性,使得 VANET 的信息传输能力面临新的挑战。另外, VANET 中节点的单跳通信范围通常只有几百米,因此节点除了具备数据收发功能,还需具备路由功能,可以采用多跳的方式将数据转发到更远的车辆上^[4]。一般而言, VANET 更适合在短距离通信中使用,实现与附近车辆的信息交互,而车辆节点间进行中远距离的传输则可利用现有的移动通信网^[5]。

现有移动通信网中, LTE-Advanced (以下简称 LTE-A) 作为 LTE 的演进版本, 满足国际电信联盟(ITU)对 4G 的 1 Gbit/s 的峰值要求, 其商用部署也不断加快, 截至 2015 年 7 月, 全球已有 60 个国家和地区的 131 家运营商投资 LTE-A 部署。LTE-A 实际上是技术集合, 包含了 LTE R10 以及后续版本中的多项技术, 如载波聚合、高阶 MIMO、D2D(device-to-device)、增强小区间干扰协调等^[6,7]。D2D 是指在 LTE-A 网络的 eNode B 控制下, 通过重用宏蜂窝用户资源实现端到端直接通信, 降低了用户间通信的时延及开销, 提高通信有效性。由此可见, eNode B 除了要提供传统蜂窝通信的功能, 还要控制和管理 D2D 通信资源的分配和使用, 无疑增加了 eNode B 的负担。可将 VANET 中的技术引入 LTE-A 的 D2D 部分, 利用 VANET 的自组织特性提高车辆节点通信效率和灵活性, 优化网络资源分配, 从而构成 VANET/LTE-A 异构网络。

本文将重点研究 VANET/LTE-A 异构网络中 D2D 部分(即 VANET)的车辆节点信道接入机制。VANET 中节点信道接入机制总体上可以分成“基于竞争”及“基于调度”两大类^[8-10]。传统的观点认为,“基于调度”机制并不适合于 VANET^[8](如 TDMA), 因为该机制需要事先为节点预订时隙, 并且时间帧中时隙个数固定, 不适用于拓扑动态变化的 VANET。因此,“基于竞争”的信道接入机制更受到青睐, 其中 IEEE 802.11p 就是一种经典的“基于竞争”的 VANET MAC 层协议^[11], 得到广泛的研究^[12,13]。但 IEEE 802.11p 随机接入的本质属性导致了节点接入信道时延的无界性, 只能从概率意义上预测接入^[10,14], 这对于车辆安全

方面信息的传输是致命的缺陷。针对“基于竞争”机制的这一缺陷, Wong 等人^[9,10]再次从“基于调度”的角度出发, 提出基于协议序列的 MAC 接入机制, 证明了在使用用户保障(user irrepresible, UI)序列时可实现节点接入信道时延的有界性, 从而一定程度上克服了“基于竞争”机制的缺陷。另外, 参考文献[10]中提出的基于 GNSS 的序列分配机制, 解决了传统“基于调度”机制中节点个数无法确定, 需要集中式管理的问题。

然而,“基于调度”的协议序列的信道接入机制并非在所有情况下都优于“基于竞争”的 IEEE 802.11p MAC 协议, 本文将构建 IEEE 802.11p 的 UI 序列等效模型, 深入剖析各自的优劣及其成因, 并由此在 IEEE 802.11p MAC 协议的框架下提出基于协议序列-IEEE 802.11p 的信道接入机制, 将“基于调度”信道接入与“基于竞争”信道接入结合, 融合两者的优势, 同时缓解各自的缺陷。

2 VANET/LTE-A 异构网络及其信道接入机制

如图 1 所示, 本文提出的异构网络系统由 VANET 和 LTE-A 构成, 车辆节点即该网络的“用户”, 使用车载单元(on board unit, OBU)通信。车载单元具有 VANET 和 LTE-A 两种接口模块, 既可以与其他 OBU 直接通信获得 VANET 服务, 也可以与 eNode B 通信获得 LTE-A 服务。从 LTE-A 的角度看, VANET 构成了其 D2D 部分, 利用灵活的 VANET 架构满足车辆拓扑动态变化下的节点数据传输需求, 同时缓解了 LTE-A 中资源受限问题; 从 VANET 角度看, LTE-A 构成其 V2I 部分, 利用强大的 LTE-A 核心网提供更丰富的数据服务内容以及远程通信距离。

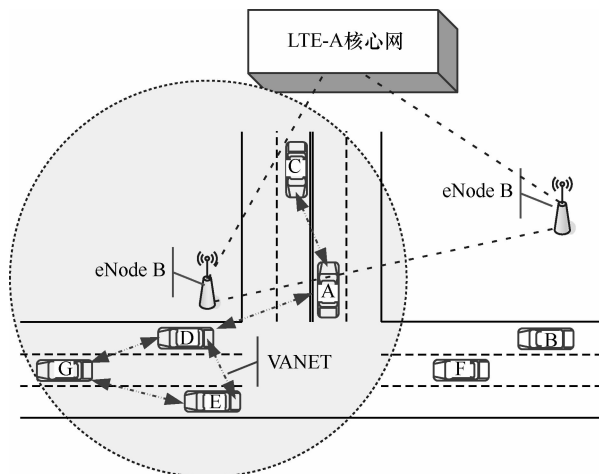


图1 VANET/LTE-A 异构网络系统架构

VANET/LTE-A 异构网络中车辆间通信所使用的频段及信道分配总体沿用 IEEE 802.11p 的规范,如图 2 所示,仍使用 5.9 GHz 频段,总带宽 75 MHz。由 7 个信道组成,每个信道 10 MHz,其中,Ch178 为控制信道,剩余 6 个为服务信道。

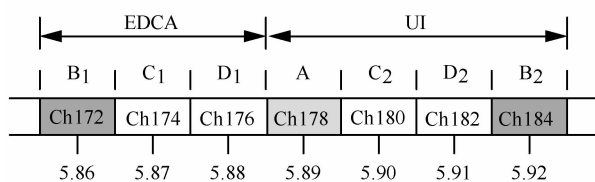


图2 VANET/LTE-A 频段和信道分配

异构网络在接入模式及信道使用上有所改进,具体如下。

(1) 接入模式方面

在接入模式方面,Ch172~176 保持 IEEE 802.11p 的接入模式,即 EDCA 模式,显然也支持 DCF 模式,合并简称 IEEE 802.11p 模式;而 Ch178~184 采用基于用户保障序列的接入模式,简称 UI 模式。

在 UI 模式中,协议序列仅是一串由 0 和 1 组成的二进制序列,如 100100100。但从通信的角度看,当每一位二进制数表示一个时隙,并令 0 表示接收时隙、1 表示发送时隙时,一个协议序列就代表了一种 MAC 层信道时隙使用的模式,并且该模式是确定性的。通过合理地设计协议序列,并将一个协议序列分配给一个节点就相当于完成了时隙的分配^[9]。已经可以证明^[9],UI 序列能保证每个用户在一个序列周期内至少成功发送一个时隙,这种确定性的时隙使用模式也使接入时延、网络吞吐量等性能可控。

更关键的是基于协议序列的信道接入是无反馈的,节点无须监听信道也无须交互信标帧,直接按照序列中 0 和 1 位置决定是否发送数据即可,这将大大降低网络开销,很符合 VANET 链路生存期短的特点。因此,将控制系统运作的 Ch178 设定为 UI 模式。

同时,由于 UI 模式不需要信道监听以及随机退避等措施,简单易行,因此硬件成本将低于 IEEE 802.11p 模式。考虑到更高频段硬件设计的难度和成本会比低频段的高,因此将 3 个相对高频的服务信道 Ch180、Ch182、Ch184 也设定为 UI 模式。然而,UI 模式相对于 IEEE 802.11p 模式的优势是以降低吞吐量为代价的,因此在该系统的 3 个低频段信道 Ch172、Ch174、Ch176 依然使用 IEEE 802.11p 模式,从而形成协议序列-IEEE 802.11p 混合模式,实现吞吐量和数据发送时延的权衡。本文后续部分将通过分析并比

较 UI 模式与 IEEE 802.11p 模式之间的优劣,说明协议序列-IEEE 802.11p 模式的有效性。

(2) 信道使用方面

在信道使用方面,将 7 个信道分成 4 组:A 组为 Ch178;B 组为 Ch172 及 Ch184,这两个信道分别标识为 B1、B2,负责安全信息传输;C 组为 Ch174 及 Ch180,这两个信道分别标识为 C1、C2;D 组为 Ch176 及 Ch182,这两个信道分别标识为 D1、D2,C 和 D 两组将用于业务数据传输。这样,服务信道组中同一数据流将对应一组信道,即同时在两个信道上发送,数据流发送端等效框图如图 3 所示。

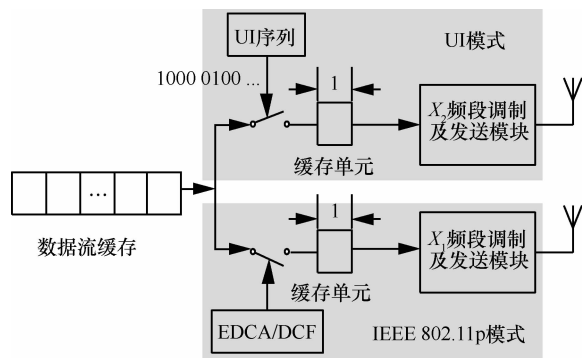


图3 服务信道组中数据流发送端等效框图

数据流缓存中数据分组以队列的形式依次等待发送。数据分组可在所处的信道组中的两个信道同时发送或其中之一发送,这取决于节点在该信道是否获得发送机会。以 IEEE 802.11p 模式为例,若节点退避结束并发现信道空闲,则提取一个数据分组并经过物理层处理后发送,否则队列中数据分组处于等待状态,这就相当于在数据缓存队列与 IEEE 802.11p 模式缓存单元之间设置受控开关,触发时机由 EDCA 或 DCF 机制决定。同理,UI 模式的发送机制也类似,等效为在数据缓存队列与 IEEE 802.11p 模式缓存单元之间设置受控开关,触发时机由 UI 序列中的 0 和 1 决定。每个节点使用的 UI 序列由节点所属的 eNode B 根据小区当前用户数生成并分配。

若两个信道在同一时隙均获得数据分组的发送机会,则分别提取一个数据分组,提取时延由硬件决定,通常可忽略不计,因此可以认为两种模式同时提取数据分组,并经物理层处理后发送。

3 UI 模式及 IEEE 802.11p 模式建模及分析

本节将对 UI 模式及 IEEE 802.11p 模式从用户吞吐



量、平均数据分组发送时延等方面进行建模,并构建 IEEE 802.11p 对应的 UI 等效模型,从而推导基于协议序列-IEEE 802.11p 的信道接入机制的各项性能指标表达式。

需要说明的是,该部分重点比较“基于竞争”和“基于调度”的模式之间的性能优劣,因此 IEEE 802.11p 模式中采用 DCF 与 UI 模式对比,采用 EDCA 与 UI 模式对比的结论也类似。

3.1 用户平均吞吐量

网络中每个节点更关心自身数据发送情况,因此用户吞吐量比系统吞吐量更为重要。用户吞吐量定义为单位时间内每个用户平均发送的数据量大小,等于系统吞吐量与用户数的商。

UI 模式下,设当前小区用户数为 K ,则系统平均吞吐量为 $S=Kf(1-f)^{K-1}[15]$,因此用户平均吞吐量为:

$$S_i^{\text{UI}} = \frac{f(1-f)^{K-1} \cdot b_{\text{slot}}^{\text{PHY}}}{\sigma}, i=1,2,\dots,K \quad (1)$$

其中, f 为 UI 序列的负载因子, $b_{\text{slot}}^{\text{PHY}}$ 为物理层每时隙发送比特数, σ 为时隙持续时间。可以通过数值解法求出当 $f=1/K$ 时,式(1)达到最大值,本文定义为 UI 序列的极限吞吐量。

DCF 模式下,系统平均吞吐量可参见参考文献[16],表示为 S_i^{DCF} 。

综上所述,可得到基于协议序列-IEEE 802.11p 信道接入机制将转化为 UI-DCF 模式,其吞吐量表达式为:

$$S_i^{\text{UI+DCF}} = S_i^{\text{UI}} + S_i^{\text{DCF}} \quad (2)$$

即两个信道吞吐量之和。

值得注意的是,UI 模式中负载因子 f 由用户数 K 决定, $b_{\text{slot}}^{\text{PHY}}$ 和 σ 为系统常量参数,因此 S_i^{UI} 可以看成仅与用户数 K 有关的因变量。在给定用户数的情况下, S_i^{UI} 为固定值。然而,在给定用户数的情况下,DCF 模式吞吐量 S_i^{DCF} 是仅与数据分组大小 b_p 有关的因变量,因此 b_p 实际上决定了 UI 模式和 DCF 模式之间的性能差异,从而也决定了 UI-DCF 混合模式的吞吐量性能。

可以用数值解法求得使 $S_i^{\text{UI}}=S_i^{\text{DCF}}$ 成立的临界数据分组大小 b_p^c ,并可以证明 S_i^{DCF} 是关于 b_p 的单增函数。因此,当 $b_p < b_p^c$ 时,UI 模式吞吐量性能优于 DCF 模式;而当 $b_p > b_p^c$ 时,DCF 模式吞吐量性能优于 UI 模式。

3.2 平均数据分组发送时延

平均数据分组发送时延可表示为一个节点每成功发送一个数据分组所耗费的时间^[17]。

UI 模式下,节点的介质访问时延很短并且是有界的^[9,10,15],即节点的两个成功发送时隙之间的间隔很短。由于 UI 序列的特性,能保证节点在一个序列周期 L 内至少能获得一个成功发送时隙,并且在概率意义下的表达式为:

$$d_{i,\text{max}}^{\text{UI}} = \frac{1}{S_i^{\text{UI}}}, (i=1,2,\dots,K) \quad (3)$$

该值的数量级通常在几百微秒到几毫秒。然而需要注意的是,节点每次成功接入信道时,实际只获得一个时隙的发送持续时间。在 IEEE 802.11p 的规范下,每个时隙发送数据量为 24~216 bit,PSDU 范围在 0~4 KB,UI 模式下节点成功发完一个数据分组所需的时间不一定都短,特别是在大数据分组时这一现象更加突出。因此,还需要关注 UI 模式下平均数据分组发送时延这一指标,表示为 $d_{i,p}^{\text{UI}}$ 。设每个数据分组大小为 b_p bit,则 $d_{i,p}^{\text{UI}} = b_p / S_i^{\text{UI}}, i=1,2,\dots,K$ 。

DCF 模式下,平均数据分组发送时延记为 $d_{i,p}^{\text{DCF}}$,表达式可参见参考文献 [18,19]。由此可得到,基于协议序列-IEEE 802.11p 信道接入机制简化为 UI-DCF 模式的平均数据分组发送时延为:

$$d_{i,p}^{\text{UI+DCF}} = \frac{1}{\frac{1}{d_{i,p}^{\text{UI}}} + \frac{1}{d_{i,p}^{\text{DCF}}}} = \frac{d_{i,p}^{\text{UI}} \cdot d_{i,p}^{\text{DCF}}}{d_{i,p}^{\text{UI}} + d_{i,p}^{\text{DCF}}} \quad (4)$$

需要说明的是,用户平均吞吐量和平均数据分组发送时延是一一对应的,因此实际上分析用户平均吞吐量即可推断平均数据分组发送时延的性能,反之亦然。但使用平均数据分组发送时延评估性能时,可将 DCF 模式和 UI-DCF 模式转化为等效的 UI 模式,从而可直观得到三者间的性能差异。以 DCF 模式为例,平均数据分组发送时延为 $d_{i,p}^{\text{DCF}}$ 的 DCF 模式可等效为介质访问时延为 $(d_{i,p}^{\text{DCF}} \cdot b_{\text{slot}}^{\text{PHY}}) / b_p$ 的 UI 模式。由此也可以看出,若 $d_{i,p}^{\text{DCF}}$ 不变,数据分组大小 b_p 直接决定系统性能,其效果与前述 b_p 对吞吐量的影响分析中所得到的结论相同。

4 仿真分析

根据图 1 系统架构利用 MATLAB 构建仿真场景。设 eNode B 所覆盖的道路内车辆节点个数变化范围为 5~70。UI 序列集合由 eNode B 根据车辆节点个数以 $q=2p-1$ 的规则生成素数序列(generalized prime sequences, GPS)^[10],同时 UI 极限情况将给出理论值。DCF 模式的具体参数设置见表 1。

在节点个数为 10、信道速率为 6 Mbit/s 的情况下,UI 模式、DCF 模式以及 UI-DCF 模式的用户吞吐量和平均数

表 1 DCF 参数设定

参数	数值
信道比特率/(Mbit·s ⁻¹)	3、4.5、6、9、12、18、24、27
传播时延/μs	1
时隙长度/μs	13
SIFS/μs	32
DIFS/μs	15
CW _{min}	7
重传次数限制/次	58
PHY 头部/bit	192
MAC 头部/bit	272
CTS 大小/bit	112+PHY 头部
RTS 大小/bit	160+PHY 头部
ACK 大小/bit	112+PHY 头部
数据分组大小/bit	0~4 095
CW _{max}	1 023

据分组发送时延分别如图 4 所示。可以看出, 在 UI 模式下, 给定用户数时, 用户吞吐量保持恒定, 这与本文对应的式(1)的结论吻合。定性上还可以理解为当给定用户数时, 序列集合唯一确定, 从而序列中“1”的个数(即发送时隙数)唯一确定。用户间采用的是确定性接入方式, 每个序列周期所处的成功发送周期和被碰撞的时隙均相同, 因此可保持吞吐量值为常数。其平均数据分组发送时延随着数据分组的增大而增大, 这是因为 UI 模式每个时隙发送数据量是相同的, 数据分组越大就必须等待越多的成功时隙。

UI 序列极限情况下负载因子比 $q=2q-1$ 的生成素数序列更大, 意味着单位时间内有更多的发送机会, 并且所

谓的极限情况实际上是达到发送机会个数和碰撞风险之间的最佳平衡, 因此用户平均吞吐量更大, 平均数据分组发送时延更小。

在 DCF 模式下, 随着数据分组的增大, 用户平均吞吐量也增大, 并且增长速度逐渐放缓, 这是因为如果每个用户使用的数据分组都增大, 必然增大信道占用时间, 即增大发送等待时间, 同时也增大了碰撞概率, 反而限制了吞吐量的增速。另外, 与 UI 模式相比存在性能转折点。当数据分组较小时, 有效载荷所占比例很小, 控制帧、分组头等附加数据消耗大部分网络资源。而此时 UI 模式不需要传输 RTS/CTS 等控制帧, 而且少数几个成功发送时隙即可完成一个数据分组的传输, 这样介质访问时延短的优势得以发挥。当数据分组较大时, 情况相反, UI 模式恒定的吞吐量成为束缚, 节点需要大量成功发送时隙才能完成一个数据分组的传输, 其平均数据分组传输时间必然快速线性增大。而此时 DCF 模式能在一次成功信道接入中就发送较多数据, 并且仿真表明 CSMA/CA 竞争机制导致的接入时延的增长低于 UI 模式的平均数据分组发送时延的增加, 从而具有相对更大的用户平均吞吐量和相对较低的平均数据分组发送时延。本文提出的基于协议序列-IEEE 802.11p 信道接入模式则能够实现两个模式性能的折中。当数据分组较小时, 利用 UI 模式的优势提高吞吐量; 当数据分组较大时, 利用 DCF 模式的优势降低平均数据分组发送时延。

从图 4 可以看出, UI 模式和 DCF 模式之间存在临界数据分组大小, 成为性能的转折点。图 5 仿真了不同节点

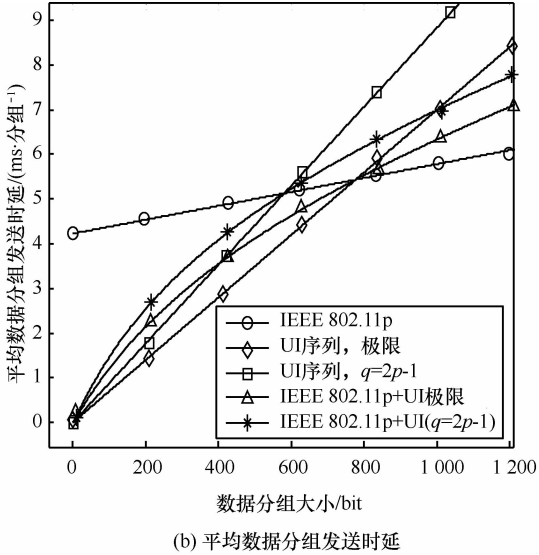
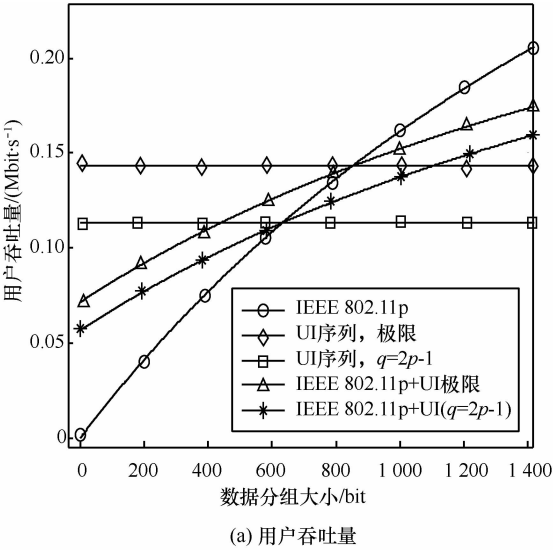


图 4 VANET/LTE-A 异构网络系统性能

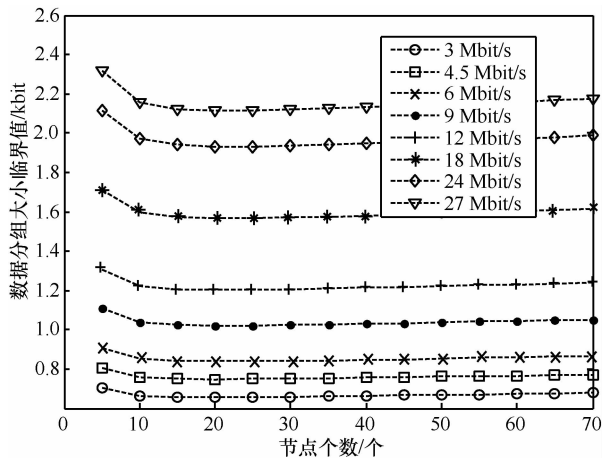


图5 UI模式与DCF模式性能转折点对应的数据分组大小临界值

数、不同信道速率的情况下临界数据分组的大小以及变化趋势。由图5可见,当节点数一定时,随着信道速率增大,临界数据分组大小逐渐增大。这是因为UI模式下每个时隙传输速率增大时,同样的成功发送时隙个数可发送更大的数据量。另外,当信道速率一定时,随着节点数增加,临界数据分组大小呈现先变小后变大的趋势。这是因为当节点个数很少时,UI序列周期很短,节点能以更快的频率发送数据。节点个数逐渐增加后,UI序列周期增长速度加快,而DCF模式下数据碰撞导致的时延还没有很明显,因此数据分组临界点降低。节点数再增大后,DCF模式数据碰撞概率加大,吞吐量优势减弱,从而使数据分组大小临界点再次增加。

5 结束语

本文将VANET与LTE-A结合,提出VANET/LTE-A异构网络,利用VANET的灵活性提升LTE-A中D2D通信效率,并提高LTE-A网络资源的利用率。以VANET中节点信道接入机制为研究对象,分别从理论和仿真研究UI模式和DCF模式在用户平均吞吐量、平均数据分组发送时延等方面的优劣。仿真结果表明,在给定用户数和物理层参数的情况下,UI模式在小数据分组情况下用户平均吞吐量、平均数据分组发送时延性能优于DCF模式,而在大数据分组情况下DCF模式性能优于UI模式。两个模式之间存在性能转折点,可由临界数据分组大小表征。仿真表明,临界数据分组大小随信道速率增大而增大,随节点数增大呈先减小后增大的趋势。在此基础上,重新规划IEEE 802.11p各子信道接入模式及使用,提出基于协议序

列-IEEE 802.11p的信道接入机制,在不同数据分组大小下兼顾了用户平均吞吐量和平均数据分组发送时延的性能,实现两者性能权衡。“基于调度”和“基于竞争”信道接入相结合的思想也具有理论价值和实用价值。

参考文献

- Wang H, Liu R, Ni W, *et al.* VANET modeling and clustering design under practical traffic, channel and mobility conditions. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(3): 870~881
- Akhtar N, Ergen S C, Ozkasap O. Vehicle mobility and communication channel models for realistic and efficient highway VANET simulation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(1): 248~262
- Bitam S, Mellouk A, Zeadally S. VANET-cloud: a generic cloud computing model for vehicular ad hoc networks. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(1): 96~102
- 张齐新, 杨涛, 冯辉等. 车联网中基于联盟合作博弈的带宽分享策略. *电信科学*, 2015, 31(6): 54~60
Zhang Q X, Yang T, Feng H, *et al.* Coalition formation games for bandwidth sharing in VANET. *Telecommunications Science*, 2015, 31(6): 54~60
- Benslimane A, Taleb T, Sivaraj R. Dynamic clustering-based adaptive mobile gateway management in integrated VANET 3G heterogeneous wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(3): 559~570
- Wu D, Zhou L, Cai Y, *et al.* The role of mobility for D2D communications in LTE-Advanced networks: energy vs bandwidth efficiency. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(2): 66~71
- Pan M, Lin T, Chen W. An enhanced handover scheme for mobile relays in LTE-A high-speed rail networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(2): 743~756
- Booysen M J, Zeadally S, Rooyen G J. Survey of media access control protocols for vehicular ad hoc networks. *IET Communications*, 2011, 5(11): 1619~1631
- Wong W S. Transmission sequence design and allocation for wide-area AD Hoc networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(2): 869~878
- Wu Y, Shum K W, Su Q, *et al.* Safety messages broadcast in vehicular Ad Hoc. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(3): 1467~1479
- IEEE Standards Association. IEEE 802.11p-2010: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, 2010

- 12 Bellalta B, Belyaev E, Jonsson M. Performance evaluation of IEEE 802.11p-enabled vehicular video surveillance system. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(4): 708~711
- 13 Lyamin N, Vinel A, Jonsson M, *et al.* Real-time detection of denial-of-service attacks in IEEE 802.11p vehicular networks. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(1): 110~113
- 14 Bilstrup K, Uhlemann E, Strom E G, *et al.* Evaluation of the IEEE 802.11p MAC method for vehicle-to-vehicle communication. *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2008-Fall)*, Calgary, Canada, 2008
- 15 吴怡, 沈颖祺, 沈连丰等. 基于协议序列的车辆自组织网络信道接入控制算法. *电子学报*, 2012, 40(4): 826~831
Wu Y, Shum W K, Shen L F, *et al.* Protocol sequences based channel access control algorithm in vehicular ad hoc networks. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(4): 826~831
- 16 Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 2000, 18(3): 535~547
- 17 高峰, 高泽华, 文柳等. IEEE 802.11a DCF 协议吞吐量与时延性能分析. *北京邮电大学学报*, 2010, 33(6): 43~47
Gao F, Gao Z H, Wen L, *et al.* Performance analysis of WLAN based on IEEE 802.11a. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2010, 33(6): 43~47
- 18 Chatzimisios P, Boucouvalas A C, Vitsas V. Packet delay analysis of IEEE 802.11 MAC protocol. *Electronics Letters*, 2003, 39(18): 1358~1359
- 19 Chatzimisios P, Boucouvalas A C, Vitsas V. Performance analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol for wireless LANs. *International Journal of Communication Systems*, 2005, 18: 545~569

[作者简介]



徐哲鑫,男,博士,福建师范大学光电与信息工程学院讲师,主要研究方向为无线自组织网络。



蔡苓玲,女,福建师范大学光电与信息工程学院硕士生,主要研究方向为无线自组织网、传输序列。



林潇,男,福建师范大学光电与信息工程学院助理研究员,主要研究方向为无线网络通信。



吴怡[通讯作者],女,博士,福建师范大学光电与信息工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为无线自组织网、无线视频传输。