ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.18, No.6, June 2007, pp.1477−1490
DOI: 10.1360/jos181477
© 2007 by *Journal of Software*. All rights reserved.

E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

车用自组织网络传输控制研究*

陈立家[1], 江 昊[1+], 吴 静[1], 郭成城[1], 徐武平[2], 晏蒲柳[1]

[1](武汉大学 电子信息学院,湖北 武汉 430072)
[2](武汉大学 计算机学院,湖北 武汉 430072)

Research on Transmission Control on Vehicle Ad-Hoc Network

CHEN Li-Jia[1], JIANG Hao[1+], WU Jing[1], GUO Cheng-Cheng[1], XU Wu-Ping[2], YAN Pu-Liu[1]

[1](School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)
[2](School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072, China)
+ Corresponding author: Phn: +86-27-68778198, Fax: +86-27-68778816, E-mail: jianghaow@263.net, http://www.whu.edu.cn

Chen LJ, Jiang H, Wu J, Guo CC, Xu WP, Yan PL. Research on transmission control on vehicle ad-hoc network. *Journal of Software*, 2007,18(6):1477−1490. http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1477.htm

Abstract: Vehicle ad-hoc network (VANET), as an application of mobile ad-hoc network and sensor network on road, has no an integrated protocol architecture, and has no special transmission control protocols available. In order to provide the reference for transmission protocol design of VANET, this paper investigates the goals and elements that the transmission protocol design should conform with. At first, this paper introduces the characteristics and applications of VANET, and the challenges of transmission control of VANET. Then the classification standards for wireless transmission protocol are presented. The advantages and disadvantages are discussed with analysis and comparison if various classes of wireless transmission control protocol are applied to VANET. Furthermore, according to the characteristics of VANET, the goals and elements of transmission control design of VANET are proposed. Finally, the research trends of transmission control of VANET are prospected.

Key words: VANET (vehicle ad-hoc network); transmission control; mobile ad-hoc network; goals of design; essentials of design

摘 要: 车用自组织网络——VANET(vehicle ad-hoc network)作为移动自组织网络和传感器网络在道路交通领域的应用,不具备完整协议体系结构,没有专门的传输控制协议.为提供 VANET 传输协议设计参考,研究了 VANET 传输协议设计应具备的目标和要素.首先介绍了 VANET 的特点、研究内容及其传输控制所面临的挑战.然后提出了无线传输协议的分类方法,使用分析和比较的方式讨论了各类无线传输协议用于 VANET 的利弊,并针对 VANET 应用及特性提出了 VANET 传输控制协议设计目标和设计要素.最后展望了 VANET 传输控制未来的研究方向.

关键词: 车用自组织网络;传输控制;移动自组织网络;设计目标;设计要素
中图法分类号: TP393 文献标识码: A

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60502028 (国家自然科学基金); the Youth Chenguang Project of Science and Technology of Wuhan City of China under Grant No. 200750731252 (武汉市青年科技晨光计划)
Received 2006-10-29; Accepted 2007-01-24

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

统计数据和研究资料表明,我国已进入道路交通事故的高发期,道路交通安全形势十分严峻.在 2003 年 ITU-T 的汽车通信标准化会议上,各国专家提出的车用自组织网络(vehicle ad-hoc network,简称 VANET)技术有望在 2010 年将交通事故带来的损失降低 50%[1].

VANET 是指道路上车辆间、车辆与固定接入点之间相互通信组成的开放移动 Ad hoc 网络.它在道路上构建一个自组织的、部署方便、费用低廉、结构开放的车辆间通信网络.VANET 技术可以实现事故告警、辅助驾驶、道路交通信息查询、乘客间通信和 Internet 信息服务等应用[2,3].

目前,VANET 已经引起世界各国研究机构和科研人员的密切关注[4−6].2003 年,美国的联邦通信委员会专门为车辆间通信划分了一个专用频段.2004 年~2006 年,MobiCom 专门召开了 3 次专题研讨会讨论 VANET.2005 年,欧洲成立了车辆间通信联盟(Car2Car communication consortium)[7].日本也通过了两个车辆间通信标准[8].具体的研究项目有欧洲多国合作开展的 Fleenet[9]项目、德国的“Network on Wheels”[2]、日本 JSK 领导的“Association of Electronic Technology for Automobile Traffic and Driving”,“Group Cooperative Driving”[10,11]、美国的 VII[12]、美国马里兰州立大学的 TrafficView[13]项目、法国多个研究机构合作开展的 CIVIC 等.

目前的研究成果表明,VANET 具有其他移动自组织网络所不具备的特性和传输问题.首先,VANET 是移动自组织网络在道路上的应用,它具有移动自组织网络的各种特点,比如自治性和无固定结构、多跳路由、网络拓扑的动态变化、网络容量有限、良好的可扩展性等.但特殊的应用环境,如狭窄的道路、高密度节点分布、节点高速移动等,直接影响 VANET 网络的信息传输能力,使得丢包增加、延迟增大.实验表明[14],在 VANET 中使用传统的传输层协议(如 TCP,UDP)和路由协议(如 AODV,DSR,OLSR 等),数据包的成功传输率不会超过 50%,延迟大且延迟抖动剧烈.

近年来,各国学者对移动自组织网的各种传输问题进行了广泛研究,通过分析移动自组织网络传输控制协议设计的要点和思路,可以发现一些具有实用价值的思想和方案对 VANET 传输控制协议设计极具借鉴意义.虽然这些研究广泛而深入,但目前缺乏对 VANET 这一特殊移动自组织网专门的研究.由于 VANET 特殊的网络环境、特殊的运动规律及特殊的应用背景,它的信息传输方法将有别于当前大多数的研究成果.VANET 传输控制协议设计更具有挑战性和独创性.在 VANET 中,地理信息、信道质量、路径状态等都可以通过一定的方法和途径获得,它们对设计高效、可靠的传输控制协议具有重大意义;但同时,通信信道狭隘、节点高速移动、节点密度过高等特有的不利因素又给 VANET 传输控制协议设计带来了巨大的困难和挑战.VANET 传输控制协议设计需要全面考虑各种影响因素,并充分利用有利条件,克服不利因素.

VANET 需要一个灵活、可靠的传输控制机制来保证不同应用的服务质量,而 TCP 不能提供 VANET 可靠的数据传输[4,5,15].本文详细分析和对比了移动自组织网络传输控制协议应用于 VANET 的利与弊,并结合 VANET 的应用与特性,提出了 VANET 传输控制协议的设计目标和设计要素.

1 VANET 概述

VANET 是运行于道路上的新型移动无线自组织网络,可以实现车辆间、车辆与路边节点间的多跳无线通信.VANET 具有极高的应用前景和研究价值,它不仅能够实现交通事故告警,还能实现道路交通信息查询、高速公路缴费和车辆间语音视频通信等功能.VANET 道路通信示意图如图 1 所示.

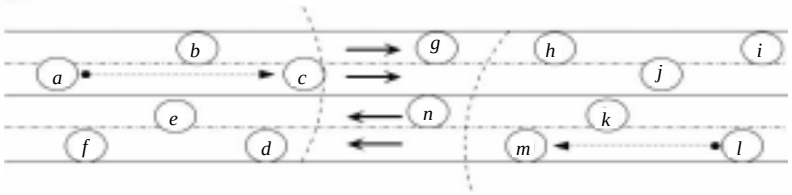

Fig.1 Communication on roads of VANET

图 1 VANET 道路通信

VANET 相对于移动自组织网络而言,既有不利因素(如道路限制、节点高速移动等),也有有利因素(如丰富

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

的外部信息、无能量约束等).如何扬长避短,结合 VANET 应用和特性实现数据可靠传输,是 VANET 面临的巨大挑战.

1.1 VANET应用分类

VANET 是一个运行在特殊环境中、承载特殊应用的移动自组织网络.VANET 上的应用大多对服务质量要求很高,而且各种应用对服务质量的要求各不相同.根据服务质量要求,它们可以分为 3 大类:

(1) 道路交通安全类应用[4].它是最重要、最能体现 VANET 价值的应用,其中包括主动式事故告警、事故隐患提示等.能否有效地避免和减少交通事故,取决于事故告警信息是否可靠、快速、无差错地传播.目前,VANET 研究大多都是针对这类应用,多使用可靠的广播机制实现事故告警[16−18];

(2) 交通状况查询.这类应用的作用是提高道路交通效率,改善车辆驾驶条件.主要查询的信息包括车辆速度、密度、堵车情况、道路情况等;这类应用对时延要求不高;

(3) 信息服务类应用.比如高速公路缴费、移动办公、接入 Internet、分布式游戏等.这类应用在提供多样化服务的同时,也将加重网络负载.乘客间的通信、多媒体传输、WWW 信息服务等会在短时间内产生很高的吞吐量,占用大量的带宽资源.

1.2 VANET特点

VANET 是极其特殊的移动自组织网络,它同样存在一般无线网络所固有的问题,如隐藏点问题、暴露点问题、信道捕获问题等[4,5].从数据包传输的角度来说,它具有以下不利因素:

(1) 无线信道质量不稳定,受多种因素影响,其中包括路边建筑、道路情况、车辆类型和车辆相对速度等.

(2) VANET 中节点分布受道路局限,呈现“管状”形态[19],网络容量有限.根据随机平面的网络容量计算方法[20]可以推算出,VANET 网络容量比无线移动网络更加有限.在长度为 L 的道路上,最多可同时传输 $\frac{2L}{(2+\Delta)r}$ 个数据包,r 是 1 跳的平均距离.

(3) 网络中的节点移动速度快、拓扑变化快、路径的寿命短.平均速度为 100 公里/每小时的道路上,如果节点的覆盖半径为 250 米,则链路存在 15 秒的概率仅为 57%[21].

(4) 泛洪广播会阻塞数据包的传输.广播作为一种常用的通信模式,在无线通信中占有很重要的地位.但在 VANET 中,由于网络呈现管状形式,泛洪广播会给网络带来严重的阻塞[14,19,22].然而,移动自组织网络中常用的路由协议都需要使用泛洪广播机制来搜索路径,频繁的拓扑变化必然导致频繁的泛洪广播.

(5) 链路和路径不对称.链路不对称主要表现在带宽不对称、传输范围不对称等[23].当路由协议为数据流和应答选择的路径不一致时,由于不同的路径性质造成路径不对称;而当两者一致时,应答与数据包的信道竞争不对称,会引起应答包在中间节点累积.同时,在发送端会造成突发数据流,使网络拥塞.在 VANET“管状”形式的网络中,应答包与数据包无冗余路径可用,它们相互竞争信道,降低了网络吞吐量.

(6) 链路层不公平.VANET 在物理层和数据链路层采用成熟的技术和设备,主流使用 IEEE 802.11 标准.但 802.11 标准应用在 VANET 方面存在一些问题,如在狭窄的道路空间内可能存在更多的冲突,原有的避免策略可能效果并不十分理想;同时,802.11 标准自身退避机制的不公平性[24]可能会加剧这种冲突,这对 VANET 网络中需要紧急传输的事故告警信息非常不利[25].

VANET 的不利因素虽然很多,但是,由于 VANET 是车辆间通信的网络,因此无能量约束,同时,GPS 的广泛使用使得 VANET 能够获取周围环境特征,因此,VANET 也具有很多移动自组织网络所不具备的有利因素:

(1) 有比较丰富的外部辅助信息.随着 GPS 和 GIS 的普及[26],VANET 中网络节点不仅可以获得自身的位置信息,还可以得到所在区域的地理信息,比如路口分布、道路方向等.

(2) 底层链路质量可估计.选择无线通信接口、估计链路可用带宽都需要感知链路质量,VANET 中存在严重的暴露节点问题和隐藏节点问题,感知链路质量的最佳位置在数据包接收节点,但无法将链路质量及时送达发送节点,因此,需要在发送节点估计链路质量[27].

(3) VANET 中节点运动相对其他移动自组织网络更有规律,因此路径状态可估计.在 VANET 中,车辆移

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

动较有规律:车辆同向行驶,拓扑相对比较稳定;车辆反向行驶,拓扑变化快、链路寿命短.结合车速、街道形状,可以预测路径状态.

(4) 无能量约束.网络中节点可以使用车辆电池作为电源,所以,VANET 不像其他移动自组织网络和传感器网络那样存在严格的能量约束.

(5) 使用有向天线,扩展传输范围.有向天线使能量在某个方向上不增加发射能量的情况下增加传输范围,因此比较适合 VANET 的“管状”传输信道.

1.3 VANET的研究内容

相当多的研究关注于网络的特性:在无线接口方面,主要是基于 UMTS[28]技术和 802.11 标准,而且 802.11 标准具有更大的优势.目前,国内外在这方面的研究成果较少;在网络路由方面,车用自组织网的路由算法都只是在自组织网络路由算法的基础上做了改进,并没有真正结合车用自组织网络的应用和特性提出专用的方法,而且现有的路由方法需要借助一些辅助信息,比如车辆分布情况、道路分布情况等.

从网络的体系结构来看,除了无线接口以外,路由和传输层必不可少.目前,专门针对 VANET 环境提出的路由和传输协议较少,应用层的研究也局限于安全告警模型研究.完整的 VANET 体系结构还没有正式形成.但是作为未来发展的方向,VANET 应用的种类将会越来越多,要求将会越来越高.VANET 的应用需求对 VANET 传输控制协议提出了要求,同时也指明了它今后发展的方向.VANET 传输控制协议必须为各种各样的应用提供不同级别的可靠的底层传输,以保证各种应用的服务质量.本文就 VANET 传输控制问题进行了探讨.

1.4 VANET传输控制所面临的挑战

- 事故告警信息的可靠传输

事故告警是 VANET 最为重要的一种应用,事故告警信息的快速传播、目标区域的全覆盖是当前研究的重点.目前使用的方法多是可靠广播的方式[16−18],然而,一些端到端应用独占信道,延迟或阻断了广播数据传输,严重地影响了事故告警性能.因此,有必要研究在多数据流共存的情况下提高事故告警的可靠性.

- 提高端到端吞吐量

端到端的信息服务,如高速公路缴费、接入 Internet 等,将广泛应用于 VANET 中.然而,文献[29]表明,在基于 IEEE 802.11 标准的多跳网络中,TCP 的吞吐量随着跳数的增加而急剧减少,3 跳以外的传输吞吐量大约只有 1 跳的 1/5,这严重限制了 VANET 中端到端应用的发展.

- 网络容量合理分配

种类繁多的 VANET 应用各自具有不同的服务质量要求.如事故告警对时延要求很高;而交通信息查询对时延要求相对较低.当多种应用同时竞争网络资源时,由于 VENET 网络容量有限[5],要求将网络资源优先分配给服务质量要求高的应用.如何确定不同应用的优先级、合理分配有限的 VANET 网络容量,将成为 VANET 传输控制所面临的挑战.

- 与 Internet 互联

为适应网络发展和信息获取的需要,VANET 必须方便接入 Internet,与有线网络透明连接.如远方交通信息查询可以通过有线网络中转;上网娱乐休闲要连接到 Web 服务器.然而,有线网络与无线网络的特性有很大不同,无线信道的可靠性与吞吐量大大低于有线信道,两者直接连接将会产生不可预料的问题.

2 无线传输协议及其在 VANET 中的应用

VANET 的事故告警是一类十分特殊的应用,负载了广播的特性,却需要极高的可靠性.802.11 MAC 层的 RTS/CTS 机制,其目的在于解决隐藏节点问题,但它同时在链路层提供给广播一定的可靠性.目前,对无连接业务的可靠性保证研究不多,针对 VANET 的可靠广播研究也很少,如在广播中增加控制帧的方法[30]、划分路段转发数据包的方法[31].VANET 中无连接流和广播数据的可靠性需要专门研究.

VANET 的应用需求对传输控制提出了很高的要求,但是目前 VANET 技术研究尚处于初级阶段,协议体系

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

并不完整,没有专用的 VANET 传输协议.然而,VANET 是一种特殊的移动自组织网络[32],通过研究分析 VANET 的特点、借鉴移动自组织网络传输控制协议设计的要点和思路,可以提炼出 VANET 网络传输控制技术设计要素.本节主要分析和比较了移动自组织网络传输控制协议在 VANET 中的利与弊.

2.1 无线传输协议应用于VANET的分析与比较

从 VANET 传输控制协议与有线网络拥塞控制[33]协议兼容性来看,移动自组织网络传输控制协议[34−39]可以分为 3 类:1) 基于 TCP 改进的传输控制协议基本上可以与 TCP 直接互连,将有线 TCP 迁移到无线网络中,使之能够适应无线移动网络;2) 拆分连接的传输控制协议使用边缘路由器实现与 TCP 互连,将整个连接拆分成有线和无线两段,分别对待各段的数据传输;3) 底层控制机制不考虑与 TCP 的互连,使用底层协议操纵数据传输,或者实现控制,或者为上层协议提供控制支持.各种传输控制协议的方案和性能各不相同,现分别加以讨论.

- TCP 改进类

这类协议针对无线移动网络中存在的问题,提出了不同的解决方案.但是,大部分解决方案没有从全局的角度考虑和把握传输控制,仅仅解决了网络中特定的问题.根据处理问题的方法,这类协议可以分为:1) 通过估计路径可用带宽,适应无线移动网络的动态变化;2) 通过检测路由失败或连接断开,适应移动性造成的连接不稳定;3) 通过检测重传模糊性,处理网络中伪重传问题;4) 通过选择性应答,缓解数据包与 ACK 冲突;5) 通过检测包乱序,减轻包乱序造成的不良影响.下面分别分析这些子类传输协议用于 VANET 的优势与缺陷.

估计可用带宽类传输协议考虑到路径带宽随着网络状态动态地发生变化.为了适应这种变化,这类协议一般在发送端测量路径可用带宽并调整发送速率,使发送速率随着路径质量动态变化.TCP-Vegas[40]根据 RTT 估计可用带宽较为准确,它将包的具体传输时延与拥塞控制分离开,能够很好地适应 VANET 网络信道不稳定的特征.但是,当 VANET 中存在 Reno 时,由于 Reno 的窗口机制相对较为“霸道”,TCP-Vegas 竞争到的带宽将十分有限[41]. TCP-Westwood[42]和 TCP-Jersey[43]都是根据 ACK 的到达速率估计可用带宽,减轻无线信道不稳定的影响,并能够接入 Internet,与 TCP 兼容(TCP-Jersey 需要在中间路由器上设置 CW 组件).唯一的问题是,由于 VANET 网络传输信道呈“管状”形态,导致资源竞争更加激烈,ACK 累积(ACK compression)[44]可能使 TCP-Westwood 和 TCP-Jersey 过分估计可用带宽,导致 VANET 不公平竞争.CWL[45]通过限制拥塞窗口使网络不超载,从而避免拥塞.但 RTHC 是 CWL 上限的近似估计,较为精确的上限比 RTHC 要小[38].即使 RTHC 的估计准确,VANET 网络中不同路径的 BDP 也可能存在很大差异.过分估计 RTHC 会导致拥塞,否则又不能有效利用带宽.

路由的断开与修复将造成 TCP 延迟,并退避重传,降低了吞吐量.显式通知 TCP 链路断开与修复十分有效[46].这类算法大部分采用反馈机制,通过中间节点反馈路由失败信息,发送端冻结 TCP;当路由重建后,继续 TCP 传输.TCP-F[47],EBSN[48],ELFN[49]和 TCP-BuS[50]通过中间节点的反馈,区分路由失败(或者链路失效)和网络拥塞,适应网络拓扑变化快、路径寿命短的情况.因此,这种反馈机制十分适合处理 VANET 网络的高速移动性.但是,拥塞窗口只针对一条路径,当由一条路径切换到另外一条路径时,原有的 TCP 状态将不再适合新的路径,反而引起 VANET 拥塞和不稳定.它们的性能还依赖于中间节点检测路由失效、重建路由和立即发送反馈的能力.如果信道坏状态时间较为短暂,当 EBSN 反馈到达发送端时,信道已恢复,因此,EBSN 不能反映当前 VANET 信道状态.ELFN 基于 DSR 路由协议,周期性地发送探测包,浪费了 VANET 有限的网络资源.TCP-BuS 则局限于 ABR 路由协议,同时没有考虑信道误码造成的影响.FREEZE-TCP[51],Fixed-RTO[52]和 ADTCP[53]在端节点判断路由断开或恢复,并采用冻结 TCP 或重传的策略.FREEZE-TCP 在 VANET 中仍然存在拥塞窗口与路径不匹配问题,在异种网络切换时,数据突发将导致包丢失,而且它不能及时、有效地利用网络带宽.Fixed-RTO 容易造成伪重传,反而会降低 VANET 的吞吐量,同时它不兼容有线网络 TCP.

检测重传模糊性.链路层与传输层的差错恢复机制存在竞争和冲突,链路层重传的延迟导致的 TCP 超时重传,称为伪重传(spurious retransmission),其根本原因是重传模糊性(retransmission ambiguity)问题[54],即发送端不能区分 ACK 是对重传的确认还是对首次发送分组的确认.一些协议通过检测伪重传、减少发送速率来缓解伪重传的影响.TCP-Eifel[55]和 DSACK[56]可以检测伪快速重传和伪超时重传;F-RTO[57]只能检测伪超时重传.它们通过检测伪重传,避免 TCP 调用不必要的拥塞策略.TCP-Eifel 需要在发送端和接收端支持 TCP 时戳.对于高误

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

码率的 VANET 网络,它会造成较长的传输延迟[58].DSACK 在 ACK 中捎带重复包信息.受 VANET 信道不稳定的影响,如果 ACK 丢失,则 ACK 包含的 DASCK 信息也将丢失,发送端将检测不到伪重传.F-RTO 使用数据包检测伪重传,如果没有可用数据要发送,则 F-RTO 将不可用.

数据包与 ACK 共用带宽,导致竞争信道,降低带宽利用率.SACK[59]和 TCP-ADA[60]都选择应答数据包,缓解 ACK 与数据包冲突和 ACK 累积问题.但是,ACK 或数据包的丢失会使无须重传的包也被重传,这种冗余重传不但浪费了 VANET 有限的网络资源,而且会降低网络吞吐量.

包乱序可能是由路由改变和链路层重传所导致的,它将触发 TCP 快速重传.TCP-DOOR[61]在端节点检测包乱序,并适当调用 TCP 拥塞控制.由于只有在路由恢复之后才能检测到事件,因此它的检测精度和响应时间较差.而 VANET 拓扑变化很快,路径寿命非常短,TCP-DOOR 不能实时反映 VANET 的包乱序状态.同时,TCP-DOOR 不能区分真正的乱序和多路径路由引起的乱序.

由于 TCP 改进类协议一般针对局部问题,所以只能作为 VANET 传输控制协议设计的参考,而不能用于实际环境.同时,它们的核心机制仍然是基于窗口的控制.由于 TCP 是针对有线网络设计的,而 VANET 特性与有线网络相比,底层不可靠、连接不稳定、网络状态复杂,因此,TCP 的拥塞控制思想是否适用 VANET 还有待考察.此类协议能够较好地与 TCP 相兼容,如 TCP-Westwood 不需要修改对端 TCP 就能直接与之相连.最为突出的是,准确估计网络可用带宽与实时反馈网络状态的传输协议能够适应网络的动态变化,它们的结合在很大程度上能够解决 VANET 网络节点高速移动所带来的问题,对 VANET 传输控制协议设计具有重要的借鉴意义.

- 拆分连接类

无线网络与有线网络互连时,一些协议根据有线信道与无线信道的不同特性,将端到端 TCP 拆分为多个短 TCP 段,无线段使用无线传输协议,有线段使用 TCP.I-TCP[62],MTCP/SRP[63],M-TCP[64]和 Split TCP[65]将端到端的可靠性与拥塞控制分离出来,它们拆分 TCP 连接,增加了传输的可靠性,减少了链路占领的影响,同时提高了信道利用率.其主要缺陷是,I-TCP,MTCP/SRP 和 Split TCP 均违反了端到端的 TCP 语义,而且由于需要完成协议转换和数据包缓冲、重传等任务,VANET 的无线网关将变得很复杂.I-TCP 和 MTCP/SRP 存在缓冲区溢出的问题.当 VANET 有大流量通信时,如 Internet 下载、在线视频等,由于基站一收到固定主机的数据包就会应答固定主机,同时缓存数据包,因此,基站缓冲区很容易就会溢出.同时,大缓冲区也会引起较大的切换延迟,因为当一个移动主机切换到另一个基站范围内时,前一个基站缓存的数据状态必须同时切换,而只有该状态切换到新的基站之后,才能进行正常传输.M-TCP 维持了端到端的语义,只有移动主机真正收到数据包,“超级主机”才会转发对固定主机的应答包.但是,它主要处理连接频繁断开问题,而没有考虑 VANET 无线链路的不稳定性.Split TCP 虽然能够容忍突发错误,但是对网络断开处理不够.当 VANET 网络断开、路由重新选择时,代理需要重新选择,旧代理的状态迁移到新代理上将需要付出很大代价.

- 底层控制类

底层控制类协议试图在底层解决一定的传输控制问题.某些传输层控制机制在底层实现,将更加有效和方便,同时还降低了传输协议设计的复杂度,为传输层提供较为可靠的底层环境.它们的缺陷是增加了底层协议的复杂度,同时,可能会与传输层控制发生冲突,如链路层的差错控制.本文按照协议层次分析如下:

链路层协议.这类协议努力在链路层解决可靠性问题,对传输层隐藏无线链路特征.其基本思想是认为链路错误是本地问题,应该在本地解决.一般使用 FEC 和 ARQ 等协议[54].RLP[66],AIRMAIL[67],Snoop[68]和 LRED-AP[69]在链路层上恢复包错误,屏蔽底层不可靠性,从而向上层提供较为稳定的传输通道.RLP 和 AIRMAIL 在链路层重传和纠错附加了传输延迟,因此需要与上层传输控制协调,防止出现伪重传.Snoop 协议存在移动主机切换问题.在基站缓冲没有建立起来时,如果移动主机发生切换,则 Snoop 的吞吐量极低.LRED-AP 虽然努力减少冲突,但是延长 MAC 层退避时间,使 MAC 层更加不公平,增加了端到端的延迟.

路由层协议.为了增加路由层的可靠性,同时为传输控制提供辅助支持,路由层协议也可以实现一部分传输控制功能.Routing-layer Enhancement[70]在路由层解决了部分可靠传输问题,FAST-TCP[71]主要解决有线链路传输速率高于无线链路的问题.但是,路由层不可能完全达到端到端的可靠传输.路由层与传输层结合起来考虑,

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

增加了 VANET 传输控制设计的灵活性.

传输层协议.为适应无线移动网络特点,一些新颖的传输协议完全脱离了 TCP 框架,使用新的传输控制机制. ATP[72]是一种基于速率而非窗口的新型传输协议,它周期性地反馈和调整发送速率,不考虑与 TCP 的兼容.这种基于速率的方法与带宽估计其实异曲同工,都是先估计网络容量,然后调整发送速率.它同样能够适应 VANET 网络的动态变化,提高网络吞吐量.

新协议栈.ATCP[73]增加一个中间协议层,用来屏蔽无线网络与有线网络的传输层以下的差异,并针对无线网络的不同状态分类处理.它不但使底层对传输层看起来是透明的,而且能够完全兼容 TCP 协议.这种屏蔽底层细节的思想对 VANET 有一定的借鉴价值.但是,与检测路由断开类协议一样,它所使用的“坚持模式”有一定的缺陷,旧的 TCP 状态不一定适合新的 TCP 路径.

2.2 小 结

无线传输协议设计思想各异,有许多 VANET 可以借鉴的地方,如带宽估计、反馈机制、底层屏蔽、路由层协助、速率调整等.VANET 网络由于节点高速移动,拓扑变化很快.带宽估计的方法能够很好地适应网络的动态变化,它破除了一些协议只解决特殊问题、局部问题的弊端,能够同时处理无线移动环境中的多个不利因素,如高误码率信道、网络断开等.VANET 网络容量有限,流竞争非常激烈,加上事故告警应用将无连接流引入到 VANET 中,更增加了传输控制的复杂性.传输控制除了要针对网络拥塞,还要考虑地理环境、链路不稳定、广播的冲击等其他因素的影响.反馈机制能够准确检测网络状态,底层协助提供传输控制更大的灵活性,速率控制可以有效地缓解网络拥塞,这些方法对 VANET 传输协议设计都很有借鉴价值.

VANET 各不利因素对各无线传输控制协议的影响见表 1.

Table 1 Comparison of effecting elements

表 **1** 影响因素的比较

Protocol	Lossy channel	Frequent disconnection	Delay spike	ACK compression	Out of order	Spurious retransmission
TCP-Vegas	√	√	√			
TCP-Westwood	√	√	√			
CWL		√				
TCP-Jersey	√	√	√			
TCP-F		√				
EBSN	√	√	√			
ELFN		√				
FREEZE-TCP		√				
TCP-BuS	√	√				
Fixed-RTO	√	√	√			
ADTCP	√	√				
TCP-Eifel						√
DSACK						√
F-RTO						√
SACK	√			√	√	
TCP-ADA				√		
TCP DOOR					√	
I-TCP	√	√	√			
MTCP/SRP	√	√	√			
M-TCP		√	√			
Split TCP	√	√	√	√		
RLP					√	
AIRMAIL					√	
Snoop	√	√	√	√		
LRED-AP	√					
Routing-En		√				
FAST-TCP	√	√	√	√		
ATP	√	√	√			
ATCP	√	√				

√—Good compared with TCP

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

3 VANET 传输控制协议设计目标和设计要素

VANET 应用种类繁多,服务质量要求各不相同,交通安全类应用获取网络资源的优先级要高于交通信息查询类应用和信息服务类应用.文献[74]根据信息的实用性将 VANET 应用分为 3 类:Safety-of-Life,Safety 和 Nonsafety.同时,有连接和无连接流在 VANET 中共存.如事故告警目前一般采用无连接方式,而信息服务一般采用有连接方式.无连接流的介入,使 VANET 传输控制协议设计变得相当复杂.

VANET 虽然环境复杂,但是可以利用它的有利因素,如路径稳定性可预测、使用有向天线扩大每跳传输范围、使用 GPS 位置信息增强路由层等.因此,需要取长补短、发挥优势、提高传输控制的有效性.

目前提出的各种移动自组织网络传输控制协议都具有一定的针对性和局限性.通过研究移动自组织网络传输控制协议,结合 VANET 应用与特性,本文讨论了 VANET 传输控制设计目标和要素.

3.1 设计目标

3.1.1 可靠性

可靠性是对传输控制最重要和最基本的要求,它保证数据在网络中可靠地传输.VANET 在多种因素影响下需要一个可靠的传输控制方案.目前提出的各种传输协议针对无线移动环境的各个子问题进行了探讨,如针对路由断开使用反馈的方法、针对伪重传采用不同机制检测处理的方法、针对最后一跳问题延迟确认的方法、拆分 TCP 连接分离拥塞控制与可靠性的方法以及基于反馈速率控制的方法等.

这些实现可靠性的方法可以分为两类:

(1) 反馈网络状态.不同的网络状态,如连接断开、信道质量不稳定、网络拥塞等,需要采取不同的传输控制策略.网络状态检测的关键是实时性.由于 VANET 中节点的高速移动性和街道形状对信道的限制,导致网络状态变化十分迅速,准确获取当前状态并及时传递给控制节点比较困难,需要修改中间路由器传输控制协议.

(2) 发送端本地估计网络状态,并据此调整发送速率.如 TCP-Vegas 观察 TCP 连接 RTT 的变化、TCP-Westwood 检测 ACK 的到达率,然后根据这些变化制定发送端传输控制决策.

VANET 传输控制不但要保障端到端应用的可靠性,而且要提高事故报警的可靠性.具体表现在多种应用共同竞争网络资源时,交通安全类应用获取网络资源的优先级最高.

3.1.2 公平性

VANET 的不公平是绝对的,公平是相对的.由于各类应用同时存在,它们获取资源的优先级不同,导致资源分配的不公平性.另外,研究表明,IEEE 802.11 退避机制不公平,多流同时竞争信道时,某条流可能一直占用信道,其他流根本无法竞争到网络资源[75].隐藏点问题、暴露点问题、链路占领问题、不对称竞争信道问题、网络容量有限等因素加剧了 VANET 的不公平性.

传输控制只能在一定程度上缓解不公平,而不能完全消除不公平.MAC 层的指数退避机制将竞争双方的竞争能力在初期就拉得很大,造成一方绝对占有优势.MAC 层不公平性如果得不到改善,那么传输层必然遭遇相同的问题.例如,在干扰流传输完毕之前,暴露节点几乎没有机会接收到数据.802.11 没有解决暴露节点问题[76].

3.1.3 兼容性

由于 Internet 的普及,要求 VANET 网络能够方便地接入 Internet,获取数据和多媒体信息,并支持 Web 服务.VANET 与 Internet 存在巨大差异,如信道速率不同、底层可靠性不同、拥塞控制机制不同、节点移动性不同等.

目前存在 3 种方式使 VANET 与 TCP 互联:

(1) 适当修改 TCP 拥塞控制机制,使之适应无线移动环境.这种方式能否在无线环境中提供最大效能还有待研究.

(2) 将 TCP 连接拆分为有线和无线两段,无线段使用独立的无线传输协议.这种方式需要建立支持协议转换的边缘路由器,完成两种传输控制协议的交互.

(3) 设立新的协议栈统一接口,屏蔽不同传输协议的实现细节.这种方式需要建立新的服务原语,增加了层

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

间传输的延迟.

3.2 设计要素

VANET 是一个以应用为核心的特殊网络,因此,传输控制设计必须围绕应用展开.本文根据 VANET 的特点提出了针对 VANET 的协议框架.图 2 是 VANET 系统示意图.

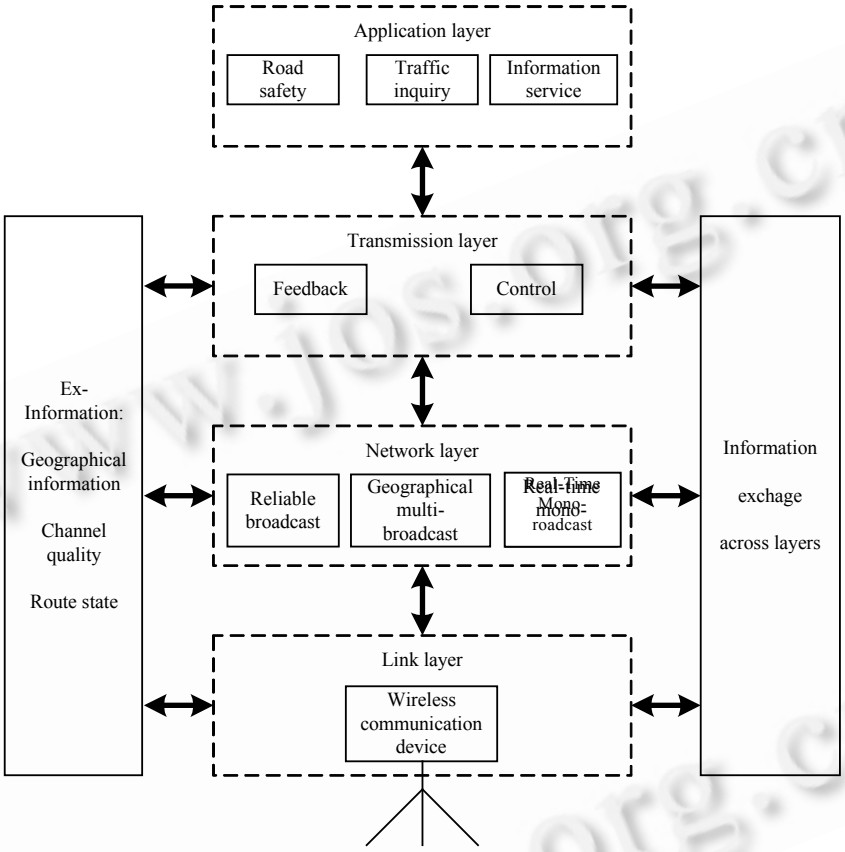

Fig.2 The system design of VANET

图 2 VANET 的系统设计

VANET 传输层充分利用自身优势,在协议中辅以外部信息和各层信息,围绕 VANET 应用需求规划和设计,以提供可靠的数据传输.外部信息的感知与跨层交换组成了信息感知技术,它负责监测和估计底层辅助信息,如地理信息、信道质量、路径状态等,然后,感知到的信息通过反馈机制反馈到传输控制中的控制节点,以实现控制节点正确的速率控制.

本文对以上 VANET 系统设计中涉及到的 3 个传输协议设计要素——信息感知、反馈机制和控制机制分别进行讨论.设计目标针对协议整体,设计要素根据协议本身的构成考虑,两者关系十分密切.每个设计要素缺一不可,蕴含了所有的设计目标,但是,只有其整体才能达成设计目标.

3.2.1 信息感知

VANET 具有其他自组织网络所不具有的丰富的外部信息,这些信息能够简化复杂的传输控制,对设计高效、可靠的传输控制协议具有不可忽视的作用.例如,事故告警广播考虑到地理环境的影响和链路质量的变化,可以在环境恶劣的中继点多次广播,以提高事故告警的可靠性;端到端应用通过预测路径生命期,预先调整发送速率,减少网络断开对传输的影响.因此,如何感知和获取这些信息技术,即信息感知技术,对 VANET 至关重要.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

本文将获取的外部信息分为地理信息、信道质量和路径状态 3 类:

地理信息.GPS 和 GIS 不仅可以为 VANET 中移动节点提供自身位置信息,还可以得到所在区域的地理信息,比如路口分布、道路方向、建筑物情况等.

信道质量.感知链路质量的最佳位置在数据包接收节点,如使用专用软件可以测量天线周围的信噪比,但无法将链路质量及时送达发送节点,因此需要在发送节点估计链路质量.

路径状态.VANET 节点运动相对其他移动自组织网络更有规律,因此路径状态可估计.街道形状影响移动车辆之间的 LOS(line of sight),从而影响链路寿命.结合移动车辆特征(速度、传输范围等),不仅可以预测链路寿命,而且可以预测路径寿命.再综合道路情况,可以预测路径连接时间和断开时间,即可以预测路径状态.

3.2.2 反馈机制

反馈机制广泛存在于传输控制当中,例如,TCP 通过反馈 ACK 的方式表示成功接收到数据包的信息,TCP-F 通过中间节点反馈路由断开的信息等.反馈机制是指中间节点或端节点将自身状态信息或者底层收集到网络状态信息以显式反馈的方式,通过指定的路径传递给控制节点,为控制节点提供明确的状态信息.

反馈机制对于 VANET 的传输控制具有重大意义.首先,承载底层感知信息.它将其他节点底层感知的信息,如信道质量和路径状态等,反馈到控制节点.其次,明确网络状态.它使控制节点明确远方的网络状态,从而正确制定决策,避免调用错误的控制机制.最后,反馈本身提供网络状态估计.如,TCP-Westwood 基于 ACK 的返回速率估计可用带宽;TCP-Vegas 基于 RTT 变化估计可用带宽.

根据 VANET 应用的需要,反馈内容多种多样,如路由断开、链路质量、包是否正确接收、路径可用带宽等.反馈位置灵活多变,如中间节点、端节点.

反馈机制的目标是将反馈信息快速而可靠地传递到控制节点.但是,当反馈与数据传输路径一致时存在冲突,反馈包与数据包相互竞争信道,降低了网络吞吐量.因此,针对 VANET 不同的应用环境可以考虑使用其他方法,如在应答包中捎带反馈消息、使用多接口开辟独立的反馈信道等.

最后,必须考虑反馈机制本身对 VANET 资源的消耗与它所做出的贡献之比.反馈机制本身要消耗一定的网络资源,同时它又能协助传输控制的有力实施,因此,二者之比越低越能发挥反馈效果,提高网络吞吐量.

3.2.3 控制机制

VANET 的传输控制与 TCP 的拥塞控制有所不同.VANET 不能提供可靠的底层传输,多种网络状态可能造成 TCP 误判为网络拥塞,如链路断开造成 TCP 超时重传、MAC 层差错恢复造成 TCP 超时、信道差错造成 TCP 快速重传、ACK 积累造成超时等.VANET 传输控制需要处理网络多种状态,因此,设计变得复杂.

从控制的手段来看,包括窗口控制和速率控制.基于 TCP 改进的传输控制协议都是基于窗口控制,它们沿用 TCP 的滑动窗口机制,通过改变窗口大小和慢启动门限值来控制流的发送行为;ATP 则是基于速率控制,通过周期性反馈来调整数据发送速率.

从控制的位置来看,包括端节点控制和中间节点控制.TCP 的各种变体都是端控制,即在发送端控制数据包的发送行为,在接收端控制 ACK 的反馈行为;而拆分连接的传输控制协议则除了端节点控制之外,中间节点也进行控制,如 I-TCP 在中间路由器上自主控制 ACK 的转发行为.所以,中间节点控制的方法可能会破坏传输控制协议端到端语义的完整性.

中间节点的缓存机制给控制带来了极大的便利:首先,由于已经在网络中,因此接收端未收到的数据包不必由发送端重传;其次,由于短连接的包传输成功率更高,因此可以减少包丢失的概率,提高传输的可靠性;最后,增加了中间节点控制的灵活性.Split TCP,Snoop 和 FAST-TCP 均在中间路由器上使用缓存.但是,缓存的存在增加了中间节点的负担.

高优先级无连接流的介入扩展了 VANET 传输控制的范围.有线网络并没有为无连接流提供可靠性,而 VANET 事故告警应用则要求在多流竞争的情况下保持告警信息的优先传输.这扩展了 VANET 传输协议控制的范围,不但要控制有连接流,还要解决有连接流与无连接流之间的竞争问题.

TCP 的拥塞控制看起来已经不适合 VANET 的应用与特性.拥塞窗口在无线网络中显得过于激进,极易进入

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

不必要的拥塞控制[34,77].而且,TCP 与 VANET 的 MAC 层差错恢复机制相互冲突,将引起伪重传等问题.

VANET 传输控制设计有两种选择:设计全新的传输控制机制和改进 TCP 的拥塞控制机制.基于 TCP 改进的传输协议属于后者,它一方面在一定程度上适应了无线移动链路环境,另一方面与 TCP 相兼容,能够方便地接入 Internet,因此,可以较快地应用到商业当中;而全新的传输协议则不具备与 TCP 兼容的能力,必须通过特定的网关转换才能连接到有线网络.但全新传输协议在传输控制上由于不受限于 TCP,因此能够根据 VANET 特性量体裁衣,更好地适应 VANET 网络.

4 总结与展望

近年来,VANET 技术越来越受到关注,它的目标是减少交通事故、改善交通问题.本文结合 VANET 应用及其特性,讨论了 VANET 的传输设计问题.详细地分析了目前无线传输控制协议应用于 VANET 的利与弊,并由此提出了 VANET 传输控制协议设计目标和设计要素.

车辆间通信是未来发展的必然趋势,而针对 VANET 应用与特性设计的传输控制协议,对于 VANET 的进一步发展不可或缺.在此基础上,以下内容有待研究:1) VANET 特有的无线信道特征探索.VANET 无线信道受环境因素影响很大,而在道路上,车辆的影响不可忽视,信道规律不同于其他网络.2) 基于应用的多优先级策略研究.在 VANET 中,对不同应用需要分配不同优先级,能够处理优先级问题的传输协议需要得到重视.3) 多流竞争下公平性保证问题.VANET 信道呈“管状”分布,多流竞争下,资源争夺非常激烈,公平性问题更加突出.4) VANET 网络资源优化问题.VANET 容量及其有限,为缓解资源分配不合理问题,必须考虑相应合理的优化方案.5) 无连接流的可靠性.无连接流在 VANET 中占有重要地位,提供无连接流高可靠性必不可少.

References:

[1] Fiebig B. European traffic accidents and purposed solutions. In: Proc. of the ITU-T Workshop on Standardisation in Telecommunication for Motor Vehicles. 2003. 24−25. http://www.itu.int/ITU-T/worksem/telecomauto/presentations/telecomauto_1103_s2intro_pres.ppt

[2] NoW: Network on wheels. 2006. http://www.network-on-wheels.de

[3] Internet ITS consortium. 2006. http://www.internetits.org

[4] Luo J, Hubaux JP. A survey of Inter-vehicle communication. Technical Report, Switzerland: EPFL(Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), IC(Informatique & Communications), 2004.

[5] Blum JJ, Eskandarian A, Hoffman LJ. Challenges of intervehicle ad hoc networks. IEEE Trans. on Intelligent Transportation System, 2004, 347−351.

[6] 2006. http://www.sigmobile.org/workshops/vanet2006/index.html

[7] 2006. http://www.car-2-car.org/

[8] 2006. http://www.aptsec.org/meetings/2005/ASTAP9/documents/ASTAP05-FR09-EG.ITS-03%20ASTAP%20ITS-EG%20Japan.ppt

[9] Franz W, Eberhardt R, Luckenbach T. Fleetnet—Internet on the road. In: Proc. of the 8th World Congress on Intelligent Transportation Systems. 2001. http://www.et2.tu-harburg.de/fleetnet/pdf/FleetNet_Flyer.pdf

[10] Shiraki Y, Ohyama T, Nakabayashi S, Tokuda K. Development of an Inter-vehicle communications system. Special Edition on ITS (Intelligent Transportation Systems), 2001,68:11−13.

[11] Seki K. Applications of DSRC in Japan. ITS Center, Japan Automobile Research Institute, 2002.

[12] Werner J. USDOT outlines the new VII initiative at the 2004 TRB Annual Meeting. In: Newsletter of the ITS Cooperative Deployment Network. 2004. http://www.nawigts.com/icdn/vii_trb04.html

[13] Nadeem T, Dashtinezhad S, Liao C. TrafficView: Traffic data dissemination using car-to-car communication. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2004,8(3):6−19.

[14] Hao J, Hou KM, LI JJ, Chanet JP, Vaulx CD, Zhou HY, Sousa GD. The capacity and packets delivery of MANET on road: MANETOR. In: Yang LT, Arabnia HR, Wang LC, eds. Proc. of the Global Mobil Congress 2005 (GMC 2005). Las Vegas: CSREA Press, 2005. 553−558.

[15] Schmitz R, Leiggener A, Festag A, Eggert L, Effelsberg W. Analysis of path characteristics and transport protocol design in vehicular ad hoc networks. In: Proc. of the 63rd IEEE Semiannual Vehicular Technology Conf. on VTC-Spring. 2006. http://www.ieeevtc.org/vtc2006spring/committees.php

[16] Mimoza D, Arjan D, Leonard B. Emergency broadcast protocol for inter-vehicle communications. In: Proc. of the 11th Int’l Conf. on Parallel and Distributed Systems—Workshops (ICPADS 2005). Fuduoka: IEEE Computer Society, 2005. 402−406.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[17] Toyserkani AT, Strom EG, Svensson A. An efficient broadcast MAC scheme for traffic safety applications in automotive networks. In: Proc. of the WCNC. Las Vegas: IEEE Press, 2006. 2100−2105.
[18] Biswas S, Tatchikou R, Dion F. Vehicle-to-Vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety. IEEE Communications Magazine, 2006,44(1):28−29.
[19] Ni SY, Tseng YC, Chen YS. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. In: Kodesh H, ed. Proc. of the 5th Annual ACM/IEEE Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Seattle: ACM Press, 1999. 152−162.
[20] Gupta P, Kumar PR. The capacity of wireless networks. IEEE Trans. on Information Theory, 2000,46:388−404.
[21] Rudack M, Meincke M, Lott M. On the dynamics of ad hoc networks for inter vehicle communication (IVC). In: Proc. of the ICWN 2002. 2002. http://www.et2.tu-harburg.de/fleetnet/pdf/ICWN_dynamics_fin_v3.6.pdf
[22] Viswanath K, Obraczka K. Modeling the performance of flooding in wireless multi-hop ad hoc networks. Computer Communications, 2006,29(8):949−956.
[23] Oliveira R, Braun T. TCP in wireless mobile ad hoc networks. Technical Report, IAM-02-003, 2002.
[24] Li HW, Wu JP, Ma H, Zhang PY, Luo SX. Performance optimization for IEEE 802.11 based on the range of contention station number. Journal of Software, 2004,15(12):1850−1859 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1850.htm
[25] Xu S, Saadawi T. Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks. IEEE Communication Magazine, 2001,130−137.
[26] Hightower J, Borriello G. Location systems for ubiquitous computing. Computer, 2001,34(8):57−66.
[27] Tomos J. Wireless channel monitoring on mobile ad-hoc network. Int Cl: H04L12/56, USA Pat CN03820907.1, 2003.
[28] 2006. http://www.umts-forum.org/servlet/dycon/ztumts/umts/Live/en/umts/Home
[29] Aziz FM. Implementation and analysis of wireless local area networks for high mobility telematics [MS Thesis]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
[30] Ravi MY, Adithya C, Mohan S, Ranga M. Reliable MAC broadcast protocol in directional and omni-directional transmissions for vehicular ad hoc networks. In: Proc. of the 2nd ACM Internet Workshop on Vehicular Ad Hoc Network (VANET 2005). Cologne: ACM Press, 2005. 10−19.
[31] Gokhan K, Eylem E, Fusun O, Umit O. Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems. In: Proc. of the 1st ACM Workshop On Vehicular Ad Hoc Network (VANET 2004). Philadelphia: ACM Press, 2004. 76−85.
[32] Chlamtac I, Conti M, Liu J. Mobile ad hoc networking: Imperatives and challenges. Ad Hoc Networks, 2003,1(1):13−64.
[33] Zhang M, Wu JP, Lin C. Internet end-to-end congestion control: A survey. Journal of Software (in Chinese with English abstract), 2002,13(3): 354−363. http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/354.pdf
[34] Feng YJ, Sun LM, Qian HL, Song C. Improving TCP performance over MANET: A survey. Journal of Software, 2005,16(3): 434−444 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/434.htm
[35] Shi JL. Overview and prospective of MANET technology [DB/OL]. 2004 (in Chinese) http://www.lib.ict.ac.cn/itl/data/2004/7/
[36] Holland G, Vaidya N. Analysis of TCP performance over mobile ad hoc networks. Wireless Networks, 2002,8(2):275−288.
[37] Hala E. Improving TCP performance over mobile networks. ACM Computing Surveys, 2002,34(3):357−374.
[38] Chen X, Zhai HQ, Wang JF, Fang YG. TCP performance over mobile ad hoc networks. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2002,29(1/2):129−134.
[39] Ian F. Wireless mesh networks: A survey. Computer Networks, 2005,7(4):445−487.
[40] Brakmo L, Peterson L. TCP Vegas: End-to-End congestion avoidance on a global Internet. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1995,13(8):1465−1480.
[41] Takagaki K, Ohsaki H, Murata M. Analysis of a window-based flow control mechanism based on TCP Vegas in heterogeneous network environment. IEICE Trans. on Communications, 2002. 89−97.
[42] Casetti C, Gerla M, Mascolo S. TCP Westwood: End-to-End congestion control for wired/wireless networks. Wireless Networks, 2002,8(5):467−479.
[43] Xu K, Tian Y, Ansari N, TCP-Jersey for wireless IP communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(4):747−756.
[44] Capone A, Martignon F, Palazzo S. Bandwidth estimates in the TCP congestion control scheme. In: Proc. of the Tyrrhenian IWDC. Taormina: Springer-Verlag, 2001. 614−626.
[45] Chen K, Xue Y, Nahrstedt K. On setting TCP's congestion window limit in mobile ad hoc networks. In: Akyildiz F, Li Y, Sivakumar R, eds. Proc. of the IEEE ICC 2003. Alaska: IEEE Press, 2003. 1080−1084.
[46] Vaidya NH. Mobile ad hoc network: Routing, MAC and transport issues. Technical Report, Texas A & M University, 2000.
[47] Chandran K, Raghunathan S, Venkatesan S, Prakash R. A feedback-based scheme for improving TCP performance in ad hoc wireless networks. IEEE Personal Communications, 2001,8(1):34−39.
[48] Ebsn B, Krishha P, Vaidya NH, Pradhan DK. Improving performance of TCP over wireless networks. In: Proc. of the 17th Int'l Conf. on Distributed Computing Systems. Baltimore: IEEE Computer Society Press, 1997. 365−373.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[49] Holland G, Vaidya NH. Analysis of TCP performance over mobile ad hoc networks. In: Proc. of the ACM MOBICOM'99. Seattle: ACM Press, 1999.
[50] Kim D, Toh C, Choi Y. TCP-Bus: Improving TCP performance in wireless ad-hoc networks. In: Proc. of the ICC. New Orleans: IEEE Press, 2000. 1707−1713.
[51] Goff T, Moronski J, Phatak DS. Freeze-TCP: A true end-to-end TCP enhancement mechanism for mobile environments. In: Proc. of the IEEE Infocom. Tel Aviv: IEEE Press, 2000. 1537−1545.
[52] Dyer TD, Boppana RV. A comparison of TCP performance over three routing protocols for mobile ad hoc networks. In: Proc. of the ACM Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing—Mobihoc. Long Beach: ACM Press, 2001. 56−66.
[53] Fu ZH, Greenstein B, Meng XQ, Lu SW. Design and implementation of a TCP-friendly transport protocol for ad hoc networks. In: Proc. of the 10th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP 2002). Paris: IEEE Press, 2002. 216−225.
[54] Liu NA. Wireless Local Area Networks (WLAN)—Principle, Technique and Application. Xi'an: Xi'an Electronic Science & Technology University Press, 2004 (in Chinese).
[55] Ludwig R, Katz R. The Eifel algorithm: Making TCP robust against spurious retransmissions. ACM Computer Communication Review, 2000,30(1):30−36.
[56] Floyd S, Mahdavi J, Mathis M, Podolsky M. An extension to the selective acknowledgement (SACK) option for TCP. RFC 2883, 2000.
[57] Sarolahti P, Kojo M, Raatikainen K. F-RTO: An enhanced recovery algorithm for TCP retransmission timeouts. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003,33(2):51−63.
[58] Fu SJ, Mohammed A, William I. Effect of delay spike on SCTP, TCP reno, and Eifel in a wireless mobile environment. In: Proc. of the Int'l Conf. on Computer Communications and Networks. 2002. 575−578. http://roland.grc.nasa.gov/~ivancic/papers_presentations/2002/02icccn-long-del.pdf
[59] Mathis M, Mahdavi J, Floyd S, Romanow A. TCP selective acknowledgement options. RFC 2018, 1996.
[60] Singh AK, Kankipati K. TCP-ADA: TCP with adaptive delayed acknowledgement for mobile ad hoc networks. In: Proc. of the WCNC 2004/IEEE Communications Society. Atlanta: IEEE Communications Society, 2004. 1685−1690.
[61] Wang F, Zhang Y. Improving TCP performance over mobile ad-hoc networks with out-of-order detection and response. In: Proc. of the Mobihoc 2002. 2002. http://www.cs.utexas.edu/users/wangf/
[62] Bakre A, Bardinath BR. Implementation and performance evaluation of indirect TCP. IEEE Trans. on Computers, 1997,46(3): 260−278.
[63] Yavatkar R, Bhagawat N. Improving end-to-end performance of TCP over mobile internetworks. In: Proc. of the Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. 1995. 146−152. http://ieeexplore.ieee.org/iel2/3875/11297/00513474.pdf?arnumber=513474
[64] Brown K, Singh S. M-TCP: TCP for mobile cellular networks. Computer Communication Review, 1997,27(5):19−43.
[65] Kopparty S, Krishnamurthy S, Faloutous M, Tripathi S. Split TCP for mobile ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE GLOBECOM. 2002. http://www.cs.ucr.edu/~krish/splittcp.pdf
[66] Nanda S, Ejzak R, Doshi B. A retransmission scheme for circuit-mode data on wireless links. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1994,12(8):1338−1352.
[67] Ayanoglu E, Paul S, Laporta TF, Sabnani K, Gitlin R. AIRMAIL: A link-layer protocol for wireless networks. Wireless Networks, 1995,1:47−60.
[68] Balakrishnan H. Improving reliable transport and handoff performance in cellular wireless networks. ACM Wireless Networks, 1995,1(4):469−481.
[69] Fu ZH, Zerfos P, Luo HY. The impact of multihop wireless channel on TCP throughput and loss. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. San Franciso: IEEE Press, 2003. 1744−1753.
[70] Anantharaman V, Park SJ, Sundaresan K, Sivakumar R. TCP performance over mobile ad-hoc networks: A quantitative study. Wireless Communication and Mobile Computer Journal (Special Issue On Performance Evaluation Of Wireless Networks), 2004.
[71] Jin C, Wei D, Low S. Fast TCP: Motivation, architecture, algorithms, performance. Proc. of the IEEE InfoCom, 2004,14(6): 246−259.
[72] Sundaresan K, Anantharaman V, Hsieh HY, Sivakumar R. ATP: A reliable transport protocol for ad-hoc networks. In: Proc. of the ACM MobiHoc. Annapolis: ACM Press, 2003. 64−75.
[73] Liu J, Singh S. ATCP: TCP for mobile ad hoc networks. IEEE J-SAC, 2001.
[74] Marc T, Andreas F, Hannes H. System design for information dissemination in VANETs. In: Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Intelligent Transportation (WIT). 2006. 27−33. http://www.network-on-wheels.de/downloads/WIT2006_InfoDissem_ Torrent-Moreno_etal_wConfInfo.pdf
[75] Zhang L, Wang XH, Dou WH. Analyzing and improving the TCP flow fairness in wireless ad hoc networks. Journal of Software, 2006,17(5):1078−1088 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1078.htm

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[76] Xiao YK. Performance research on the MAC protocol and TCP in wireless ad hoc networks [Ph.D. Thesis]. Beijing: Tsinghua University, 2004 (in Chinese with English abstract)

[77] Xu WQ, Wu TJ. TCP issues in mobile ad hoc networks: Challenges and solutions. Journal of Computer Science and Technology, 2006,21(1):72−81.

附中文参考文献:

[24] 李贺武,吴建平,马辉,张培云,罗世新.基于竞争终端个数区间的 IEEE 802.11 性能优化.软件学报,2004,15(12):1850−1859. http://www.jos.org. cn/1000-9825/15/1850.htm

[33] 章淼,吴建平,林闯.互联网端到端拥塞控制研究综述.软件学报,2002,13(3):354−363. http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/354.pdf

[34] 冯彦君,孙利民,钱华林,宋成.MANET 中 TCP 改进研究综述.软件学报,2005,16(3):434−444. http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/434.htm

[35] 石晶林.移动自组织通信网络技术概况及未来前景[DB/OL]. 2004. http://www.lib.ict.ac.cn/itl/data/2004/7/

[54] 刘乃安.无线局域网——原理、技术与应用.西安:西安电子科技大学出版社,2004.

[75] 张磊,王学慧,窦文华.无线自组网络中 TCP 流公平性的分析与改进.软件学报,2006,17(5):1078−1088. http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1078.htm

[76] 肖永康.无线 Ad Hoc 网络中 MAC 协议和 TCP 的性能研究[博士学位论文].北京:清华大学,2004.

陈立家(1979－),男,河南开封人,博士生,主要研究领域为高速信息网络,无线自组织网络.

郭成城(1961－),男,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机通信网.

江昊(1976－),男,博士,副教授,主要研究领域为高速信息网络,无线自组织网络.

徐武平(1970－),男,博士,讲师,主要研究领域为高速网络通信与安全.

吴静(1981－),女,博士生,主要研究领域为网络拥塞控制.

晏蒲柳(1962－),女,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机通信网.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn