

# LTE 中基于协作 AODV 协议的拥塞控制机制研究

周建存<sup>1,2</sup> 郝夏斐<sup>3</sup>

(湖南城市学院信息科学与工程学院 益阳 413000)<sup>1</sup> (中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)<sup>2</sup>  
(安阳师范学院公共计算机教学部 安阳 455000)<sup>3</sup>

**摘要** 针对 LTE 网络已有的拥塞控制算法无法适应分布式网络拓扑和复杂的网络环境以及自身效率低、开销大等问题,分析了 LTE 网络无线信道质量对 AODV 协议性能的影响,建立了基于路径损耗阈值的协同合作方式下的 AODV 路由机制,在此基础上,提出了一种基于队列长度和跳数的拥塞控制策略,分别通过 LTE 网络链路级仿真实验验证了改进后的基于协作路由协议的无线 TCP 拥塞控制机制的性能。数学分析和仿真结果表明,所提协作拥塞控制机制与传统的 TCP 拥塞控制机制相比,在平均丢包数、队列长度抖动、时延、时延抖动和吞吐率等方面均具有良好的性能。

**关键词** 长期演进,协作路由协议,按需路由协议,拥塞控制管理

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Research on Congestion Control Mechanism Based on the Cooperative AODV Routing Protocols in the LTE Networks

ZHOU Jian-cun<sup>1,2</sup> HAO Xia-fei<sup>3</sup>

(School of Information Science and Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)<sup>1</sup>

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)<sup>2</sup>

(Department of Computer Science and Technology, Anyang Normal University, Anyang 455000, China)<sup>3</sup>

**Abstract** Aiming at the problems that existing GPP-LTE network congestion control algorithm can not adapt to the distributed network topology and the complex network environment and its efficiency is low, and cost is big, this paper analyzed LTE network wireless channel quality on the AODV protocol performance. Based on the path loss threshold cooperative mode AODV routing mechanism, this paper put forward a based on the queue length and the number of hops congestion control strategy. LTE network link level and system level simulation experiment proves performance of the modified congestion control mechanism in wireless TCP based on cooperative routing protocol. Mathematical analysis and simulation results show that compared with the traditional TCP congestion control mechanism, the cooperative congestion control mechanism has better performance.

**Keywords** Long term evolution(LTE), Cooperative routing protocol, AODV, Management of congestion control

## 1 引言

在 LTE 网络中,随着 Internet 应用业务的广度深入和日益复杂的多样性,网络数据流拥塞可能性变得越来越大。大部分 LTE 网络负载<sup>[1]</sup>主要是基于 TCP/IP 协议,如果没有进行有效的控制以及从拥塞状态恢复到正常状态,将会造成严重网络拥塞甚至网络瘫痪,因此如何使 TCP 拥塞控制适应 LTE 网络的动态拓扑、确保网络稳定性和鲁棒性<sup>[2,3]</sup>,已经成为亟待解决的问题。

文献[4]研究了一种适用于移动互联网的基于动态检测方案的 AODV 协议;文献[5]分析了移动 Ad hoc 网络中 AODV 路由恢复机制;文献[6]在无线 Mesh 网中分析了基于

定向洪泛的按需路由机制,并证明了其有效性,但均未考虑协作通信方式带来的增益。此外,文献[7-9]对网络拥塞控制相关协议进行了深入分析,包括吞吐量和时延等性能,但未考虑路由协议对拥塞控制的影响。

因此,基于已有成果深入分析和研究了 LTE 网络拥塞产生的原因及无线 TCP 存在的诸如时延、链路速率和 ACK 泛滥等主要问题,分析了 LTE 网络的中继节点选择问题,提出了基于选择性译码转发协议的协同合作方式下的 AODV 路由机制和无线 TCP 拥塞控制策略。通过数学分析和仿真实验的方法,对所提拥塞控制机制与传统 TCP 拥塞控制机制在 LTE 网络的时延、吞吐量、可靠性和中断概率等方面进行了性能对比,同时验证了协作 AODV 路由协议的优越性。

到稿日期:2011-10-15 返修日期:2012-02-20 本文受湖南省教育厅科研项目(2009FJ3063),益阳市科技局项目(2011JZ27)资助。

周建存(1977-),男,硕士,讲师,CCF 会员,主要研究方向为计算机网络技术,E-mail:zhoujiancun101@126.com;郝夏斐(1975-),女,讲师,主要研究方向为计算机虚拟仿真技术及应用。

## 2 基于协作 AODV 协议的拥塞控制

### 2.1 3GPP 中基于拥塞控制的协作机制

#### 2.1.1 LTE 网络拥塞产生原因及无线 TCP 问题

LTE 网络中,当 TCP 源服务器端与核心网络 SAE 端的网络负载远超过无线资源容量和处理能力时,将发生网络拥塞。因此,产生拥塞的主要原因有:

(1)中继转发节点存储能力受限。当多条端到端的传输服务共享同一个中继节点实现数据转发时,该节点上将产生服务队列。若该节点的存储能力无法满足多条传输业务的需求,将会发生丢失数据包现象,对于突发数据流和实时流媒体数据流业务,更无法提供有效的保障。因此需要建立一种有效的中继节点选择机制。

(2)无线链路带宽受限。链路级低速信道无法适应高速上层数据流业务时,将会导致网络拥塞。如果 TCP 源服务器端数据流发送速率大于无线链路信道容量,无线 TCP 端到端通信可靠性将无法保证,同时中继转发时的低速链路将成为端到端通信的瓶颈,从而导致拥塞发生。因此需要建立一种具有选择能力的中继判定协议和路由更新机制。

(3)LTE 网络无线资源分布的不均衡性、分布式组网模式以及数据流分布的不均衡性,使得 LTE 无线资源分配不均,负载失衡。因此需要研究一种协作方式下的无线 TCP 拥塞控制机制。

此外,在 LTE 网络高速无线环境下实施拥塞控制时,有如下几点亟待解决的问题:

(1)端到端时延。TCP 源服务器与核心网络 SAE 之间端到端连接初期,无线信道尚未充分利用,对 LTE 网络应用业务用户来说仍处于等待状态,那么将导致数据传输时延增长。

(2)无线链路传输速率。数据流的突发性和实时性,使得 LTE 网络承载的网络业务速率呈现动态特性。由此可知,若 TCP 源服务器端增大数据发送速率,而此时网络处于拥塞控制状态,则此次端到端通信需重新分配资源进入等待状态;若 TCP 源服务器端降低速率,将引起中继节点上链路级缓冲队列崩溃,导致误包率增大,时延抖动激烈。

(3)ACK 包泛滥。LTE 网络中,上行信道和下行信道的无线链路工作频率不同,确保上行数据流和下行数据流通过不同且独立的信道衰落,但同时上行和下行信道上发送的 ACK 数据包成倍增加,数据流业务越多,ACK 数据包越泛滥。

(4)无线链路中断概率。LTE 网络中的移动节点进行漫游切换小区操作时,无法连接到基站或有障碍物折射信号,这将导致无线链路中断,无法进行路由选择或者漫游到的小区用户量较大,无法为该移动节点提供有效保障。

#### 2.1.2 协作 AODV 协议

基于上节分析的 LTE 网络中产生无线 TCP 拥塞控制的原因和主要挑战问题,提出了一种协同合作方式下的 AODV 路由机制。

LTE 网络中,协同合作方式下的 AODV 路由协议可以不增加任何附加控制信息,而在候选节点中进行中继判定,在

TCP 源服务器端与核心网络 SAE 端之间建立多条可达中继节点组成的传输路径,形成网状结构。多协作传输路径网状体系包括主路径和替代路径,这些多路径处于路由响应阶段即可建立,充分利用无线通信方式下广播信道可共享的优势,可达中间节点监听 TCP 源服务器端与核心网络 SAE 端广播信息,接收来自邻居节点发送的分组,并反馈 hello 数据包,使其加入候选中继节点队列。

如果网络中间转发数据节点收到来自可达范围内的邻居节点的路由回复(RREP)消息,但并不是针对该节点的确认时,该节点将此次通信的邻节点加入到候选中继节点队列,同时反馈一个 RREP 分组给核心网络 SAE 节点,以更新其协作节点表单,并建立一条备用传输路径。如果某节点接收到可达范围内来自核心网络 SAE 经中间节点转发的同一多条替代路由信息和候选中继节点表单,则根据最短时延或最小跳数等原则,选择一条最佳的路径并更新至该节点路由表。候选中继节点队列、多路径信息表单和路由表共同组成协同合作方式下的多路径传输网。处于路由维护阶段时,如果发生无线链路中断导致链路失效,则上一跳节点与候选中继节点队列、多路径信息表单和路由表共同组成协同合作方式下的多路径传输网,重新建立协作路径进行数据转发。

此外,协作 AODV 还增大了节点工作频率和识别能力,扩大了监听范围,在无线信道上监听 RREP 消息的同时,不断监听有效网络负载即无线数据包。其目的在于在提高无线移动节点的路径发现概率和路由表更新能力的同时,不产生任何冗余的附加控制信息,并协作 AODV 在路由维护阶段加入本地修复机制。

因此,协作 AODV 路由机制工作流程要点描述如下:

(1)多路径发现阶段,针对 TCP 源服务器端与核心网络 SAE 端之间的中间节点状态,计算无环的不相交路径,并根据协作中继队列表单形成规则,建立和维护无环路径以及路由更新规则;

(2)多条不相交路径以及中继节点队列充分利用了洪泛方式的特殊性;无环路径根据协作跳数进行实时维护。

(3)协作 AODV 可以充分适应 LTE 网络的高速动态网络环境特性,为其提供有效的无线链路容错能力和本地路由恢复能力。

(4)协同合作方式因充分考虑了无线环型广播特性,通过多路径和中继节点转发的方式显著提高了无线链路数据传输率,并缩短了网络延迟。

(5)协作 AODV 不会直接丢弃重复的路由请求(RREQ)包,它将重复的 RREQ 包中的信息记录在一个 RREQ 表中。

(6)针对多路径节点相交问题,协作 AODV 要求中间节点接收到可达范围内的邻居节点的路由回复(RREP)包后,在 RREQ 信息表中去掉与其相关的表单项,同时将 TCP 源服务器端信息写入该节点的实时路由表中。

(7)端到端之间的中间节点修改 RREQ 表项信息,自动识别并维护 TCP 源服务器端与核心网络 SAE 端之间的最佳路径,此处最佳可以为最短传输路径、最小跳数或最短传输时延。当中间节点接收的 RREP 消息无法继续传输时,该节点将要求上一跳协作节点向 TCP 源服务器端实时反馈路由发

现错误消息分组,为下一次端到端通信提供多路径选择和中断判定的依据,并要求上一跳协作节点重新将 RREP 消息转发至 TCP 源服务器。

## 2.2 LTE 中基于协作的拥塞控制机制

LTE 网络中的协作 AODV 协议是由协同合作方式下的按需路由和中继来判决的。当中间节点存储转发数据分组时,无线接口上行信道接收数据分组和下行信道发送数据分组的速率设置为两个门限值,且中继节点采用选择性译码转发机制,因此中继节点传输数据所处工作状态共有 3 类。

1 类工作状态:中继节点上行和下行无线信道上传输的数据分组的速率和吞吐率呈上升趋势,端到端传输的中继节点承载网络负载较大。

2 类工作状态:中继节点上行无线信道链路速率大于下行信道。

3 类工作状态:中继节点上行和下行无线信道无线链路速率较小且吞吐量低,中继节点承载的网络负载呈下降趋势。

假设对 TCP 源服务器端与核心网络 SAE 端存在多路径集合  $R\{r_0, r_1, r_2, \dots, r_m\}$ ; 其中  $r_i \in \{i, Cooperative(r_i)\}$ ,  $(0 \leq i \leq m, i \in N)$  定义为:  $i$  记录第  $i$  条协作路径;  $Cooperative(r_i)$  记录第  $i$  条协作路径上的中继节点。协作路径上的路由开销与协作节点跳数成反比,如式(1)所示。

$$S = \frac{1}{Cooperative(r_i)}, (r_i \neq 0) \quad (1)$$

所提的协作拥塞控制机制描述中继节点传输工作状态,记为  $L$ ,其定义为上行信道速率与下行信道速率之比,如式(2)所示。若  $L$  值变小,表明此时 LTE 网络将会发生拥塞。

$$L = \frac{PTR}{PRR} \quad (2)$$

式中,  $PTR$  记录中继节点下行无线信道速率;  $PRR$  记录中继节点上行无线信道速率。以  $T$  秒为采样的单位时间。发现,  $L$  将随着中继节点传输工作状态类别而发生改变。  $PTR$  和  $PRR$  采用指数加权移动平均法,根据中继节点过去的  $PTR_k$  和采样的  $PTR_t$  分析,得到将来的中继节点下行无线信道速率  $PTR_{k+1}$ ,从当前的  $PRR_k$  和采样的  $PTR_t$  分析得到将来中继节点上行无线信道速率  $PRR_{k+1}$ :

$$PTR_{k+1} = \alpha \times PTR_k + (1 - \alpha) \times PTR_t \quad (3)$$

$$PRR_{k+1} = \alpha \times PRR_k + (1 - \alpha) \times PRR_t \quad (4)$$

协作 AODV 路由协议中,根据 TCP 源服务器的路由需求,实时监测无线信道流量,当突发性数据流加入无线信道后,根据上行和下行无线信道速率门限值,结合选择性译码转发机制,将中继节点状态由状态机自动转至 2 类或 3 类工作状态。针对 1 类工作状态的中继节点,给出网络拥塞预警信息,并及时向候选中继节点广播网络性能下降趋势,警告分组。由此可以发现,基于协作 AODV 路由协议的拥塞控制机制可以根据这 3 类中继节点工作状态实施拥塞控制,结合 TCP 源服务器路由需求和中继节点传输工作状态对协作 AODV 路由协议进行实时监控和修正多路径。

## 3 性能分析与验证

本节通过 LTE 网络链路级仿真实验,分析和验证了提出的基于协作 AODV 路由协议的拥塞控制机制的通信性能。

基于 COST 231-Hata 链路级分析信道模型进行 5 组实验,针对 LTE 网络郊区无线环境的建立损耗模型,其路径损耗如式(5)所示。

$$L = 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + [6.55 \log_{10}(h_b)] \log_{10}(d) + C_m \quad (5)$$

式中,  $h_b$  表示核心网络 SAE 端到端传输所需无线基站高度;中继节点的天线高度记为  $h_m$ ;  $a(h_m)$  用于跟踪处于 3 类工作状态的中继节点天线高度与识别频率之间的修正因子,如式(6)所示:

$$a(h_{mobile}) = \begin{cases} \log_{10} 1.54 \cdot h_m - 0.87, & 1 \text{ 类工作状态} \\ (3.2 * \log_{10} 11.75 \cdot h_m)^2 - 3.67, & 2 \text{ 类工作状态} \\ (\log_{10} 1.54 \cdot h_m)^{3/2} - 1.36, & 3 \text{ 类工作状态} \end{cases} \quad (6)$$

5 组仿真实验求平均值后结果如图 1—图 3 所示,其中图 1 给出了平均分组投递率对比;图 2 给出了 TCP 源服务器端到 SAE 端的平均端到端延迟。对比结果表明,基于协作 AODV 协议的拥塞控制机制比传统的 TCP 拥塞控制机制更能适应突发性数据流和满足多样性应用业务动态变化的应用。

图 3 反映了 LTE 网络中并发 TCP 源服务器与核心网络 SAE 连接数对吞吐率的影响。可以发现,基于协作 AODV 协议的拥塞控制机制与传统的 TCP 拥塞控制机制的吞吐率均随并发 TCP 连接数目的增加而上升;但上升到一定程度后,再增加连接数,其反而下降。从总体上看,基于协作 AODV 协议的拥塞控制机制的吞吐量高于传统的 TCP 拥塞控制机制。基于协作 AODV 协议的拥塞控制机制可以根据 LTE 网络中继节点传输 3 类工作状态,自适应地建立多路径表单和选择传输路径,以避免网络多路径上出现拥塞节点。当中继节点某一类工作状态持续一段时间后,中继节点需要重新建立中继节点队列,避免突发性数据丢失。TCP 源服务器节点若无法正确收到确认,则启动系统级重传。

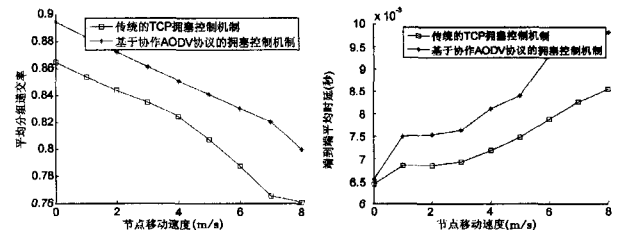


图 1 平均分组投递率

图 2 端到端平均时延

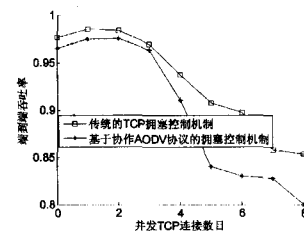


图 3 在不同并发 TCP 连接数目下的 Web 通信性能

结束语 为满足不断扩展的移动通信业务和数字业务的多样性,针对 LTE 网络已有的拥塞控制算法存在的诸多问题,深入分析和研究了 LTE 网络多种场景下无线信道质量对

AODV 协议路由开销、吞吐率等性能的影响,得到路径损耗门限值,并基于此实现了协作 AODV 路由算法,进而基于队列长度和跳数提出了一种改进的无线 TCP 拥塞控制策略。在 LTE 网络的链路级仿真实验中,验证了所提基于协作路由协议的拥塞控制机制的有效性。在数学分析和仿真实验中,将其平均丢包数、队列长度抖动、时延、时延抖动和吞吐率等与传统的 TCP 拥塞控制机制进行了对比,结果表明所提拥塞控制机制具有更好的性能。

### 参考文献

[1] Ahmavaara K, Haverinen H, Pichna R. Interworking architecture between 3GPP and WLAN systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(11): 74-81

[2] Bai R, Singhal M. DOA: DSR over AODV Routing for Mobile Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(10): 1403-1416

[3] Cerri D, Ghioni A. Securing AODV: the A-SAODV secure routing prototype[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(2): 120-125

[4] Nakayama H, Kurosawa S, Jamalipour A, et al. A Dynamic Anomaly Detection Scheme for AODV-Based Mobile Ad hoc Net-

works[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(5): 2471-2481

[5] Pereira N C V N, de Moraes R M. LatinCon05-Comparative Analysis of AODV Route Recovery Mechanisms in Wireless Ad Hoc Networks[J]. IEEE Latin America Transactions (Revista IEEE America Latina), 2010, 8(4): 385-393

[6] Kum D-W, Le A-N, Cho Y-Z, et al. An Efficient On-Demand Routing Approach with Directional Flooding for Wireless Mesh Networks[J]. Journal of Communication and networks, 2010, 12(1): 67-73

[7] Stuckey N C, Vasquez J R, Graham S R, et al. Stochastic control of computer networks[J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 6(3): 403-411

[8] Shi Z, Ionescu D, Zhang D. Packet Loss Control Using Tokens at the Network Edge[J]. IEEE Latin America Transactions (Revista IEEE America Latina), 2012, 10(1): 1391-1393

[9] Ariba Y, Gouaisbaut F, Rahme S, et al. Traffic monitoring in transmission control protocol/active queue management networks through a time-delay observer[J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 4(6): 506-517

[10] 梁柱. 组播拥塞控制策略设计与仿真研究[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2009, 21(5): 642-646

(上接第 121 页)

初始能量和剩余能量的差异。而 RDCA 通过节点的相对距离保证簇内通信代价,并考虑到了簇头与基站的通信代价,因此在节点全部异构的情况下, RDCA 比 SEP 和 LEACH-E 增加了 25% 和 18% 的稳定周期长度。

可利用基站收到的消息总数来评价算法的监控性能。图 6 描绘了在所有节点异构、50% 的节点为数据获取规律性节点、10% 的节点处于故障节点的网络中时, RDCA 算法在相当长的时间内基站收到的消息数量成线性增长,而其他算法在较早时间基站收到的消息数量增长速率便开始下降。

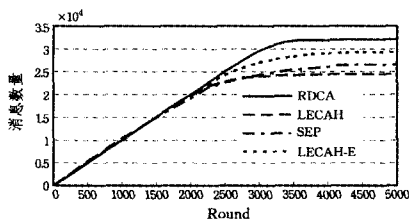


图 6 基站收到的消息数量

**结束语** 本文在多级能量异构环境下,提出了一个基于节点相对距离的成簇算法 RDCA。RDCA 根据节点间相对距离、节点到基站的距离以及节点当前能量来获得节点成为簇头的概率。仿真实验验证了该算法的有效性和良好的性能。

### 参考文献

[1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114

[2] 刘唐, 彭舰, 王建忠, 等. 延迟容忍移动传感器网络中基于节点优先级的数据转发策略[J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 140-143

[3] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291

[4] 沙超, 王汝传, 黄海平, 等. 基于生命周期划分的无线传感器网络节能策略[J]. 通信学报, 2010, 31(4): 1-7

[5] de Freitas E P, Heimfarth T, Pereira C E. Evaluation of coordination strategies for heterogeneous sensor networks aiming at surveillance applications [C] // Proceedings of IEEE Sensors (SENSORS). 2009: 591-596

[6] Dietrich I, Dressler F. On the lifetime of wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2009, 5(1): 1-39

[7] Heinzelman W R, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670

[8] Smaragdakis G, Matta I, Bestavros A. SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks [C] // Proc. of the Int'l Workshop on SANPA 2004. 2004

[9] Dilip K, Trilok C A, Patel R B. EEHC: energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks [J]. Computer Communications, 2009, 32(4): 662-667

[10] Zhou H B, Y M, Hu Y Q, et al. A novel stable selection and reliable transmission protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2010, 33(15): 1843-1849

[11] Doshi S, Bhandare S, Brown T. An on demand minimum energy routing protocol for a wireless ad hoc network[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2002, 6(3): 50-66

[12] Mhatre V, Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation[J]. Ad hoc Network Journal, 2004, 2(1): 45-63

[13] 卿利, 朱清新, 王明文. 异构传感器网络的分布式能量有效成簇算法[J]. 软件学报, 2006, 17(7): 481-489