无线 Ad Hoc 网络支持 QoS 的研究进展与展望*

李 云[1,2+], 赵为粮[1], 隆克平[1], 吴诗其[2]

[1](重庆邮电学院 光互联网及无线信息网络研究中心,重庆 400065)
[2](电子科技大学 抗干扰国防重点实验室,四川 成都 610054)

Development and Prospect on the Supported QoS in Wireless Ad Hoc Networks

LI Yun[1,2+], ZHAO Wei-Liang[1], LONG Ke-Ping[1], WU Shi-Qi[2]

[1](Special Research Centre for Optical Internet and Wireless Information Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)
[2](National Defense Key Laboratory of Anti-Interference Communication Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)
+ Corresponding author: Phn: +86-23-62460222, Fax: +86-23-62460220, E-mail: liyun@cqupt.edu.cn
Received 2003-08-20; Accepted 2004-06-10

Li Y, Zhao WL, Long KP, Wu SQ. Development and prospect on the supported QoS in wireless ad hoc networks. *Journal of Software*, 2004,15(12):1885~1893.
http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1885.htm

Abstract: The application environments and connection with the Internet require that wireless ad hoc networks should support Quality-of-Service (QoS). In a wireless ad hoc network, supporting quality-of-service is very difficult because of the inherent characteristics of wireless channel and the frequent change of network topology. This paper comprehensively summarizes and deeply analyzes the researches of recent years on the QoS architecture, QoS routing, QoS signaling, and media access control (MAC) mechanism that supports service differentiation and resource reservation in wireless ad hoc networks. Based on the analysis, this paper deeply discusses the problems that must be resolved to support QoS in wireless ad hoc networks, and points out the direction to the research in the future.

Key words: wireless ad hoc network; quality of service; QoS architecture; QoS routing; QoS signaling; media access control

摘 要: 无线 ad hoc 网络的应用环境以及与 Internet 的互连要求它必须提供一定的服务质量(QoS)保证,然而,无线信道固有的特点及节点移动造成网络拓扑的频繁变化,使得在无线 ad hoc 网络中支持 QoS 面临许多新的挑

* Supported by the National Science Foundation of China under Grant No.90304004 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2003AA121540 (国家高技术研究发展计划(863)); the Science and Technology Research Project of Chongqing Municipal Education Commission of China under Grant No.050310 (重庆市教委科学技术研究基金)

作者简介: **李云**(1974－),男,四川西充人,博士生,主要研究领域为 MAC 协议性能分析和改进,无线 ad hoc 网络 QoS;**赵为粮**(1962－),男,博士,教授,主要研究领域为个人通信,电磁场与微波通信;**隆克平**(1968－),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为 IP QoS,光互联网及交换技术;**吴诗其**(1938－),男,教授,博士生导师,主要研究领域为卫星通信,个人通信.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

战.从无线 ad hoc 网络的 QoS 体系结构、QoS 路由、QoS 信令、支持业务区分和资源预留的介质访问控制协议这 4 个方面出发,对近年来国内外在该方向取得的研究成果作了全面的概括总结和比较分析,系统阐述了在无线 ad hoc 网络中支持 QoS 的问题,指出了亟待解决的问题和今后的研究方向.

关键词: 无线 ad hoc 网络;服务质量;QoS 体系结构;QoS 路由;QoS 信令;介质访问控制

中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

无线 ad hoc 网络的应用环境以及多媒体业务流在网络中的传输需求要求无线 ad hoc 网络支持 QoS.具体表现在:在军事通信和紧急搜救等应用场合,信息应能实时、准确地传送,这要求无线 ad hoc 网络保证分组的带宽、时延;在军事通信和民事通信领域,当需要传送语音、图像等实时业务(如战地环境图像、临时视频会议等)时,由于这些业务对延时、延时抖动等 QoS 参数均较敏感,同样要求无线 ad hoc 网络提供业务的 QoS 保证.因此,无线 ad hoc 网络中 QoS 的研究是其应用场合的需要,具有重要的实际意义和应用价值.

1 无线 ad hoc 网络的 QoS 体系结构

由于无线 ad hoc 网络本身为用户提供了方便的多跳无线接入 Internet 的方案,因此,在设计无线 ad hoc 网络的 QoS 体系结构时,有两个主要因素需要考虑:一是无线 ad hoc 网络自身的特点;二是与 Internet 的无缝连接.

目前,在 Internet 上支持 QoS 的体系结构主要有两种:IntServ[1]和 DiffServ[2].IntServ 是一种基于流(per-flow)的资源预留机制,它引入了虚电路的概念,由 RSVP[3]作为建立和维护虚电路的信令协议,路由器通过相应的包调度策略和丢包策略来保证业务流的 QoS 要求.IntServ 要求网络中的节点保存基于流的状态信息,它对节点的存储能力和处理能力都有很高的要求,存在明显的可扩展问题.在无线 ad hoc 网络中,由于节点几乎全是便携式移动终端,其存储能力和处理能力均有限.同时,由于无线 ad hoc 网络拓扑的频繁变化,用于维护虚连接的 RSVP 协议将带来很大的开销,而无线 ad hoc 网络的带宽有限,因此,IntServ 并不适合无线 ad hoc 网络,尤其是较大型的无线 ad hoc 网络.

DiffServ 是一种基于类(流的集合)的 QoS 体系结构,它提供定性的 QoS 支持.接入 DiffServ 域的业务流首先在域的边缘被分类和调节(conditioning,包括测量(meter)、整形(shaping)、重标记(remarking)/丢弃(dropping)等),而域的核心节点只简单地根据包的 DS 域对包进行调度,DiffServ 不要求域的核心节点保存并在网络拓扑变化时更新基于流的状态信息,从而使核心节点的实现相对简单.从这一方面看,DiffServ 更适合无线 ad hoc 网络.但是,如果采用 DiffServ 结构,则在无中心、分布实施、拓扑频繁变化的无线 ad hoc 网络中,存在如何划分 DiffServ 域,如何定义并区分边缘节点和核心节点,以及如何进行动态资源分配等问题.

针对无线 ad hoc 网络,文献[4]的作者提出了一种称为灵活 QoS 模型(flexible QoS model for MANETS,简称 FQMM)的体系结构,该模型类似于 DiffServ,它将整个无线 ad hoc 网络定义为一个 DiffServ 域,网络中的每个节点既是边缘节点,又是核心节点,当某节点为业务流的源端时,该节点为边缘节点,当某节点作为业务流的中间转发节点时,该节点为核心节点.FQMM 提供了一种称为混合(hybrid)模式的资源分配策略,它既支持 IntServ 的基于流的资源分配,又支持 DiffServ 的基于类的资源分配,高优先级的业务基于流分配资源,低优先级的业务流基于类分配资源,以减小节点需保存的基于流的状态信息,提高 FQMM 的可扩展性.FQMM 还采用自适应的业务量调节机制来适应无线链路带宽的变化.

FQMM 是第 1 个针对无线 ad hoc 网络的 QoS 模型,它的主要优点是根据网络状态的变化,作自适应的业务量调节(conditioning),但它同时还存在如下缺点:

1) 实现复杂.由于网络中的节点既要支持 IntServ,又要支持 DiffServ,同时,每个节点既可能是边缘节点又可能是核心节点,因此,要求每个节点均实现 IntServ 和 DiffServ 的相关功能.

2) 对于混合的资源分配策略,存在高优先级的流和低优先级的流各应占多大比例的问题.对低优先级的流,由于采用 DiffServ 的基于类的资源分配策略,因此,在 ad hoc 域内,仍存在与 DiffServ 相似的资源分配问题.

根据以上分析得知,已有的 QoS 体系结构并不完全适合无线 ad hoc 网络,结合无线 ad hoc 网络自身的特点

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

及其应用场合,我们认为,无线 ad hoc 网络的 QoS 体系结构应该具有下述特点:

1) 具有业务区分能力,提供定性的 QoS 支持.

2) 开销小,对节点的存储能力和处理能力的要求较低,尽量避免基于流的存储和处理要求.

3) 分布实施,在无固定设施的无线 ad hoc 网络中,任何集中式的算法、机制都会增加其实现的难度和引入较大的开销.

4) 具有自适应能力,即能根据无线信道和网络拓扑的变化,实现自适应的资源分配、业务量调节等功能.

2 无线 ad hoc 网络的 QoS 信令

在网络中,信令的主要功能是为业务流预留和释放资源,在 Internet 中,RSVP 是相当成熟并已被 IETF 标准化的 QoS 信令协议,而 INSIGNIA[5]是专为无线 ad hoc 网络设计的 QoS 信令协议.

2.1 RSVP

RSVP 是一种基于 IntServ 体系结构的 QoS 信令协议,它支持单播和多播.资源预留由目的节点发起,当源节点需要向目的节点发送信息时,源节点发送路径(path)消息.目的节点在收到路径消息后,根据路径消息携带的流参数(flow spec.)和本身的需要发送资源预留消息,该消息沿路径消息经过的相反方向由中间路由器向源节点转发,中间路由器在收到资源预留消息时,判断其可用资源能否满足预留要求,若满足,则预留资源并转发资源预留消息,否则,丢弃资源预留消息,向目的节点返回拒绝预留消息,预留失败.

由于资源预留由接收方发起,不同的接收方可以根据自身的需要发起具有不同需求的资源预留请求,因此,RSVP 能够有效支持面向不同类型、不同需求的接收者的组播.RSVP 要求虚连接上的所有节点保存基于流的状态信息,并由目的节点定时发送预留更新消息对其更新.RSVP 采用软状态(soft-state)机制释放预留的资源.

RSVP 并不适合无线 ad hoc 网络,原因在于:

1) 节点需要处理并保存基于流的状态信息,这对移动节点的处理能力和存储能力均有很高的要求,在移动 ad hoc 网络中存在明显的可扩展性问题.

2) RSVP 没有提供能够快速响应网络拓扑频繁变化的机制.

3) RSVP 采用带外信令机制,其信令消息将与数据一起竞争无线信道,占用宝贵的无线带宽,并增加了碰撞概率.

2.2 INSIGNIA

INSIGNIA 使用带内信令,它支持 Best-Effort 和自适应的实时业务.INSIGNIA 利用 IP 包中的 IP 选项携带请求的带宽等信令信息.

INSIGNIA 提供 QoS 信令所需的流建立(flow setup)、流恢复(flow restoration)、软状态管理(soft-state management)、自适应调节(adaptation)和 QoS 报告(QoS reporting)5 种操作,它们共同完成 QoS 信令功能.

流建立:源节点发送资源预留请求包(IP 选项的预留模式比特为 REQ),中间节点在收到资源预留请求包后进行接入控制,并在可用资源满足要求的情况下进行资源分配并建立“流状态(flow state)”信息.

QoS 报告:用于目的节点向源节点报告业务流路径上的可用资源.在流建立过程中,QoS 报告用于告诉源节点其请求的资源被预留的情况;在流建立后,QoS 报告通知源节点业务流路径上的可用资源的变化情况,以便源节点对数据发送速率作自适应的调节.

软状态管理:流路径上的中间节点保存经过它的业务流的状态,并在收到业务流数据包时对相应的业务流状态进行刷新,如果在规定的时间内未收到某业务流的数据包,则删除该业务流对应的状态信息,并释放为其预留的资源.

流恢复:当因节点移动而需要重新建立(或修复)业务流路径时,在新的业务流路径建立(或恢复)后,新建路径上的节点根据收到的 IP 包的 IP 选项预留资源,原路径上的节点在超时后删除相关的状态并释放资源.

自适应:源节点根据 QoS 报告提供的相关业务流路径上的可用资源情况,自适应地调节业务流的数据发送速率.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

由于 INSIGNIA 使用带内信令,将信令信息与数据一起封装在 IP 包中,因而它能避免信令消息与数据包竞争无线信道,从而减小碰撞概率和信令协议的开销.但是,由于INSIGNIA采用基于流的资源预留策略,因此,对无线节点的存储和处理能力仍有很高的要求,存在明显的可扩展性问题.另外,INSIGNIA 只支持 Best-Effort 和具有自适应能力的实时业务,这限制了它的应用范围.再有,尽管 INSIGNIA 能在一定程度上保证实时业务的带宽,但却不能保证实时业务的时延,因此,就是对实时业务,INSIGNIA 的支持能力也是有限的.

从以上分析可以看出,无论是 RSVP 还是 INSIGNIA,它们在无线 ad hoc 网络中均存在明显的局限性,主要体现在可扩展性差、开销大.因此,开销小、能适应网络拓扑的频繁变化并具有良好可扩展性是在设计无线 ad hoc 网络的 QoS 信令时需要重点考虑的问题.

3 QoS 路由

尽管目前人们对无线 ad hoc 网络中,尤其是在网络拓扑频繁变化时实施 QoS 路由的可行性还存在疑问,但仍有许多研究人员致力于这方面的工作,并取得了一定的研究成果.对已有的无线 ad hoc 网络的 QoS 路由协议,我们将其大致分为 3 类:基于 TDMA 的、基于 TDMA/CDMA 的和通用的 QoS 路由协议.

3.1 基于TDMA的QoS路由协议

对于这类 QoS 路由协议,要求无线节点采用 TDMA 的多址技术,且网络中的各移动节点能估计无线链路的可用带宽(通常以空闲时隙表示)并预留可用的带宽资源.文献[6]给出的 QoS 路由协议就是一个典型的例子.

文献[6]将基于 TDMA 的无线 ad hoc 网络的带宽计算问题(BWC)描述为:

在基于 TDMA 的无线 ad hoc 网络 $G=(N,L)$ 中,假设当前无冲突调度为 TS,给定路径 $P=\{n_m\to n_{m-1}\to\ldots\to n_0\},(n_i,n_{i-1})\in L,i=m,\ldots,1$,求集合 $TS_i^p,n_i\in P\cap\overline{n}_0,TS_i\cap TS_i^p=\varnothing$,使新的集合 $\{TS_i'=TS_i\cup TS_i^P\}$ 仍满足无冲突属性,且最大化路径 P 的带宽: $BW(P)=\min_i\left|TS_i^P\right|,n_i\in P\cap\overline{n}_0$,其中,$TS_i^p$ 为沿路径 P 的节点 n_i 到 n_{i-1} 的发送时隙集合.文献[6]证明,BWC 问题是 NP-完全的.为此,文献[6]给出了求解 BWC 问题的启发式算法.

设 PB_i^k 为所求的沿路径 $FP^k=\{n_m\to n_{m-1}\to\ldots\to n_k\}$ 上 $n_i\to n_{i-1}$ 的时隙集合,FP^k 为 P 的一部分,$FP^0=P$,则有如下求路径 P 的带宽和路径 P 上各节点发送时隙的迭代算法:

若 n=1, $PB_1^0=LB_1$;若 n=2, $(PB_2^0,PB_1^0)=BW_2(LB_2,LB_1)$;若 $n\ge 3$, $(PB_m^{m-2},PB_{m-1}^{m-2})=BW_2(LB_m,LB_{m-1})$,$k$ 从 $n-3$ 到 0,计算 $(PB_{k+3}^k,PB_{k+2}^k,PB_{k+1}^k)=BW_3(PB_{k+3}^{k+1},PB_{k+2}^{k+1},LB_{k+1})$. FP^k 的可用带宽为 $BW(FP^k)=\left|PB_{k+1}^k\right|$,路径 P 的端到端带宽为 $BW(P)=BW(FP^0)=\left|PB_1^0\right|$,路径 P 上的节点 k 的发送时隙结合为

$$TS_k^P=\begin{cases}BW_1(PB_k^0,BW(P)), & k=1,2,3\\ BW_1(PB_k^{k-3},BW(P)), & 4\le k\le m\end{cases}.$$

其中,$LB_i=SRT_i\cap SRR_{i-1}$,SRT_i,SRR_i 分别表示在不产生干扰和不受干扰的前提下,节点 n_i 可用的发送时隙集合和接收时隙集合.函数 $BW_1(IN,n)$ 的功能是从输入时隙集合 IN 中随机选取 n 个时隙;函数 $BW_2(IN_1,IN_2)$ 的功能是输出两个互不相交的具有相同最大势的时隙集合,使每个输出是相应输入的子集.函数 $BW_3(IN_1,IN_2,N_3)$ 的功能是输出 3 个互不相交的具有相同最大势的时隙集合,使每个输出是相应输入的子集.

基于上述算法,文献[6]进一步给出了一种按需的 QoS 路由协议,它类似于 AODV[7],所不同的是节点在收到 RREQ 后,需运用上述算法计算源节点到本节点的路径上的可用带宽,并与业务流请求的带宽比较,如果可用带宽小于请求带宽,则丢弃 RREQ,否则,继续转发 RREQ,直到目的节点.路径资源预留由目的节点沿 P 的相反方向发送 RREP 来完成.

根据对文献[6]给出的基于 TDMA 的 QoS 路由机制的概括分析,我们认为对基于 TDMA 的无线 ad hoc 网络,其 QoS 路由协议需要解决如下几个关键问题:

1) 在考虑隐终端和显终端问题的前提下,为路径 P 上除目的节点外的所有节点给出一种无冲突的发送时隙调度算法,使路径 P 的带宽最大.由于这一问题是 NP-完全的,因此,好的思路是给出次优的启发式算法.

2) 基于上述发送时隙调度算法,给出相应的 QoS 路由协议,该协议的开销应尽可能小,同时能快速响应网

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

络拓扑的变化,进行 QoS 路径的重建和恢复.

3) 无论是时隙调度算法还是路由协议都应该是分布式的.

3.2 基于TDMA/CDMA的QoS路由协议

在基于 TDMA/CDMA 的无线 ad hoc 网络中,无线链路采用 TDMA 和 CDMA 相结合的多址技术.它首先将一段时间分为控制段和数据段.控制段用于各节点发送如帧同步、功率测量等控制信息,它采用 TDMA 方式;数据段用于各节点发送数据,它在 TDMA 之上叠加 CDMA,网络中不同节点使用不同的正交码,相邻节点可以在相同的时隙发送数据,因此,不存在隐终端问题.

文献[8]针对基于 TDMA/CDMA 的无线 ad hoc 网络提出了一种路径带宽估计和路径上各节点发送时隙的调度算法,基于这一算法,文献[9]给出了一种按需路由协议.

文献[8]给出的计算路径 $P=\{n_0\to n_1\to\ldots\to n_m\}, n_i, n_{i+1}$相邻,$i=0,\ldots,m-1$,可用带宽的算法如下:

设 $FS(i)$表示节点 i 的空闲时隙集合,节点 i,i+1 之间的链路带宽为 $BW_l(i+1,i)=FS(i)\cap FS(i+1)$, $BW_P(i,0)$ 表示节点 n_0 到节点 n_i 的路径带宽,则计算路径 P 的可用带宽的递归算法如下:

$$BW_P(1,0)=BW_l(1,0),$$
$$BW_P(m,0)=f(BW_P(m-1,0),BW_l(m,m-1)).$$

路径 P 的可用带宽为 $|BW_P(m,0)|$.函数 $f(IN_1,IN_2)$的两个输入均为时隙集合,输出 OUT 为 N_2 的子集,OUT 的计算过程如下:

$C=IN_1\cap IN_2, D_1=IN_1-C, D_2=IN_2-C$.若$|D_1|\le|D_2|\le|D_1|+|C|$,则$OUT=D_2+r\left(C,\left[\left(|C|-\left(|D_2|-|D_1|\right)\right)/2\right]\right)$;否则,若$|D_2|>|D_1|+|C|$,则$OUT=r\left(D_2,|C|+|D_1|\right)$;否则,$|D_1|>|D_2|+|C|$,则$OUT=IN_2$. $r(C,n)$ 表示从集合 C 中随机选取 n 个元素.

进一步地,路径 P 上节点的时隙预留算法如下:

对目的节点 n_m,预留时隙 $BW_P(m,0)$ 用作接收时隙;对源节点 n_0,预留时隙 $r(BW_P(1,0),|BW_P(m,0)|)$ 用作发送时隙;对中间节点 n_i,预留时隙 $r(BW_P(i+1,0),|BW_P(m,0)|)$ 用作发送时隙,预留时隙 $r(BW_P(i,0),|BW_P(m,0)|)$ 用作接收时隙.

文献[9]给出的按需 QoS 路由协议类似于一般的按需路由协议(如 DSR[10]),不同的是,节点 n_i 在收到 RREQ 后,需根据上述算法计算 $BW_P(i,0)$,并将计算结果与 RREQ 请求的带宽比较,如果不能满足要求,则丢弃 RREQ,否则,继续转发 RREQ,直到目的节点.路径资源预留由目的节点沿 P 的相反方向发送 RREP 来完成.

基于 TDMA/CDMA 的 QoS 路由协议需要解决的关键问题与基于 TDMA 的 QoS 路由协议需要解决的关键问题类似,不同的是,由于在网络中不存在明显的隐终端问题,因此,其路径比用带宽的估计和时隙预留算法相对简单,但其代价是需要在 TDMA 之上叠加复杂的 CDMA 机制.

3.3 通用的QoS路由协议

通用的 QoS 路由协议并不针对具体的 MAC 机制,但它假设 MAC 协议具有本地可用带宽估计、时延估计和资源预留功能.文献[11~14]给出的 QoS 路由协议就属于这种类型.

文献[11]给出了一种称为基于标签探测(ticket-based probing,简称 TBP)的分布式 QoS 路由协议,它假设网络中的每个节点均保存有输出链路状态和本节点到网络中其他节点的端到端的路径状态的最新信息,这些信息由适合于移动 ad hoc 网络的距离矢量协议(如 DSDV[15])进行周期性的更新.基于这一假设,TBP 建立 QoS 路由的过程如下.

源节点根据业务流的 QoS 要求发放一定数量的标签,这些标签由探索包携带,探索包由源节点向目的节点转发,当中间节点收到探索包后,根据输出链路的状态信息和相邻节点到目的节点的端到端的路径状态信息决定是否应该分离收到的探索包、每个探索包应携带的标签数量以及应该将探索包(包括分裂的)转发到哪些相邻节点.如果有探索包最终到达目的节点,则找到一条源节点到目的节点的满足 QoS 的路径,由目的节点沿该路径的相反方向发送资源预留包,实现资源预留.如果源节点在规定的时间内未收到来自目的节点的资源预留包,则表明建立 QoS 路由的尝试失败,由源节点根据需要进行重试或放弃.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

TBP 的主要优点是不需要完全准确的链路状态信息,同时通过有限数量的标签和在转发路由请求包时的智能的逐跳选择(而非广播方式)来减少开销.但其代价是减小了找到满足 QoS 要求的路径的概率(与广播方式相比),同时,它需要对状态信息进行周期更新,这会带来较大的带宽开销.

基本思想类似于 TBP,文献[12]给出了一种位置辅助的基于标签的 QoS 路由协议(location-aided, ticket-based QoS routing,简称 LTBR).不同于 TBP,在 LTBR 中,源节点或中间节点在选择下一节点时考虑了下一节点的位置信息.设节点 x 为节点 v 到目的节点 d 的下一节点,定义 $p_d(v,x,d)=\frac{p(v,x,d)}{d(v,x)}$ 为 x 的进度/代价比,其中,$p(v,x,d)$为线段 vx 在直线 vd 上的投影,$d(v,x)$为链路(v,x)的 QoS 参数,则对 v 的所有相邻节点,v 选择 $p_d(v,x,d)$取值最大的节点 x 作为到 d 的下一节点.

为了进一步增大找到到达目的节点 d 的满足 QoS 要求的路径的概率,LTBR 建议源节点或中间节点选择两个相邻节点作为到 d 的下一节点.设 $\angle xvd$ 为 vx 和 vd 之间的夹角,节点 v 选择 $\angle x_1vd\le\alpha$ 的节点 x_1 作为首选的下一节点.同时,节点 v 选择 x_2 作为转发路由请求的另一个节点,条件是 $\angle x_1vx_2\ge\beta$,其中,$\angle x_1vx_2$ 为 vx_1 和 vx_2 之间的夹角.

与 TBP 相比,LTBR 的主要优点是在选路时结合了节点的位置信息,从而减小了 QoS 路由的长度,同时在选路时不需要在每个节点保存到其他节点的路由信息.但其缺点是每个节点需要有到网络中其他节点的位置信息,文献[12]建议以泛洪方式获取这一信息,这会增大 LTBR 的开销.

文献[13]给出了一种称为核心提取的分布式 ad hoc 路由算法(core-rxtraction distributed ad hoc routing,简称 CEDAR),其基本思想是选取网络中若干节点构成核心,在这些节点间进行链路状态信息交换,并由这些核心节点按需实现 QoS 路由的计算.CEDAR 包含 3 个主要部分:网络核心的建立与维护,链路状态信息在核心的传播以及 QoS 路由的发现和维护.

查找网络核心是 NP-完全的,CEDAR 给出了一个启发式算法,其基本思想是非核心节点总是选择具有最大有效度的相邻核心节点作为其支撑节点.

CEDAR 将链路状态信息分为两种,即链路带宽增加的信息(increase wave)和链路带宽减少的信息(decrease wave),前者以较慢的速度在核心传播,后者以较快的速度在核心传播,从而使核心节点得到本地链路的最新信息以及相对稳定且具有较大带宽的远地链路信息.

源节点和目的节点间 QoS 路由的建立方式是先建立源节点的支撑节点到目的节点的支撑节点的路由,即核心路由,再沿这条核心路由建立源节点到目的节点的 QoS 路由.

CEDAR 的主要优点是将链路状态信息更新和 QoS 路由计算局限在网络核心,从而减小 QoS 路由协议的开销.其主要缺点是需要实现较复杂的网络核心的建立和维护算法.

根据对 TBP,LTBR 和 CEDAR 的分析,在设计通用的 QoS 路由协议时,有如下几个主要问题需要考虑:

1) 网络拓扑和链路状态信息的更新与维护.

2) 基于不完全和不准确的网络拓扑和链路状态信息发现 QoS 路由.在无线 ad hoc 网络中,由于无线信道的特点和节点的移动性,移动节点保存的网络拓扑和链路状态信息通常是不完全和不准确的.

3) 应避免泛洪式的 QoS 路由搜索算法.QoS 路由搜索算法能够根据网络拓扑和链路状态信息引导路由搜索包沿某方向在一定范围内搜索 QoS 路由,并尽量增大搜索成功的概率.

4 具有业务区分和资源预留能力的 MAC 协议

从本文的第 3、第 4 节可以看出,无论是 QoS 信令还是 QoS 路由,均要求存在一个支持业务区分和资源预留的介质访问控制协议.因此,具有业务区分和资源预留能力的 MAC 协议是使无线 ad hoc 网络提供 QoS 支持的关键.在分布式的无线 ad hoc 网络中,由于相邻节点间收发信号的相互干扰和显终端/隐终端问题,使得在 MAC 层的业务区分和资源预留功能很难实现.近年来已有一些研究[16~22]涉及到这一课题.本节将着重对文献[16~19]给出的 MAC 协议进行介绍,并给出具有业务区分和资源预留能力的 MAC 协议应具有的特点.

文献[16]给出了一种称为 5 阶段预留协议(five phase reservation protocol,简称 FPRP)的 MAC 协议,它是基

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

于 TDMA 的,具有资源预留能力.

FPRP 要求网络中所有节点同步,同时,在连续两次 FPRP 工作间隙,网络拓扑相对稳定.FPRP 的帧结构由 RF 帧和紧跟在 RF 帧后的若干信息帧(IF)组成.RF 和 IF 均有 n 个时隙,RF 帧的第 i 时隙(RS_i)负责 IF 帧的第 i 时隙(IS_i)的预留,需要预留 IS_i 的节点必须在 RS_i 竞争.一个 RS 包括 m 个预留周期(RC),每个 RC 又由 5 阶段协商组成.节点在 RC 期间与其他竞争节点协商,进行相应的 IS 的预留.

FPRP 的 5 阶段协商包括预留请求(RR)、冲突报告(CR)、预留证实(RC)、预留确认(RA)和填塞/清除阶段.需要预留空闲信息时隙 IS_i 的节点 n 以概率 p 在 RS_i 时隙发送 RR 包开始预留竞争.当一个节点同时收到多个 RR 时,该节点以 CR 包通知这些节点.如果 RN 在规定的时间内收到 CR,则放弃这次预留竞争,否则,节点 n 发送 RC 包,进行预留确认,收到 RC 包的节点将对应的信息时隙标记为已预留,同时发送 RA 包,RA 包通知与 n 相距两跳的节点信息时隙 IS_i 已被预留,从而解决隐终端问题.收到 RA 包的节点还需发送填塞(packing)包,告知与自己相邻且与节点 n 距离为 3 跳的节点自己不会竞争信息时隙 IS_i,使这些节点在竞争预留信息时隙 IS_i 时以更大的概率 p 发送 RR 包.如果多个 TN 相邻,它们构成死锁(dead-lock),TN 在第 5 阶段发送的清除(elimination)包用于清除死锁.竞争预留的结果维持到下一个 RF 之前,当下一个 RF 到来时,节点重新进行预留竞争.

FPRP 的主要优点是可分布实施,因此具有良好的可扩展性,但其缺点也是相当明显的:

1) 它是基于 TDMA 的,需要全网的同步,同时要求在两次 FPRP 的工作间隙,网络拓扑相对稳定(否则在 IS 将发生冲突),因此,它不适合节点移动速度快、网络拓扑变化频繁的网络.

2) 在每个 RF,节点 n 对其后的 IF 空闲时隙进行预留,一旦节点 n 成功预留第 i 个时隙,则相应预留了该 RF 和下一个 RF 之间的所有 IF 的信息时隙 i,无论对节点 n 来说这些时隙太少还是太多,如果太多,则存在资源浪费问题,如果太少,则节点 n 必须在下一个 RF 期间重新竞争,而重新竞争不一定能成功,显然,这又达不到资源预留的目的.

3) 没有业务区分能力,无论是基于流的还是基于节点的.

文献[17]给出了一种称为黑突发(black burst,简称 BB)的分布式 MAC 机制,它是基于 CSMA 的,具有相对的业务区分能力.其基本原理如下:

当节点 n 需要接入无线信道时,首先进行载波侦听,如果信道忙,则等待,直到信道空闲一定时间 t_{idle}.对实时业务节点,$t_{idle}=t_{DIFS}$, t_{DIFS} 为 IEEE802.11[23]的“DCF 帧间间隔”时间,对非实时业务节点,$t_{idle} \ge 2\tau + t_{DIFS}$,$\tau$为网络中相互能侦听到的节点之间的最大路径时延,从而使实时业务节点享有接入信道的优先权.

对于实时业务节点,连续两个实时业务包之间的调度时间间隔为 t_{sch},对所有节点,t_{sch} 相同.对有实时业务包等待发送的节点,当信道空闲时间达到 t_{DIFS} 时,节点开始发送 BB,连续发送的 BB 数 b 是其竞争时延 d_{cont} 的函数:

$$b(d_{cont}) = \left(1 + \left\lceil \frac{d_{cont}}{t_{unit}} \right\rceil\right).$$

在节点发送完所有 BB 后,再次侦听信道,如果信道空闲达 $t_{obs}\left(t_{obs} \le t_{bslot}, t_{obs} < t_{DIFS}\right)$ 时间,则发送实时业务包,否则,取消发送,按上述原理重新作发送尝试.

BB 机制的主要优点是具有业务区分能力,保证实时业务节点优先接入信道,同时,当网络中不存在隐终端时,可实现实时业务包的无碰撞发送.BB 机制的缺点是没有资源预留功能;只适用于无隐终端的无线 ad hoc 网络;且要求网络中的所有实时业务节点以相同的时间间隔调度实时业务包.

文献[18]在修改 IEEE 802.11 DCF 的基础上,给出了一种具有业务区分能力的分布式的 MAC 协议——增强型分布式协调功能(enhanced distributed coordination function,简称 EDCF).EDCF 引入了业务类型(traffic categories,简称 TC)的概念.在同一节点,对不同的业务类实现不同的回退计数器 $T(TC)$,回退计数器的相关参数,包括任意帧间间隔时间 $AIFS(TC)$、最小竞争窗口 $CW_{\min}(TC)$、最大竞争窗口 $CW_{\max}(TC)$,以及回退因子 $PF(TC)$.当信道空闲 $AIFS(TC)$后,$T(TC)$的值在$[1,CW(TC)+1]$之间按均匀分布随机选取.$T(TC)$在信道空闲时以时隙为单位递减,直到为 0 时,发送 MAC 帧.如果发送 MAC 帧的尝试失败,则 $T(TC)$的值在$[1,CW_{new}(TC)+1]$之间按均匀分布随机选取.其中,$CW_{new}(TC) = CW_{old}(TC) \times PF(TC) + 1$,$CW(TC)$的最大值为 $CW_{\max}(TC)$.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

EDCF 给出了通过对不同业务设置不同的回退计数器参数来达到区分业务的思想,但如何设置这些参数的值,EDCF 不作具体规定.在文献[19]中,作者给出了一种 MAC 子层的 WRR 调度器,用于按比例原则为不同业务分配不同的带宽.

文献[19]给出的 MAC 子层 WRR 调度器的基本思想是对不同的业务流 i,其 AIFS 的取值相同,而 $CW_{\min}$ 的取值不同.$CW_{\min}(i)$的表达式为

$$CW_{\min}(i)=round\left\{\frac{\frac{2}{r(i)}-1}{1+p(i)\times\frac{1-(PF(i)\times p(i))^{m(i)}}{1-PF(i)\times p(i)}}\right\},$$

其中,$m(i)$,$PF(i)$,$p(i)$分别为业务流 i 的竞争窗口最大回退等级、回退因子以及分组的碰撞概率,r_i 为业务流 i 的带宽份额.

尽管文献[19]给出了根据节点的带宽份额理论计算 $CW_{\min}(i)$的表达式,但由于在计算 p_i 时需要解 $2n$ 维的非线形方程组,同时,竞争信道的节点数 n 是动态变化的,因此,文献[19]存在实施上的困难.

通过以上分析,我们可以看出 FPRP,BB,EDCF 以及 MAC 层的 WRR 机制均只在一定条件下具有有限的业务区分和资源预留能力.为有效支持 QoS,MAC 协议应该同时具备业务区分和资源预留的能力,并具有实现简单、分布式、具有较小的开销等特点.

5 结束语

无线 ad hoc 网络的应用环境要求它支持 QoS,无线 ad hoc 网络的特点决定了在这样的网络中支持 QoS 面临巨大的挑战.尽管目前已有较多的文献从不同的角度研究无线 ad hoc 网络的 QoS 问题,但从本文的分析可以看出,目前还没有真正切实可行的无线 ad hoc 网络支持 QoS 的方案,还需要在 QoS 体系结构、QoS 路由、QoS 信令和支持业务区分和资源预留的 MAC 协议等方面作进一步的研究.

新的 QoS 体系结构应提供对 QoS 的定性支持,实现简单,具有良好的可扩展性,且对无线信道和网络拓扑的变化具有自适应能力.

新的 QoS 路由应该属于按需路由协议,且分布实施,能快速响应无线链路和网络拓扑的变化,并尽量减小路由协议的开销.另外,还需要研究当网络拓扑变化频繁时,建立和维护 QoS 路由的可行性,并进一步考虑当存在多个 QoS 参数时 QoS 路由的联合优化问题.

由于绝大多数 QoS 信令都是基于流的,在无线 ad hoc 网络中,这些机制存在明显的可扩展性问题,因此,在 QoS 信令方面,信令协议的可扩展性和带宽开销是需要重点考虑的两个问题.

具有业务区分和资源预留能力的 MAC 协议是在无线 ad hoc 网络中支持 QoS 的关键,在分布式的无线 ad hoc 网络中,如何在相互干扰的节点之间协调配合,以达到业务区分和资源共享、预留的目的将是设计支持 QoS 的 MAC 协议时需要着重考虑的问题.

同时,有线网络中 QoS 研究的经验表明,可扩展性是在研究 QoS 机制时需要重点考虑的问题.无线 ad hoc 网络带宽受限、节点能力受限以及网络拓扑的动态变化都对无线 ad hoc 网络中 QoS 机制的可扩展性提出了更高的要求.

References:

[1] Braden R, Clark D, Shenker S. Integrated services architecture. Internet Engineering Task Group (IETF), Request for Comment (RFC): 1633, 1994.

[2] Blake S, Black D, Carlson M, Davies E, Wang Z, Weiss W. An architecture for differentiated services. Internet Engineering Task Group (IETF), Request for Comment (RFC): 2475, 1998.

[3] Zhang LX, Deering S, Estrin D, Shenker S, Zappala D. RSVP: A new resource reservation protocol. IEEE Network Magazine, 1993, 7(5):8~18.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[4] Xiao HN, Seah WKG, Lo A, Chua KC. A flexible quality of service model for mobile ad-hoc networks. In: Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conference. Vol 1, 2000. 445~449.

[5] Lee S-B. INSIGNIA: An IP-based quality of service framework for mobile ad hoc networks. Journal of Parallel and Dist. Comp., Special issue on Wireless and Mobile Computing and Communications, 2000,60(4):374~406.

[6] Zhu C, Corson MS. QoS routing for mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 21st Intil Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. Vol.2, 2002. 958~967.

[7] Perkins C, Belding-Royer E, Das S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. Request for Comment (RFC): 3561, 2003.

[8] Lin CR, Liu JS. QoS routing in ad hoc wireless networks. IEEE Journal Selected Areas in Communications, 1999,17(8): 1426~1438.

[9] Lin CR. On-Demand QoS routing in multihop mobile netowrks. In: Proc. of the 20th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. Vol.3, 2001. 1735~1744.

[10] Johnson DB, Maltz DA, Hu Y-C. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR) (work in progress), IETF MANET Working Group, draft-ietf-manet-dsr-09.txt, 2003.

[11] Chen S, Nahrstedt K. Distributed quality of service routing in ad-hoc networks. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 1999,17(8):1488~1505.

[12] Huang C, Dai F, Wu J. On-Demand location-aided QoS routing in ad hoc networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Parallel Processing (ICPP). 2004. 502~509.

[13] Sivakumar R, Sinha P, Bharghavan V. CEDAR: A core-extraction distributed ad hoc routing algorithm. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, Special Issue on Ad Hoc Networks, 1999,17(8):1454~1465.

[14] Shah SH, Nahrstedt K. Predictive location-based QoS routing in mobile ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications. Vol.2, 2002. 1022~1027.

[15] Perkins CE, Bhagwat P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for Mobile Computers. In: Proc.of the ACM SIGCOMM'94. 1994. 234~244.

[16] Zhu C, Corson MS. A five-phase reservation protocol (FPRP) for mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 17th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. Vol.1, 1998. 322~331.

[17] Sobrinho JL, Krishnakumar AS. Quality-of-Service in ad hoc carrier sense multiple access networks. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 1999,17(8):1353~1368.

[18] Mangold S, Choi S, May P, Klein O, Hiertz G, Stibor L. IEEE 802.11e wireless LAN for quality of service (invited paper). In: Proc. of the European Wireless. Vol.1, 2002. 32~39.

[19] Jie H, Devetsikiotis M. Designing improved MAC packet schedulers for 802.11e WLAN. In: Proc. of the Global Telecommunications Conf. Vol.1, 2003. 184~189.

[20] Ahn G-S, Campbell AT, Veres A, Sun LH. Supporting service differentiation for real-time and best-effort traffic in stateless wireless ad hoc networks (SWAN). IEEE Trans. on Mobile Computing, 2002,1(3):192~207.

[21] Veres A, Campbell AT, Barry M, Sun LH. Supporting service differentiation in wireless packet networks using distributed control. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 2001,19(10):2081~2093.

[22] Julian D, Chiang M. QoS and fairness constrained convex optimization of resource allocation for wireless cellular and ad hoc networks. In: Proc. of the 21st Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. Vol.2, 2002. 477~486.

[23] IEEE standard for wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, 1999.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn