

# 无线 Ad Hoc 网络 QoS 路由协议研究的进展与展望<sup>\*</sup>

李 云<sup>1,2</sup> 隆克平<sup>1</sup> 吴诗其<sup>2</sup> 赵为粮<sup>1</sup>

(重庆邮电学院光互联网及无线信息网络研究中心 重庆400065)<sup>1</sup>

(电子科技大学信息系统研究所 成都610054)<sup>2</sup>

**摘 要** 无线 ad hoc 网络是一种无固定通信设备支持、节点可自由移动的多跳全分布式无线网络。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,而 QoS 路由协议是无线 ad hoc 网络支持 QoS 的一个关键理论和技术,也是目前的一个研究热点。本文回顾了近年来国内外在无线 ad hoc 网络 QoS 路由协议研究方面取得的研究成果,对已有的无线 ad hoc 网络的 QoS 路由协议进行了分类,并对它们作了较全面的概括总结和深入的比较分析,系统阐述了在无线 ad hoc 网络中实现 QoS 路由协议时需要考虑的因素,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 路由协议

## Development and Prospect on QoS Routing Protocols in Wireless Ad Hoc Networks

LI Yun<sup>1,2</sup> LONG Ke-Ping<sup>1</sup> WU Shi-Qi<sup>2</sup> ZHAO Wei-Liang<sup>1</sup>

(Special Research Centre for Optical Internet & Wireless Information Networks,

Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065)<sup>1</sup>

(Institute of Information University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)<sup>2</sup>

**Abstract** Wireless ad hoc networks are multi-hop and distributed. In a wireless ad hoc network, there is no stationary infrastructure, and the node acting as terminal and router can move freely. The application environments and connecting with the Internet require that wireless ad hoc networks should support Quality-of-Service (QoS). QoS routing is the key to support QoS in wireless ad hoc networks. This paper comprehensively summarizes and deeply analyzes the researches of recent years on QoS routing. Based on this analysis, we deeply discuss the problems that must be resolved to implement QoS routing in wireless ad hoc networks, and give some advice to the research in the future.

**Keywords** Wireless ad hoc networks, Quality-of-service, QoS routing protocol

## 1 引言

无线 ad hoc 网络是一种由若干无线通信设备自由组合形成的一种无线网络,它不需要固定通信设备(如基站)的支持,网络中的节点可自由移动,不在彼此无线电波覆盖范围内的节点之间的通信可经中间节点的转发来完成,网络中的节点既是终端,又是路由器。无线 ad hoc 网络具有组网灵活、分布实施、抗毁能力强、可临时快速组建等特点,可作为野战通信、紧急搜救、临时会议等的通信网络,也可作为已有无线、有线网络的多跳(multi-hop)扩展,拓宽它们的覆盖范围。因此,无线 ad hoc 网络具有广泛的应用前景,已成为国内外的一个研究热点。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, QoS 路由机制是无线 ad hoc 网络支持 QoS 的一个关键。然而,无线信道自身的特点(如带宽有限、信道误码率高等)、网络中节点的移动性及无线 ad hoc 网络固有的隐终端(hidden terminal)和显终端(exposed terminal)问题使得在无线 ad hoc 网络中提供 QoS 支持具有很大的挑战性。近年来,国外已有一些研究

涉及到这一课题,并取得了一定的进展,本文将对近年来在该方向取得的研究成果作全面的概括总结和深入的比较分析,指出亟待解决的问题和今后的研究方向。

## 2 无线 ad hoc 网络中的 QoS 路由协议

对已有的无线 ad hoc 网络的 QoS 路由协议,根据其是否基于具体的介质访问控制协议(MAC: Media Access Control),以及基于的 MAC 协议的不同,本文将其大致分为三类:基于 TDMA 的、基于 TDMA/CDMA 的和通用的 QoS 路由协议。

### 2.1 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。对于基于 TDMA 的 QoS 路由协议来说,其关键点和难点在于:在考虑无线节点不能同时收发和在无线网络中存在隐终端等因素前提下,沿源节点到目的节点的路径做最大可用带宽估计并对各节点的可用时隙进行调度。文[1]给出的 QoS 路由协议就

<sup>\*</sup> 本文由国家863高科技发展计划项目(编号:2001AA120303)、重庆市教委科学技术研究基金项目、重庆邮电学院青年教师基金项目(编号:A2002-20)和重庆市通信与信息系统重点学科建设基金项目(编号:YDJS-2002-02)联合资助。李 云 博士研究生,主要研究方向为 MAC 协议性能分析和改进,无线 ad hoc 网络 QoS。隆克平 教授,博士后,主要研究领域为 IP QoS、光突发交换、无线 TCP/IP 改进。吴诗其 教授,博士生导师,主要研究领域为无线通信。赵为粮 副教授,博士,主要研究领域为个人通信技术。

是一个典型的例子。

文[1]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  $G=(N,L)$  ( $N$  为网络中节点的结合,  $L$  为无线链路的结合, 且是无方向的) 中, 假设当前无冲突调度为  $TS$ , 给定路径  $P=\{n_m \rightarrow n_{m-1} \rightarrow \dots \rightarrow n_0\}$ ,  $\{n_i, n_{i-1}\} \in L, i=m, \dots, 1$  求集合  $TS_i^P, n_i \in P \cap \bar{n}_0, TS_i \cap TS_i^P = \emptyset$ , 使新的集合  $\{TS_i^P = TS_i \cup TS_i^P\}$  仍满足无冲突属性, 且最大化路径  $P$  的带宽:

$$BW(P) = \min |TS_i^P|, n_i \in P \cap \bar{n}_0$$

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[1]证明, BWC 问题是 NP-完全的。为此, 文[1]给出了求解 BWC 问题的启发式算法:

设  $PB_i^P$  为所求的沿路径  $FP^i = \{n_m \rightarrow n_{m-1} \rightarrow \dots \rightarrow n_i\}$  上  $n_i \rightarrow n_{i-1}$  的时隙集合,  $FP^i$  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  $n=1$ , 则  $PB_1^P = L_B$

若  $n=2$ , 则  $(PB_2^P, PB_1^P) = BW_2(LB_2, LB_1)$

若  $n \geq 3$ , 则  $(PB_m^P, PB_{m-1}^P) = BW_2(LB_m, LB_{m-1})$ ,  $k$  从  $n-3$  到 0, 计算

$$(PB_{i+3}^P, PB_{i+2}^P, PB_{i+1}^P) = BW_3(PB_{i+3}^P, PB_{i+2}^P, PB_{i+1}^P, LB_{i+3})$$

$FP^i$  的可用带宽为:  $BW(FP^i) = |PB_{i+1}^P|$ , 路径  $P$  的端带宽为  $BW(P) = BW(FP^0) = |PB_1^P|$ , 路径  $P$  上的节点  $k$  的发送时隙集合为:

$$TS_k^P = \begin{cases} BW_1(PB_1^P, BW(P)), k=1, 2, 3 \\ BW_1(PB_k^P, BW(P)), 4 \leq k \leq m \end{cases}$$

在上述算法中,  $LB_i = SRT_i \cap SRR_{i-1}, SRT_i, SRR_i$  分别表示在不对当前正在接收的节点产生干扰和不受当前正在发送的节点干扰的前提下, 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  $BW_2(IN_1, IN_2)$  的功能是输出两个具有相同最大势的时隙集合, 使每个输出是相应输入  $IN_1, IN_2$  的子集, 且交集为空。函数  $BW_3(IN_1, IN_2, N_3)$  的功能是输出三个具有相同最大势的时隙集合, 使每个输出是相应输入  $IN_1, IN_2, IN_3$  的子集, 且交集为空。

上述迭代算法实质为一贪心算法, 其计算复杂度正比于路径  $P$  的长度。

基于上述近似计算路径  $P$  的最大带宽和路径  $P$  上节点的发送时隙的算法, 文[1]进一步给出了一种按需 (on-demand) 的 QoS 路由协议, 它类似于 AODV<sup>[2]</sup>, 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, 并同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[1]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:

· 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。由于这一问题为 NP-完全的, 因此好的思路是给出次优的启发式算法。

· 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, 同时能快速响应网络拓扑的变

化, 进行 QoS 路径的重建和恢复。

· 无论是时隙调度算法还是路由协议都应该是分布式的。

## 2.2 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两段, 即控制段和数据段。控制段用于各节点发送如帧同步、功率测量等控制信息, 它只采用 TDMA 方式, 各节点使用固定的时隙; 数据段用于各节点发送数据, 它在 TDMA 之上迭加 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, 在这样的网络中, 不存在隐终端问题。

文[3]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的发送时隙调度算法, 基于这一算法, 文[4]进一步给出了一种按需的路由协议。

文[3]给出的计算路径  $P = \{n_0 \rightarrow n_1 \rightarrow \dots \rightarrow n_m\}$ ,  $n_i, n_{i+1}$  相邻,  $i=0, \dots, m-1$  的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  $BW_i(i+1, \tau) = FS(i) \cap FS(i+1)$ ,  $BW_p(i, 0)$  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:

$$BW_p(1, 0) = BW_i(1, 0);$$

$$BW_p(m, 0) = f(BW_p(m-1, 0), BW_i(m, m-1))$$

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  $|D_1| \leq |D_2| \leq |D_1| + |C|$ , 则  $OUT = D_2 + r(C, [(|C| - (|D_2| - |D_1|))/2])$ ;

否则, 若  $|D_2| > |D_1| + |C|$ , 则  $OUT = r(D_2, |C| + |D_1|)$ ;

否则, 若  $|D_1| > |D_2| + |C|$ , 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, 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。

基于上述路径带宽估计和节点预留时隙的算法, 文[4]给出的按需 QoS 路由协议类似于一般的按需路由协议 (如 DSR<sup>[5]</sup>), 不同的是节点  $n_i$  在收到 RREQ 后, 需根据上述算法计算  $BW_p(i, 0)$ , 并将计算结果同 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同基于 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, 其路径有用带宽的估计和时隙预留算法相对简单, 但其代价是需要 TDMA 之上迭加复杂的 CDMA 机制。

## 2.3 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[6~8]给出的 QoS 路由协议就属于这种类型。

文[6]给出了一种称为基于标签探测(TBP: Ticket-Based Probing)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<sup>[9]</sup>)进行周期性的更新。基于这一假设, TBP 建立源节点到目的节点的 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。

对于 TBP 来说,有两个关键性的问题需要解决:一是源节点发送探索包时,根据业务流的 QoS 要求决定探索包应携带的标签的数量;二是中间节点在收到探索包后决定是否应该分离收到的探索包、每个探索包应分别携带多少数量的标签,以及应该将探索包(包括分裂的)转发到哪些相邻节点。对于前者,解决的基本思路是业务流的 QoS 要求越高(时延要求越小、带宽要求越大),分配的标签数越多,以增加找到满足 QoS 要求的路径的概率。对于后者,中间节点根据到相邻节点的链路状态信息和相邻节点到目的节点的路径状态信息,估计是否能够通过相应的相邻节点找到到目的节点的路由,若能,则将其作为转发探索包的候选节点,且越能满足 QoS 要求的相邻节点(时延越小、带宽越大)将分给越多的标签。

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(同广播方式相比),同时,它需要对状态信息进行周期更新,这带来了较大的带宽开销。

文[7]给出了一种称为核心提取的分布式 ad hoc 路由算法(CEDAR: Core-Extraction Distributed Ad hoc Routing),该算法的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。网络核心由网络的最小支配集(MDS: Minimum Dominating Set)和 MDS 中两点间距离不大于3跳的虚链路构成。CEDAR 包含三个主要部分: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 路由的发现和维持。

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(核心节点的最大有效度是指选择该节点作为支撑的节点数)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,同时,链路状态信息的传播以单播方式的多播来实现。

源节点和目的节点间 QoS 路由的建立方式是先根据核

心节点保存的链路状态信息,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 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:

- 网络拓扑和链路状态信息的更新与维护。

- 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。

- 应避免泛洪式的 QoS 路由搜索算法。QoS 路由搜索算法能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。

**结束语** 无线 ad hoc 网络的应用环境要求它支持 QoS,作为无线 ad hoc 网络支持 QoS 的关键技术, QoS 路由协议正受到国内外研究者的重视,并成为一个新的研究热点。然而,无线 ad hoc 网络的特点决定了在这样的网络中实现 QoS 路由协议面临巨大的挑战。尽管目前已有一些文献从不同的角度研究无线 ad hoc 网络的 QoS 路由问题,但从本文的分析可以看出,还需要在无线 ad hoc 网络的 QoS 路由协议方面做进一步的研究,尤其是针对规模较大、节点移动速度快和拓扑变化频繁的无线 ad hoc 网络。

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,还需要研究当存在多个 QoS 参数时 QoS 路由的联合优化问题。

## 参 考 文 献

- 1 Zhu C, Corson M S. QoS Routing for Mobile Ad Hoc Networks. In: Proc. of the Twenty First Intl. Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002), New York, USA, June 2002
- 2 Perkins C E, Belding-Royer E M, Das S R. Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing (work in progress). INTERNET DRAFT, draft-ietf-manet-aodv-13. txt, Feb. 2003
- 3 Lin C R, Liu J S. QoS Routing in Ad Hoc Wireless Networks. IEEE J. Selected Areas in Communications, 1999, 17(8): 1426~1438
- 4 Lin C R. On-demand QoS Routing in Multihop Mobile Networks. Infocom 2001, 2001, 3: 1735~1744
- 5 Johnson D B, Maltz D A, 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, April 2003
- 6 Chen S, Nahrstedt K. Distributed Quality of Service Routing in Ad-Hoc Networks. IEEE J. Selected Areas in Communications, 1999, 17(8): 1488~1505
- 7 Sivakumar R, Sinha P, Bharghavan V. CEDAR: A Core-extraction Distributed Ad Hoc Routing Algorithm. IEEE J. Selected Areas in Communications, Special Issue on Ad Hoc Networks, 1999, 17: 1454~1465
- 8 Shah S H, Nahrstedt K. Predictive Location-Based QoS Routing in Mobile Ad Hoc Networks. In: Proc. of IEEE Intl. Conf. on Communications (ICC 2002), New York, NY, April 2002
- 9 Perkins C E, Bhagwat P. Highly Dynamic Destination- Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers. In: Proc. of ACM SIGCOMM'94, London, UK, Sep. 1994. 234~244