

Ad Hoc 无线网络分组调度算法综述^{*}

马涛 张信明 王青山 张联华

(中国科技大学计算机科学技术系 合肥 230027) (国家高性能计算中心 合肥 230027)

(国家高性能计算中心宁波分中心 宁波 315040)

摘要 随着个人通信的日益增长,支持诸如移动会议、移动网络以及个域网络的 ad hoc 无线网络逐渐从军用扩大到民用等诸多领域。这种网络是借助一个共享的有限带宽的信道分布式地来实现各种性能的服务。分组调度机制是 ad hoc 无线网络构造所依赖的最主要性能保证机制之一,而其核心问题是分组调度算法问题。本文以 ad hoc 无线网络的相关研究为背景,综述了该领域内已有的分组调度算法并进行了分类阐述。本文的主要贡献在于首次从 QoS (Quality of Service) 和公平性的角度出发,对该领域的研究成果进行了总结;同时分析了该领域尚未解决的问题,为下一步研究提出了新的课题和思路。

关键词 ad hoc 无线网络, 分组调度算法, 服务质量, 公平

A Survey of Packet Scheduling Algorithms in Ad Hoc Wireless Networks

MA Tao ZHANG Xin-Ming WANG Qing-Shan ZHANG Lian-Hua

(Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

(National High Performance Computing Center at Hefei, Hefei 230027)

(National High Performance Computing Center at Ningbo, Ningbo 315040)

Abstract With the increase of personal communications, ad hoc wireless networks that are able to provide a wide range of network applications are spreading from military areas to lots of civilian areas. This kind of network implements services of various performances by a shared limited wireless channel. Packet scheduling mechanism is one of the most important performance assurances of this kind of network, and the core problem of packet scheduling mechanism is its algorithm. This paper makes a survey of the research on packet scheduling algorithms by taking the related ad hoc wireless networks researches as background. First, this paper starts by doing some background setting. Then it describes the principles and compares the similarities and differences of some typical algorithms proposed in the literature. It also discusses the internal relationships between these algorithms and analyzes their performance characteristics. The main contribution of this paper is that it is the first paper that summarizes this research field from the view of Quality of Service (QoS) and fairness. Meanwhile, it analyzes some unsolved problems that are believed to be of great interest.

Keywords Ad hoc wireless network, Packet scheduling algorithm, QoS, Fairness

1 引言

随着对个人通信需求的日益增长, ad hoc 无线网络(又称多跳分组广播网)的应用范围正逐步从军用扩大到民用等诸多领域。它支持诸如移动会议、移动网络、个域网络、自然或人为灾难营救过程中的信息交换以及临时交互式通信组等。分组调度机制是 ad hoc 无线网络构造所依赖的最主要性能保证机制之一,而其核心问题是分组调度算法问题。为了设计出有效的分组调度算法,研究人员进行了大量的研究。公平分配带宽和最大化利用资源被认为是两个最重要的设计目标。“公平”是指不能因为某些用户需要更多的资源就牺牲其它用户的合法利益。在 ad hoc 网中,由于没有集中管理设备,一些处于高竞争区的流在竞争信道时会处于非常不利的地位,从而导致吞吐量严重下降。一个好的调度算法应该尽量避免此种情形。资源利用率可以定义为用于数据传输的信道容量占总信道容量的比例。由于 ad hoc 无线网络的带宽相对于有线网络的带宽容量非常有限,并且由于多径衰减、多路访问、噪声和信号干扰等多种因素,使得移动节点的实际带宽非常珍

贵,于是吞吐量应该是最优先考虑的性能需求之一。但是吞吐量不应该是唯一考虑的因素,不然一种使共享信道吞吐率达到最大的“简单且有效”的方法就是不使用“共享”策略,将该信道分配给某对节点专用。但是这显然有悖于网络资源的共享性和有效传输的目标。

在对有线网络的研究中,出现了一系列调度算法,典型的有 WFQ (Weighted Fair Queueing)^[1]、WF²Q (Worst-case Fair Weighted Fair Queueing)^[2] 和 STFQ (Start-Time Fair Queueing)^[3]等。随着蜂窝通信的日益增多,无线蜂窝网中的调度算法随之成了一个研究热点。CSDPS (Channel State Dependent Packet Scheduling)^[4]、WFS (Wireless Fair Service)^[5]、IWFQ (Idealized Wireless Fair Queueing)^[6]、SBFA (Server Based Fairness Algorithm)^[7] 和 CIF-Q (Channel Independent Fair Queueing)^[8]等等正是为无线蜂窝网提出的典型的调度算法。这些无线蜂窝网调度算法的基本思想都是通过在信道状态“差”的流和信道状态“好”的流之间动态交换信道使用权来解决与位置有关的信道突发错误等问题。它们的不同之处在于它交换的方式不同。但是在 ad hoc

^{*} 本课题的研究得到宁波市重点博士科学基金(2003A61003)和国家重点基础发展规划 973(G1998030403)的资助。

无线网络中,自组性,动态连通性,多跳传播以及全分布式的特征使得上述的算法不能直接应用到 ad hoc 无线网络中。此外,有线网和分组蜂窝网中调度算法的研究一般是仅在网络层进行的,但是由于“信道复用”等问题,ad hoc 无线网中分组调度算法的研究不能局限在网络层,还需要考虑数据链路层的信道分配等问题。在 ad hoc 网中,数据链路层的协议对实现网络层的 QoS 保证非常重要。故在本文中我们的研究视角集中在 ad hoc 无线网的数据链路层。本文第 2 节给出了 ad hoc 无线网的网络模型,第 3 节分析了设计调度算法时会遇到的难题及理想的调度算法的特征,第 4 节分类综述了典型的分组调度算法,第 5 节对一类不同的研究思路进行了综述,最后本文给出了总结并对今后的研究热点进行了展望。

2 网络模型

ad hoc 无线网络(以下简称 ad hoc 网)是一种自治的多跳分组交换网。它由 n 个被称为移动站(MS, Mobile Station)的节点组成,每个节点都可以自由移动。网络中没有诸如基站(BS, Base Station)之类的基础设施来连接这些节点,它们要通讯只能通过无线介质。由于移动节点传输范围有限,ad hoc 网通常是多跳的,这就要求移动节点有时被用作路由器,转发来自其他移动节点的分组。每个节点处都有一个全向天线,可以接收来自任何方向的信息分组,并且每个节点都处在半双工模式,即它可以发送也可以接收,但是不能同时发送和接收。本文假定,所有的节点共享一个有限带宽的信道,并且该信道是无噪声信道,即信道错误仅仅是由冲突引起的。时间被分成大小相等的时槽,一定数量的时槽又组成帧(frame)。假定帧长是固定不变的,它的确定是依据节点数、网络负载和 QoS 约束。

3 调度队列的设计

3.1 面临的问题

(1)存在与位置有关的竞争 考虑一个简单的模型,每个节点都有一个固定的传输范围,由于无线传输在局部是广播的,接收者 i 所在临近区域内的多个同时进行的传输会在 i 处引起冲突。某一区域内对共享信道的竞争与参与竞争的节点数目有关。这与有线网和蜂窝网有着本质上的不同。

(2)平衡信道利用率和公平 ad hoc 网的多跳性使得空间复用有了可能。原则上,两个流如果不互相干扰就应该尽可能使它们同时传输。空间复用对提高无线信道利用率非常有效,但是它同时也带来了新的问题:为了提高信道利用率,可能会延迟某些处于高竞争区的流的传输,从而会在各个流之间引起不公平。一种极端的思路是仅考虑最大资源利用率,另一种极端的思路是仅考虑公平性,不过我们认为一个优秀的调度算法要能在两者之间寻找到一个最佳平衡点。一个信道最大利用率和公平性冲突的例子如图 1 所示。

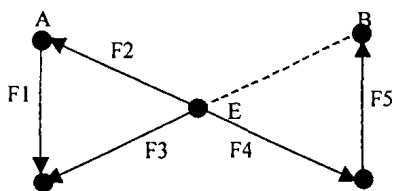


图 1 信道最大利用率和公平之间的冲突

在有线网和分组蜂窝网中,分组调度是在各自的输出链路中独立进行的。每条链路的调度器只需考虑竞争该链路的

流,而无需考虑相邻节点的调度情况。因此,在这两类网中的公平队列模型本质上实现的是局部公平。而在 ad hoc 无线网中,与位置有关的冲突在各个流之间产生耦合效应。因此调度决策将不再具有局部性,它不能仅仅依据局部流的情况做出。

说明:虚线表示干扰,实线表示待传输的流。为了使信道利用率达到最大,一种简单的解决方法是抑制流 F2、F3 和 F4 的传输,使流 F1 和 F5 一直使用信道。此时总信道利用率为 $2C$ (C 为每个流对信道利用率的贡献,本图中假定所有流对信道利用率的贡献都为 C)。很容易证明,如果流 F2、F3 或 F4 获得非零的信道分配,信道利用率将小于 $2C$ 。

(3)分布式特征 在有线网中,使用一个路由器来执行调度决策。它可以直接获得参与调度的流的信息,比如每个流等待调度的分组数,某个流的到达时间以及某一时刻等待调度的分组数等等。在分组蜂窝网中,每个蜂窝都有一个基站负责执行调度决策。基站处的调度器可以通过下行(downlink)来获得参与调度流的信息。而在 ad hoc 无线网中,参与竞争的流是在不同的节点产生的。每个节点处都有一个调度器。并且每个节点都无法直接访问其他节点处流的信息。因此 ad hoc 无线网中的公平队列本质上是分布式计算问题。

3.2 设计要求

本质上讲,ad hoc 无线网的调度是一全局问题,因为与位置有关的竞争会在整个网络中产生耦合效应。每个节点处的调度决策都会给整个网络带来多米诺效应,故分组调度不能孤立于单个节点。另一方面,分组调度又是一分布式计算问题,这使得它仅能依据局部信息。于是,如何平衡这两方面的矛盾,为 ad hoc 网分组调度算法的设计提出了挑战。在此,我们为一个理想的分组调度算法提出了如下几点要求:

(1)算法必须是全分布式的,即它只能使用局部信息并且仅能进行局部计算。

(2)算法要能实现较好的全局性能,比如全局公平性。

(3)算法要能兼顾公平和资源利用率。

(4)算法具有较好的扩展性,这要求算法应该尽量不依赖网络全局拓扑结构。

需要指出的是,严格满足上述四点要求的调度算法是很难实现的,事实上,即使知道全局范围内所有流的信息,要想求出最大无冲突流集就已经是一个 NP-完全问题,目前对该问题的求解也仅仅局限在求次优解。我们之所以提出上述四点要求,只是为分析算法性能提供一个理想的参考标准。

4 典型的分组调度算法

早期的 ad hoc 无线网的调度算法分为节点激活(node activation)的调度算法^[9,10]和链路激活(link activation)的调度算法^[11,12]。节点激活的调度算法保证所有节点发送的分组都会被其所有邻居成功接收。链路激活的调度算法则保证目的节点能够成功地接收到分组。按照调度算法对拓扑的依赖程度又可以分为拓扑透明(不依赖任何网络拓扑)的调度算法和拓扑相关(仅依赖一跳或两跳范围内的拓扑信息)的调度算法。当然还可以分为集中式调度算法和分布式调度算法,前者需要知道网络全局拓扑的信息,后者至多允许知道其邻居的信息。考虑到分布式调度算法是设计 ad hoc 网分组调度算法的最终目标,故本文讨论的分组调度算法均是分布式实现的。不过本文没有从上述任何一种分类标准来对已有的分组调度算法进行总结,而是从资源利用率和公平性的角度进行综述。我们认为资源利用率和公平性是我们最关心的两个目标,也

是 ad hoc 网分组调度算法核心问题之所在。本节组织如下: 4.1 小节综述了仅考虑资源利用率的算法, 4.2 小节综述了仅考虑公平性的算法, 4.3 小节综述了平衡公平性和资源利用率的算法。我们注意到绝大多数研究者都有一个如下的一般性思路, 即, 首先提出一种理想的集中式模型, 然后分布式地“近似”该集中式模型。我们将会 在 4.4 小节系统地分析该思路潜在的局限性。

4.1 仅考虑资源利用率的分组调度算法

由于 ad hoc 网资源非常珍贵, 最大化利用资源自然而然成为人们首先要实现的目标。但是, 确定带有最大吞吐率保证的传输调度表是一个 NP-完全问题^[9]。目前的研究也仅局限在求次优解。

文[9]中, 作者提出了一种基于节点激活的调度算法。该算法假定每个节点都知道其两跳范围内的网络连通信息。最初, 在每个帧内为所有节点各分配一个时槽。两跳范围外的节点在 i 时槽内也允许发送。事先建立一套规则来决定哪些节点在 i 时槽内可以发送。被选中的节点发送一个广播报文通知其他节点它正在使用时槽 i 。该算法允许尽可能多的节点在同一时槽内发送, 但是它没有保证时槽在节点间的公平分配。它也不是拓扑透明的。

文[13]中, 作者提出了一种基于链路激活的在线调度算法, 该算法需要知道所有队列的长度信息, 因此该算法是集中式的。作者在文中没有给出分布式实现, 但是该算法从理论上获得了最大吞吐率和最优系统稳定区。该算法的一个不足之处在于: 如果流量到达速率不是可行的话, 带宽分配可能是不公平的。

文[14]中, 作者设计了一种拓扑透明的算法保证每个帧内至少有一个节点成功发送。但是作者没有优化该算法, 使得该算法的性能有时比传统的 TDMA 性能还要差。

文[15]中延用了文[14]的思想, 提出了一种拓扑透明的链路活性算法。节点 i 使用一个时槽分配函数 (TSAF) 来为其分配传输时槽。时槽分配函数 $f_i(x)$ 是一个系数属于集合 $\{0, 1, \dots, p-1\}$ 中的 k 次多项式。多项式计算是模 p 计算。帧被分成 p 个子帧, 每个子帧由 p 个时槽组成。在每个子帧内按照如下规则为节点 i 分配一个时槽: 在子帧 $j, j=0, 1, \dots, p-1$, 节点 i 分得的时槽序号由 $f_i(j)$ 决定。对于同一子帧内的两个节点 i 和 l , 如果有 $f_i(j)=f_l(j)$, 则会有冲突。作者的目标是选择 k 使得每帧内成功传输的最小次数达到最大。该算法仅需要网络节点数和最大度信息。并且该算法使最小吞吐率达到了最大。

文[16]中, 作者为多跳无线网开发了两种带有 QoS 需求的通信机制: 一种是分布式优先级调度算法: 通过握手或者数据分组捎带 HOL (Head of Line) 分组的优先级标签。每个节点都拥有一个调度表。当一个节点发出一个 RTS (Request To Send) 分组时, 它同时会捎带当前分组的优先级指标。窃听到该 RTS 分组的节点会在各自的调度表中插入一个索引项。于是, 每个节点就可以依据调度表中的内容 (记录其他 HOL 分组的优先级指标) 来估算自己 HOL 分组的优先级指标。作者在已有的 IEEE 802.11^[17] 优先级退避策略中引入调度表的思想来分布式实现该理想调度模型。另一种是多跳调整调度 (CMS, Coordinated Multihop Scheduling) 算法, 它用来解决理想模型无法精确实现的问题。MCS 算法通过递归计算分组的优先级指标, 使得下游的节点可以帮助在上游延迟的分组赶上, 也可以通过减小超前分组的优先级, 使得紧急分组能够

更快的得以通过。

4.2 仅考虑公平性的分组调度算法

商用 ad hoc 网使用一种称为“付费使用”(pay for use) 的模式, 于是在用户间公平分配有限带宽的信道变得非常重要。“公平”是指不能因为某些用户需要更多的资源就牺牲其它用户的合法利益。公平按照有无权重可分为 max-min 公平和按比例公平 (Proportional Fairness), 按照作用对象又可分为基于流 (per-flow) 的公平和基于节点 (per-node) 的公平^[18]。

文[18]中, 作者提出了一种 PFCR (Proportional Fairness Contention Resolution) 算法实现了基于流的按比例公平。该算法是从效益函数 (utility function) 的角度出发, 同时使用了持续 (persistence) 和退避 (backoff) 策略。该算法用到了如下的性质: 假定 $U(r_i)$ 是流 i 的效益函数。如果任一流 i 的信道分配速率 r_i 按照公式 $\dot{r}_i = \alpha - \frac{\beta p_i}{U(r_i)}$ 变化, 则网络效益和流效益函数分别收敛于各自的最优解, 同时系统收敛于最优点。其中, p_i 是流 i 的竞争失败概率, α 和 β 是系统参数, 分别表示效益常数 and 惩罚常数。对于按比例公平, $U(r_i)$ 取 $\log r_i$ 即可。本文最大的贡献是提供了一种一般性机制, 该机制通过使效益函数最大化来实现任何指定的公平模型。该机制具有非常高的理论价值, 但是使用该思路来实现诸如按比例公平效率会比较低。

文[19]中, 作者提出了一种在线调度策略实现了基于链路 (per-link) 的 max-min 公平。该算法中使用了最大权匹配算法 (MWM, Maximum Weighted Matching), 每个流的权重依据对 max-min 公平带宽的估计、该流上一次收到的服务以及该流的流量需求作出。流的权重在每个时槽内均会获得更新。调度算法依据当前时槽内的权重。因此, 调度过程和对 max-min 公平带宽的估算过程是并行的。估算过程仅需要依据局部信息, 但是最大权匹配算法仍需要知道全局信息。该算法不需要预先知道流量特征, 但是该算法在流的长度比较大时无法保证基于流的公平。

文[20]中, 作者研究了当流的长度比较大时的公平性问题, 并提出了一种流速率分配策略, 使得流速率的长期平均值是 max-min 公平的。但是本文把网络拓扑限定为一维对称网, 并且采用的是“尽力而为”(best effort) 的服务模式。

文[21]中, 作者为 ad hoc 网实现 max-min 公平分配提供了一种理论框架。本文提出了一种分布式算法, 使得每个节点可以确定基于链路的 max-min 公平份额, 而无需知道全局拓扑信息。该算法不需要预先指定的公平份额, 并且作者认为在 ad hoc 网中静态地预先指定公平份额是没有意义的, 这是由节点移动性以及存在与位置相关的竞争决定的。但是作者漏掉了该算法的一些重要的实现细节。

文[22]中, 作者分析了在 ad hoc 无线网络中设计公平队列时面临的问题, 定义了 GRS 模型 (Generalized Resource Sharing)。GRS 是一种类似 GPS (Generalized Process Sharing) 的理想模型, 它为每个流分配了一个时间戳 (r, ϕ) , 并把初始值设为 $(0, w_i)$, 其中 r 是轮循数 (round number), ϕ 是权重, w_i 是流 i 的初始权重。首先按照轮循数从小到大为所有的流排序, 得到 f_1, \dots, f_n , 然后从 f_1 开始做如下检查: 如果 f_1 不与已经允许传输的流冲突, 则允许其传输。此时 r 和 ϕ 均会做相应的修改。作者也给出了一个基于竞争的分布式算法来近似该集中式模型。但是我们认为, 本文最大的贡献是为 ad hoc 网提供了一个理想的按比例公平模型, 这使得一些分

布式近似算法可以依据该集中式模型作出。

4.3 平衡公平性和资源利用率的分组调度算法

4.1 和 4.2 节介绍的调度算法在设计时要么仅考虑资源利用率,要么仅考虑公平需求,这在某些应用背景下的确是合理的。下面要介绍的算法采取了一种折衷的思想:它们首先保证每个流都有一个最小的公平份额,在此基础上实现资源的最大利用。这是近期研究 ad hoc 无线网分组调度算法一个重要的方向。

文[23]中,作者把 STFQ^[3]算法和 WF²Q^[2]算法结合起来作为理想的集中式算法。在集中式模型中,作者指出:使信道利用率达到最大等价于求解节点图的最大独立集(MIS, Maximum Independent Set)。求解最大独立集是一 NP-完全问题,作者采用了最小度贪心算法来近似求解最大独立集。作者提出了两种公平模型:一种是全局拓扑独立的,另一种是局部拓扑相关的。前者,为了使每个节点都获得所有流的信息,作者使用了无冲突共享树来传播所需的流信息,它本质上还是集中式算法;后者,每个节点却只需要知道局部流的信息。作者采用了一种改进的退避策略来分布式近似该集中式模型。作者令退避值等于流竞争图中节点的度。但是如果度很大的话,退避值也会很大,这会增加等待时间开销。

文[24]中,作者在 CSMA/CA 标准下引入了三种局部化的公平队列模型,通过让节点分布式的模拟 STFQ 实现了全局带权公平。作者使用了三种策略:(1)局部最小服务标签的流优先发送;(2)使用一种新的退避策略:任一流 f 的退避值被设置成小于其服务标签值的流的个数;(3)使用滑动窗口来限制不公平程度。使用策略(1)可以有效地限制不公平程度:

$$\left| \frac{W_f(t_1, t_2)}{r_f} - \frac{W_g(t_1, t_2)}{r_g} \right| < \Delta, \text{ 其中, } W_f(t_1, t_2) \text{ 是流 } f \text{ 在时间区间 } [t_1, t_2] \text{ 内收到的服务, } r_f \text{ 是流 } f \text{ 的权重, } \Delta \text{ 是与拓扑有关的常数。}$$

使用策略(1)还可以实现长期公平性: $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{W_f(0, t)}{t} = r_f / k_f$, 其中, k_f 是与拓扑有关的常数。三种公平队列模型都为每个流提供一个最小公平份额: $W_f(t_1, t_2) \geq C \frac{r_f}{k \sum_{g \in S} r_g} (t_2 - t_1) - \alpha$, 其中, k 和 α 是两个与拓扑有关的常量, S 是在流竞争图中与流 f 相距一跳的所有流的集合。使用策略(1)不需要全局同步,这是与需要精确全局同步的算法相比最显著的优势。本文使用的退避策略也不需要全局同步,只需要局部同步,这在握手的时候很容易就能实现。

文[25]中,作者提出了一种基于比特(bit)的集中式公平队列模型,描述如下:

(1)把所有流划分成彼此独立的集合,并为每个集合中的流定义了一个 FFQ(Fluid Fair Queueing)模型。
(2)FFQ 模型简述如下:每个流获得正比与其权重的信道份额。在保证该份额的前提下,最大程度复用空间。
(3)为了复用空间,调度器交换同一“向前看”(lookahead)窗口内的比特次序。
(4)为了最大程度复用空间,要使同一“向前看”窗口内分组的传输次数达到最少。由于每次传输后,窗口都会向前移动,因此这等价于一动态图着色问题。

作者给出了一个基于无冲突共享树的分布式实现:为了保证基本的流信息能够及时传播给所有节点,作者把信道分成控制信道和数据信道,并把控制信道专门用于传播所需的流信息。该分布式实现至多是在概念上近似该集中式模型。

文[26]中,作者从图论的观点提出了一种 DWOP (Distributed Wireless Ordering Protocol)协议,该协议能够保证分组按照理想参考模型指定的顺序访问无线介质。该协议中使用了一种与文[16]类似的策略:“捎带”HOL 分组的优先级,使得其他节点可以借此估算各自的相对优先级。该协议不是要实现基于流的公平或者基于节点的公平,而是为近似一系列集中式算法提供一种按序机制,从而解决了集中式算法在 ad hoc 网中应用时会遇到的一大技术难题。这正是本文的最大贡献。但是作者未能明确指出不一致竞争流集和优先级传播冲突会有何影响。

4.4 一般性研究思路中存在的问题

我们注意到,在 ad hoc 无线网中,有一大类分组调度算法的设计都遵循如下思路:首先提出一个理想的集中式模型,然后设法分布式地“近似”该集中式模型。该思路的优势非常明显:集中式模型为分布式近似提供了可分析的性能边界,分布式算法的性能一般来说不会超过相应的集中式算法。但是,在大型 ad hoc 无线网中,该“近似”策略会凸显出三点局限性:

(1)全局同步:为了支持退避策略,每个节点处的退避计数器都需要同时开始记时,这便需要对所有退避计数器全局同步。没有全局同步,近似算法将无法精确地近似集中式模型。并且,使用 TDMA(Time Division Multiple Access)机制,也需要在每个结点处进行同步。

(2)局部虚时间 $\tilde{V}(t)$ 和全局虚时间 $V(t)$:在 ad hoc 网中每个节点至多可以知道其两跳范围之内传输分组的信息,于是在大型 ad hoc 网中 $\tilde{V}(t)$ 与集中式算法所需的 $V(t)$ 一般来说会有所不同。这会导致退避值的设定变得不准确。

(3)无法限定不公平的程度:由于信道空间复用,某些流(比如拥有最小服务标签的流)比起其他流能够更频繁地得以传输,因此上述的策略无法总能限定任两个流之间的不公平程度。

为了避免上述的一般性思路可能带来的局限性,文[24]中提出了一种自调整的分布式调度算法,具体可参见 4.3 小节相应的描述。

5 一类不同的研究思路—联合调度(Joint Scheduling)

对 ad hoc 无线网络传统的研究思路是把分组调度与路由和功率控制分开,但是随着研究的深入,人们发现,三者独立研究效率很低^[27]。这主要是因为链路之间可以通过干扰相互影响。一条链路的传输调度表或者功率分配的改变会引起周围链路容量的改变。于是一些文章对联合调度最优问题进行了深入的研究。联合调度问题可以等价于一个高复杂性的非凸最优解问题。如何给出高效的联合调度算法,是当前 ad hoc 无线网调度算法研究的一个热点课题。目前该问题也仅在小型网络中得以较好解决。

联合调度的研究成果主要有:文[28]中作者为每条链路定义了一个最小 SINR (Signal-to-Interference-and-Noise Ratio)值,并把过程分为调度和功率控制两个子过程。在调度步骤,调度算法求出有效的用户集合,在功率控制步骤,分布式地执行功率控制算法,确定可接纳的用户集合及其传输功率。但是这两个子过程本身都是 NP-完全问题。文[29]中作者研究了在 CDMA(Code Division Multiple Access)机制下 ad hoc 无线网络中链路调度和功率控制最优结合的问题。作者

要解决的问题是:在给定每个用户功率约束的条件下,如何使网络总吞吐量达到最大。作者给出了一种解决办法,并在小型网络中得以较好的实现。文[30]中作者研究了调度和路由最优结合的问题。作者仍是把网络总吞吐量最大化作为性能目标。文[31]中作者研究了调度、功控和路由三者最优结合的问题。作者把网络总容量最大化作为性能目标。但是,作者给出的解决方法过于复杂,即使在线性网络中也要求节点数不能超过10个。文[20]中为了在大型网络中实现调度、功控和路由三者的最优结合,作者把网络模型限定为一维且对称的 ad hoc 无线网络,实现了速率的 max-min 公平分配。文[32]中作者研究了调度和路由结合的问题,提出了一种能量有效的算法,在充分考虑了传输功率需求以及链路队列大小等诸多因素的基础上,该算法实现了较小的功率消耗、较低的平均时延以及较高的吞吐量。

总结与展望 本文综述了在 ad hoc 无线网研究中占有重要地位的分组调度算法,对每种算法核心的思想进行了描述和分析。但是就调度算法研究本身而言,我们认为尚有许多值得研究的问题:

(1)可变大小的分组。在已有的算法中都假定分组大小固定不变,这种假定在典型的无线传输中有广阔的应用背景。但是,对于某些分组大小会变化的非典型传输,要求调度算法同样也能支持。当多个分组在复用的物理信道中传输时,如果 HOL 分组长度不同,这些分组传输结束的时间将会不同。一个大分组将会比一个小分组占有更多的信道。目前尚未有好的调度算法能够支持可变大小的分组,我们认为这是一个很有前景也亟需研究的领域。

(2)结点的移动性。在已有的分组调度算法中,几乎都显式或隐式地对结点的移动性做了某些限制,这与实际 ad hoc 网允许节点频繁、快速移动的事实仍有差距。之所以弱化移动性,主要是因为当节点高速频繁移动时,捕获临近流的信息难度会显著增大。如何设计可以完全不受节点移动性影响的调度算法也是现在正在研究的一个热点问题。

(3)启发式算法的研究。在 ad hoc 网分组调度算法的研究中,许多最优问题都等价于 NP-完全问题。比如本文提到的最大独立集(MIS)的求解。这成了制约分组调度算法性能的一大瓶颈。目前对该类问题的求解基本上都集中在通过启发式的算法来求解次优解。于是,如何设计出高效的启发式策略成了算法和调度领域一个非常活跃的课题。

参考文献

- Demers A, Keshav S, Shenker S. Analysis and simulation of a fair queueing algorithm. In: Proc. of ACM SIGCOMM'89, 1989
- Bennett J, Zhang H. WFQ: worst-case fair weighted fair queueing. In: Proc. of IEEE INFOCOM'96, 1996
- Goyal P, Vin H, Chen H. Start-time fair queueing: A scheduling algorithm for integrated service access. In: Proc. of ACM SIGCOMM'96, 1996
- Bhagwat P, Bhattacharya P, Krishma A, Tripathi S. Enhancing throughput over wireless LANs using channel state dependent packet scheduling. In: Proc. of IEEE INFOCOM'97, 1997
- Lu S, Nandagopal T, Bharghavan V. Fair scheduling in wireless packet networks. In: Proc. of ACM MOBICOM'98, 1998
- Lu S, Bharghavan V, Srikant R. Fair scheduling in wireless packet networks. In: Proc. of ACM SIGCOMM'97, 1997
- Ramanathan P, Agrawal P. Adapting packet fair queueing algorithms to wireless networks. In: Proc. of ACM MOBICOM'98, 1998
- Eugene Ng T, Stoica I, Zhang H. Packet fair queueing algorithms for wireless networks with location-dependent errors. In: Proc. of IEEE INFOCOM'98, 1998
- Ephremides A, Truong T. Scheduling broadcasts in multihop networks. IEEE Trans. Commun., 1990, 38(4): 456~460
- Ramaswami R, Parhi K. Distributed scheduling of broadcasts in a radio network. In: Proc. of IEEE INFOCOM '89, 1989
- Baker D, Ephremides A. The architectural organization of a mobile radio network via a distributed algorithm. IEEE Trans. Commun., 1981, 29(11): 1694~1701
- Hajek B, Sasaki G. Link scheduling in polynomial time. IEEE Trans. Inform. Theory, 1988, 34(9): 910~917
- Tassiulas L, Ephremides A. Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(12)
- Chlamtac I, Farago A. Making transmission schedules immune to topology changes in multi-hop packet radio networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1994, 2(1)
- Ju J, Li V. An optimal topology-transparent scheduling method in multihop packet radio networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 6(3)
- Kanodia V, Li C, Sabharwal A, Sadeghi B, Knightly E. Distributed priority scheduling and medium access in ad hoc networks. ACM Wireless Networks, 2002, 8(11)
- IEEE. IEEE std 802.11-wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. 1997
- Nandagopal T, Kim T, Gao X, Bharghavan V. Achieving MAC layer fairness in wireless packet networks. In: Proc. of ACM MOBICOM'00, 2000
- Tassiulas L, Sarkar S. Max-min fair scheduling in wireless networks. In: Proc. of INFOCOM'02, 2002
- Radunovic B, Le Boudec J Y. Joint scheduling, power control and routing in symmetric, one-dimensional, multi-hop wireless networks: [Technical Report IC/2002/84]. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne
- Huang X, Bensaou B. On max-min fairness and scheduling in wireless ad-hoc networks: analytical framework and implementation. In: Proc. of ACM MOBIHOC'01, 2001
- Vaidya N, Bahl P. Fair scheduling in broadcast environments: [Microsoft Research Tech. Rep. MSR-TR-99-61]
- Luo H, Lu S, Bharghavan V. A new model for packet scheduling in multihop wireless networks. In: Proc. of ACM MOBICOM'00, 2000
- Luo H, Medvedev P, Cheng J, Lu S. A self-coordinating approach to distributed fair queueing in ad hoc wireless networks. In: Proc. of IEEE INFOCOM'01, 2001
- Luo H, Lu S. A topology-independent fair queueing model in ad hoc wireless networks. In: Proc. of IEEE ICNP'00, 2000
- Kanodia V, Li C, Sabharwal A, Sadeghi B, Knightly E. Ordered packet scheduling in wireless ad hoc networks: mechanisms and performance analysis. In: Proc. of ACM MOBIHOC'02, 2002
- Goldsmith A, Wicker S. Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless networks. IEEE Wireless Communications, 2002, 9(4): 8~27
- Elbatt T, Ephremides A. Joint scheduling and power control for wireless ad hoc networks. In: Proc. of IEEE INFOCOM'02, 2002
- Cruz R, Santhanam A. Optimal link scheduling and power control in CDMA multihop wireless networks. In: Proc. of Globecom'02, 2002
- Tassiulas L, Ephremides A. Jointly optimal routing and scheduling in packet radio networks. IEEE Trans. Inform. Theory, 1992, 38(1): 165~168
- Toumpis S, Goldsmith A. Capacity regions for wireless ad hoc networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003 (to appear)
- Girici T, Ephremides A. Joint routing and scheduling metrics for ad hoc wireless networks. In: Proc. of ACSSC'02, 2002