

自组网中的负载均衡路由协议^{*})

郑相全 郭伟

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

摘要 自组网中的负载均衡路由协议用于克服传统自组网路由协议中的拥塞和瓶颈,根据收集到的网络负载信息,通过将网络中的数据业务流进行负载均衡分布来提高路由协议的性能。本文介绍了自组网中负载均衡路由协议的研究概况,对现有的负载均衡路由协议进行了分类,对负载均衡方法做了描述,对不同负载均衡路由协议进行了分析和比较,指出了需要进一步研究的问题。

关键词 自组网,负载感知,拥塞控制,负载均衡,路由算法

Load-balanced Routing Protocols in Ad Hoc Networks

ZHENG Xiang-Quan GUO Wei

(National Key Laboratory of Communication, UEST of China, Chengdu 610054)

Abstract Load-balanced routing protocols are used to get round the congestion and bottleneck problems of traditional routing protocols in ad hoc networks. Based on the load information, the load-balanced routing protocols try to enhance the performance of routing protocols by the load-balanced distribution of data traffic over the networks. This paper makes a survey of the recent works about load-balanced routing protocols for ad hoc networks. First, this paper describes the methods and compares the similarities and differences of some main load-balanced routing protocols that are proposed in the literature. At the end of this paper, further research problems in the area are also discussed.

Keywords Ad hoc networks, Load aware, Congestion control, Load balance, Routing algorithm

1 引言

自组网(ad hoc networks)^[1]的研究起源与 TCP/IP 协议族类似,是一种移动通信和计算机网络相结合的网络,整个网络没有固定的基础设施,可以在不能利用或不便利用现有网络基础设施的情况下提供一种通信支撑环境,拓宽了移动网络的应用场合,可以广泛应用于国防战备、灾难救助、偏远地区等无法得到有线网络支持或某些只是临时需要通信的环境,满足用户对移动数据通信的需求。

自组网中的便携式移动终端节点通常依靠电池提供能量,发射功率有限,有时需要多跳转发实现通信,每个终端节点都兼有路由器和终端两种功能。网络中各终端节点需要运行各种面向用户的应用程序和相应的路由协议,并根据路由策略和路由表完成数据分组的转发和路由维护工作,故要求节点采用合适的路由协议以高效地实现源和目的节点之间的通信。自组网路由协议的目标是快速、准确和高效,要求在尽可能短的时间内找到准确可用的路由信息,并能适应网络拓扑的快速动态变化,同时减小引入的额外时延和维护路由的控制信息,降低路由协议的开销,以满足移动终端计算能力、储存空间以及电源等方面的限制。

由于功率与带宽限制,自组网中的路由协议应该在移动节点之间公平地分配路由任务。而传统的大多数自组网路由协议运行的结果都是使产生的众多路由经过一小部分处于网络中心位置的节点。大量数据通过少量节点传输必然导致网络出现拥塞和瓶颈,使分组排队等待时延和分组丢失率增加。

同时,非均衡的数据业务流分配将快速耗尽重负载节点的能源,随着掉电节点的增加,网络的连接性将随之减弱,网络的分裂最终导致呼叫失败,缩短了网络的总体生存时间。因此,有必要在路由选择时考虑网络中各节点的负载和拥塞情况,对网络进行负载均衡,使网络保持连续、高效、稳定的运行,网络的综合性能达到最优。

负载均衡在本质上就是利用网络中可能存在的多条分组传输路径来构建分组的实际传输路由,通过有足够剩余容量的节点转发分组,以减轻现存的和潜在的局部拥塞,适应网络中负载的动态变化,尽可能减少分组丢失和提高网络吞吐率,为业务提供更好的 QoS 保证。评价负载均衡网络的性能指标主要是吞吐率和网络传输时延,负载均衡技术同时具有提升这两方面的能力,能够在提高系统吞吐率的基础上,尽可能减少网络的端到端时延。

自组网路由协议中进行负载均衡的主要方法是在路由选择时避开拥塞节点和在多径路由存在的情况下对负载进行合理分流,该方法实现的重要前提就是协议能够感知网络负载。根据收集到的网络负载,通过使重负载节点不参与新路由发现的隐式呼叫准入控制和根据路径负载实现在不同路径上的业务流分配调度等措施,可以减少经过重负载中间节点的不利路由,使得网络中负载分布均匀,减少拥塞,提高网络的吞吐率等性能。同时,由于业务流的均衡分布,网络中各节点的能量消耗也相应得到平衡,增加了网络的生存时间和网络的抗毁能力。

本文重点对自组网中现有的负载均衡路由协议的负载均

^{*})国家“863”计划项目(2001AA123032)、战术通信抗干扰技术国防科技重点实验室基金项目(51434040103ZS0401)和重庆市科技计划项目(0830)资助。

衡方法进行了分析。

2 自组网负载均衡路由面临的困难及协议分类

自组网中节点之间需要多跳的无线连接,负载均衡路由协议不仅要考虑邻居节点之间的负载情况和业务流之间的相互干扰问题,还要对多条无线多跳路径的负载进行权衡。它面临着如下主要问题:

- ① 网络资源受限。无线信道带宽较窄,信道质量不稳定且容易受到干扰,如果采用更强的编码方法或加大发射功率等方法通常将会导致带宽的减少,造成网络中的进一步拥塞;
- ② 基于竞争的共享信道访问方式将带来隐藏终端、暴露

终端和侵入终端等问题,增加了不同路由之间的耦合^[2],造成分组碰撞概率和路由控制开销的增加,降低系统的整体效率;

③ 动态的拓扑变化以及节点的移动性将影响负载信息采集的收敛性。

目前,已存在不少以自组网为应用环境的负载均衡路由协议,这些协议分别采用不同的方法对网络负载进行统计,从不同的角度将网络负载作为路由选择的重要因素,实现网络业务流在网络中的均衡分布。对于这些协议,可以从不同的角度进行分类。本文为了叙述方便,将自组网中现有的负载均衡路由协议按照如图1所示的方式进行具体分类。

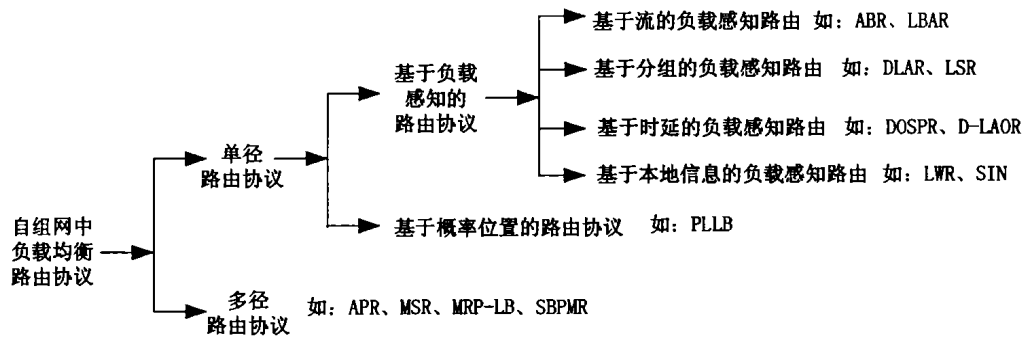


图1 自组网中的负载均衡路由协议分类

根据源节点和目的节点之间的路由采用的路径数可将自组网中现有的负载均衡路由协议分为单径路由协议和多径路由协议。单径路由协议中,业务流通过一条路由进行传输,多径路由协议则将业务流分配到多条路由上同时传输。对于路由发现时虽然产生多条冗余路由,但是将每个源和目的节点对之间的业务流集中在一条主要的路由上传输,而只有当该主要路由断链时才采用其它替代路径进行分组传输的路由协议,本文仍然将该类协议归类于单径路由协议。

根据负载均衡的方式又可将单径路由协议分为基于负载感知的路由协议和基于概率位置的路由协议,前者根据感知到的网络负载情况对后续的网络业务流分配进行控制以实现负载均衡,后者则在给定的源和目的节点对之间选择一条避开业务流瓶颈的最大概率路由。根据对负载进行感知时采用的不同计算方法还可将基于负载感知的负载均衡路由协议分为四类,其中基于流的负载感知路由协议采用经过节点的路由数来间接度量节点的业务流负载,基于分组的负载感知路由协议使用缓存在节点接口队列中的分组数量作为网络负载,基于时延的负载感知路由协议通过路径中节点的估计时延来反映网络负载,基于本地信息的负载感知路由协议则根据信道利用率、缓存队列大小、活跃邻居节点数等本地信息来确定负载的轻重等级。

3 自组网中的单径负载均衡路由协议及方法描述

3.1 基于流的负载感知路由协议

在基于流的负载感知路由协议中,ABR^[3](Associativity-Based Routing)由经过节点的路由数目来间接度量节点的业务流负载,而LBAR^[4](Load-Balanced wireless Ad hoc Routing)则将节点的网络负载定义为经过节点及其邻居的路由数,考虑了无线自组网与有线网络信道特点的区别,较ABR能更细致地反映自组网应用环境的特性。自组网中由于采用竞争的共享广播信道访问方式,使得分组的时延不仅仅是由当前节点的业务负载引起的,其他邻居节点的业务流负载也

同样会导致本节点分组的传输时延,称为业务流干扰。在存在业务流干扰的情况下,LBAR选择的最优代价路由就是同时满足正在发送的业务流负载最小和邻居节点干扰最小的路径。

(1) ABR。在ABR协议的路由发现阶段,当中间节点收到源节点发送的广播查询分组时,中间节点会将本节点的地址、节点间联合计数值、路由的转发负载、链路的传输负载、网段计数信息附加在广播查询分组中,并将该更新后的广播查询分组继续转发给所有邻居节点。目的节点收到广播查询分组后,通过检查各节点的联合稳定标记值,选择稳定性强和质量(转发能力和传输能力)高的最佳路由,并沿着被选定的各路径向源节点发送应答分组。有应答分组经过的路径为有效路径,其他路径保持非激活状态,因此可避免重复分组到达目的节点。

ABR以联合稳定度作为路由选择的度量,考虑了路径负载因素,但它只是将负载因素作为次要的选择依据,其负载由经过节点的路由数目来度量,不能计算实际的流量负载。

(2) LBAR。LBAR是一种按需路由协议,该协议着眼于如何找到一条具有最少业务量从而使得分组能够以最小延迟进行传输的路径。LBAR用节点活跃度 A_i (通过节点 i 的活跃路径数)来表示移动节点的负载情况, A_i 越大,通过节点 i 的业务流越多。在路由发现阶段,每个位于从源节点到目的节点的路径中的节点都要计算节点的活跃性和业务流干扰 TI_i

(节点 i 的邻居节点的活跃度之和,即 $TI_i = \sum_{j \in N_i} A_j$, j 为节点 i 的邻居节点)。目的节点根据收集到的所有可能路径上的节点活跃度值,选择一条具有最小代价的路径,并沿选择的路径向源节点发送路由应答。路径 k 的代价 $C_k = \sum_{i \in k} (A_i + TI_i) = \sum_{i \in k} (A_i + \sum_{j \in N_i} A_j)$, i 为路径 k 中除源和目的节点之外的中间节点。在链路发生断裂时,可通过其他的冗余路径提供到达目的节点的有效路由。

3.2 基于分组的负载感知路由协议

基于分组的负载感知路由协议中,DLAR^[5](Dynamic Load-Aware Routing)使用缓存在节点接口队列中的分组数量作为网络负载,而LSR^[6](Load-Sensitive Routing)中一个节点的网络负载定义为节点及其邻居节点的接口队列中缓存分组的总和,不仅包括本地负载,还考虑了该节点的邻居节点的负载。LSR考虑了无线信道的广播特性产生的接入竞争对网络性能的影响,对负载的评价比DLAR要更为准确。

(1) DLAR。它是针对自组网的第一个最小负载路由协议。在路由发现阶段为了使用最新的负载信息以及将引起拥塞瓶颈的重叠路由数最小化,DLAR禁止中间节点对路由请求分组进行应答。中间节点在收到非重复的路由请求分组后,将本节点负载信息(队列中缓存的分组数量)附加到路由请求分组中并将其继续转发。目的节点根据路由请求分组携带的负载信息选择最佳负载的路由并沿选择的路由向源节点发送一个路由应答分组。在DLAR的路由维护阶段,由目的节点监视路由的负载状态,路由可以在发生拥塞前被重新建立。

DLAR中目的节点使用三种不同的负载评价方法选择最佳路由:简单地累加所有中间节点的负载,并选择负载最小的

$$f(A, B) = \begin{cases} -1, & \text{若 } (PL(A) - PL(B) > \alpha) \vee ((|PL(A) - PL(B)| \leq \alpha) \wedge (PV(A) - PV(B) > \beta)) \\ 0, & \text{若 } (|PL(A) - PL(B)| \leq \alpha) \wedge (PV(A) - PV(B) \leq \beta) \\ 1, & \text{其他} \end{cases}$$

在 $f(A, B)$ 的定义中,采用 PL 作为主要的比较判别准则, PV 作为辅助的准则。如果路径A的 PL 比路径B的 PL 至少大 α ,或路径A的 PL 大于路径B的 PL 不超过 α 但路径A的 PV 比路径B的 PV 至少大 β ,则可以认为路径B优于路径A,用 $f(A, B) = -1$ 表示。当 $f(A, B) = 0$ 时可以认为路径B和路径A在路径负载信息方面基本相同。 $f(A, B) = 1$ 表示路径A优于路径B。

采用参数 α 和 β 可以使比较判别的进行更为灵活,以便根据不同的要求分别采用两种不同的路径比较函数:严格的和松弛的路径比较函数。在严格的比较函数中,参数 α 和 β 设置为比较小的值,而在松弛的情况下其取值可以相对大一些。在路由发现阶段,LSR使用严格路径比较函数对不同路径的负载信息进行比较,由于 α 和 β 取值较小,可以确实保证选择到的路径更好。路由自适应维护阶段,LSR根据网络负载信息动态选择活跃路由,在当前路径负载信息比初始路径负载信息远为恶劣时,网络可能就出现了拥塞而需要选择一条新的更好路径,为了判断当前路径是否变得很差,LSR采用松弛的路径比较函数,在这种情况下参数 α 和 β 的取值就成为是否启动路由的自适应调整的阈值。

3.3 基于时延的负载感知路由协议

基于时延的负载感知路由协议中,DOSPR^[7](Delay-Oriented Shortest Path Routing protocol)通过IEEE 802.11DCF MAC协议下的接入竞争时延来估计网络负载情况,D-LAOR^[8](Delay-based Load-Aware On-demand Routing)则通过整个路径的平均总估计时延来判断路径的负载情况。

(1) DOSPR。对IEEE 802.11 DCF协议下移动节点MAC层的接入竞争时延进行了分析,采用表驱动的方式及时地采集网络连接状态信息,将收集到的连接状态信息存储于连接状态矩阵(CSM)中,矩阵中各元素分别记录对应的行节点到各列节点对应的邻居节点的时延代价值(包括竞争时延和发送时延)。在路由发现阶段,DOSPR根据CSM中的时延代价值,利用与Dijkstra类似的算法可以获得最小时延的

路由;采用路径上所有中间节点的平均负载作为路由选择依据;把中间节点中发生拥塞的节点数量作为路由选择依据。研究表明,采用第一种负载评价方法所获得的最佳路由的性能最好。

(2) LSR。它是一种按需的负载敏感路由方法。LSR中任意一个节点 $v_i(1 \leq i \leq n)$ 的业务流负载 $TL(v_i)$ 定义为该节点接口缓存的分组数及其邻居节点中缓存的分组数之和。对任意给定路径 $p = \langle v_1, \dots, v_n \rangle$ 的路径总负载 $PL(P) = \sum_{i=1}^n TL(v_i)$,路径中节点业务流负载的标准差

$$PV(P) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TL(v_i))^2 - n * (ML)^2}{n-1}}$$

其中 $ML = PL(P)/n$ 。LSR不要求目的节点等待所有可能的路由,它采用重定向的方式高效地发现更好路径。根据一条活跃路径的初始状态,LSR能够在数据传送期间当该活跃路径变得拥塞时动态地搜索更好的路径,利用负载信息对LSR性能进行调整。LSR中采用路径比较函数来选择更好的路径,路径比较函数 $f(A, B)$ (A, B为两条路径)定义为:

最短路径路由。路由选择的结果所获得的路由其路径跳数较传统最短路径路由准则情况下选择的路径的跳数略微增加,但能明显减少从源节点到目的节点的每个分组的总传输时延,并且使节点移动性导致的分组丢失率降低。

(2) D-LAOR。基于整个路径的估计时延和跳数确定最优路径,在进行本地时延测量时,假定每个移动节点采用IEEE 802.11 DCF MAC协议,且能监视MAC层接口队列。移动节点收到分组后在每个分组头中设置一个时间标签, a_i 、 b_i 分别表示 i^{th} 分组的到达和成功发送时间。节点 k 的 i^{th} 分组成功发送后,节点 k 的平均总估计时延值 $q_i^k = (1 - \beta)q_{i-1}^k + \beta(d_i - a_i)$, $i > 1$ 且 $0 \leq \beta \leq 1$ 。节点的平均总估计时延值包括排队等待、接入竞争和分组发送时延,传播时延假定可忽略。因此,从节点1到 n 的路径P的路径总时延 $D_p = \sum_{i=1}^n Q_i$, Q_i 表示节点 k 在路由发现时的节点总估计时延 q_i^k 。在路由选择时,只有当新获得的路径 P' 在跳数上短于先前路径 p 且 $D_{p'} < D_p$ 时,D-LAOR才允许路径中的每个节点对路由表项进行更新。

另外,D-LAOR通过将拥塞节点处的路由请求分组丢弃而防止拥塞节点成为一条新路径的中间节点,使产生的路由在避开拥塞节点的同时减少了拥塞节点对路由请求分组转发带来的冗余发射。D-LAOR通过比较路由请求分组转发路径中的两个连续节点中接口队列中缓存的分组数及总节点估计时延值来确定拥塞节点。D-LAOR仅在以下两条件同时满足时才丢弃路由请求分组:节点A的节点总估计时延大于其前一节点B的节点总估计时延;缓存在节点A的接口队列中的分组数大于其缓存容量的80%。

3.4 基于本地信息的负载感知路由协议

基于本地信息的负载感知路由协议中,LWR^[9](Load Aware routing (LWR) based on local information)根据信道利用率、缓存队列大小、活跃邻居节点数、回退定时器的值等本地信息确定负载轻重等级,SIN^[10](Selective Intermediate Nodes Scheme)则根据信道利用率、缓存队列大小、活跃邻居

节点数、节点的分群状态等本地信息确定负载轻重等级。该类协议假设每个节点在知道节点带宽的情况下都采用 802.11 DCF MAC 协议,信道状态分为空闲、发送、接收和碰撞,每个节点的 MAC 层能在任何时候对共享信道进行监视,只要信道状态发生变化,每个节点就要对先前信道所处状态的持续时间进行累加。为了防止出现突变,每个计算值都通过先前值进行平滑处理,每隔一定的间隔时间都需要对信道利用率 U_i 、平均队列大小 Q_i 等进行计算:

$$U_i \leftarrow 1 - \frac{\text{空闲时间}}{\text{间隔周期}}, Q_i = \frac{\text{总队列大小}}{\text{状态变化次数}}$$

(1) LWR。其负载等级 L_i 根据 U_i 、 Q_i 、活跃邻居节点数 N_i 和回退定时器的值 B_i 等本地信息进行确定, L_i 随 U_i 、 Q_i 、 N_i 、 B_i 的增加而增大。当 U_i 接近 IEEE 802.11 DCF 情况下的信道吞吐率饱和点 ρ_{\max} 时,输入负载的轻微上升将导致数据分组丢失概率的大量增加。 Q_i 通过队列负荷表征负载等级, N_i 用于确定 ρ_{\max} , B_i 代表一个数据分组发送失败的次数,与冲突概率有很大关系。在下列情况下可以认为节点处于重负载状态,即 U_i 为 FULL-HEAVY: ① $\rho_{\max} - U_i \leq \delta$, ρ_{\max} 为当前网络环境中采用 IEEE 802.11 所能获得的最大信道利用率,与冲突概率和邻居节点数有关, δ 为一个较小的保护界限; ② $\rho_{\text{coll}} > C_{\max}$, ρ_{coll} 为冲突概率, C_{\max} 为碰撞门限; ③ 一些节点对共享信道的占用时间长于公平占用所允许的时间。

LWR 的主要思想是将重负载的中间节点处的路由请求分组丢弃,减少经过重负载中间节点的不利路由。中间节点只有在路由请求分组的生存时间 $TTL=0$ 或节点的负载等级 $L_i (U_i, Q_i, N_i, B_i) > FULL-HEAVY$ 时才丢弃路由请求洪泛分组,该丢弃处理减少重负载中间节点对洪泛分组的冗余发射,大大降低了网络中邻居节点之间的干扰对系统的性能影响。LWR 通过重负载节点不参与新路由的发现实现了隐式的呼叫准入控制,减少了网络中的冗余业务流,使网络中的干扰明显降低,能明显改善数据分组和路由控制分组的递交率,解决了按需路由的饱和问题^[11]。LWR 是自适应的协议,在轻负载情况下协议能达到传统按需路由的效率,在重负载情况下协议能够对不利路由的建立进行控制。

(2) SIN。信道利用率比平均队列大小能更准确地表征本地负载状态,因为即使在平均队列大小很小的情况下信道仍然可能拥塞。所以 SIN 中每个节点采用 MAC 层测量的信道利用率对本地负载状态进行度量, SIN 中定义了两种确定本地负载等级 L_i 的算法:简单算法(SIMPLE)和公平共享算法(FS)。SIMPLE 算法可表示为:

$$\begin{cases} L_i \leftarrow \text{空闲, 若 } U_i < \text{信道空闲门限;} \\ L_i \leftarrow \text{饱和且群状态} \leftarrow \text{普通节点,} \\ \quad \text{若 } U_i > \rho_{\max} + \rho \text{ 或 } Q_i > \text{队列门限;} \\ L_i \leftarrow \text{中等负载, 其他} \end{cases}$$

其中 ρ_{\max} 为 IEEE 802.11 DCF 的最大吞吐率, ρ 为一个很小的安全保护边界。FS 算法的目的是对节点的发送概率进行限制使其低于优化发送概率(FS),其基本算法除了饱和点条件以外与 SIMPLE 相同:

$$L_i \leftarrow \text{饱和, 群状态} \leftarrow \text{普通节点, 如果 } U_i > \rho_{\max} + \rho \text{ 或 } Q_i > \text{队列门限或 } (N_i > 2 \text{ 且发送概率 } TX_i > TRANS_{\text{opt}}) \text{。其中 } N_i \text{ 为活跃邻居数, } TX_i \leftarrow \frac{\text{发送时间}}{\text{间隔周期}}, TRANS_{\text{opt}} \leftarrow \frac{1}{N_i * \sqrt{T_c/2}}$$

$$\text{碰撞持续时间 } T_c \leftarrow \text{碰撞率} * \frac{\text{间隔周期}}{\text{时隙长度}}, \text{碰撞率} \leftarrow \frac{\text{碰撞时间}}{\text{间隔周期}}, N_i \text{ 为共享同一信道的群首或网关数。}$$

SIN 主要目的是通过避免不必要的路由开销改善按需路由协议的可扩展性和吞吐率,该方案中各节点根据本地网络的负载状态和分群状态决定本节点是否作为新的分组转发路径的中间节点,从而以隐含的方式建立起负载均衡的路由。在轻负载情况下,每个节点无论处于什么分群状态都可成为中间节点并对路由信息进行转发以提供最短路径。如果本地负载强度中等,则路由方案根据分群结构采用一种有效的选择性洪泛机制,使得只有群首和网关才参与路由查询过程以减少路由开销,适应网络节点密度增大的情况,提高了可扩展能力。当本地网络已经饱和时,所有节点都拒绝成为新路由的中间节点以避免不必要的路由分组。

3.5 基于概率位置的负载均衡路由协议

在移动 ad hoc 网络中利用网络的时变拓扑特性来支持其 QoS 度量是一个挑战性问题。PLLB^[12] (Probabilistic Locality and Load Balancing) 是基于概率位置的负载均衡路由协议,它利用了一种简单的空间概率位置模型来提高现有按需路由算法的性能。PLLB 对以下两个问题分别设计了一个有效的解决方案:第一个问题是在给定路由中的每个主机节点可以位于其位置集合中的任意位置的条件,给定源和目的节点对之间的一条路由存在的可能性;第二个问题是在给定的源和目的节点对之间选择一条避开业务流瓶颈的最大概率路由。

3.6 自组网中的单径负载均衡路由协议比较

目前自组网中的单径负载均衡路由协议以基于负载感知的路由协议讨论最多,因此以下也主要针对负载感知的路由协议对该类协议进行分析。

(1) 负载感知方法比较 基于流的负载感知路由协议其负载由经过节点的路由数目来度量,由于不同路由的业务流大小不可能完全相同,因此该类协议不能较准确地计算出实际的流量负载。

基于分组的负载感知路由协议将缓存在接口中的分组数量作为网络负载,对负载的度量较基于流的负载感知路由协议更为细化,能够更为准确地反映网络的业务流量,但是该类协议没有考虑节点接口队列中缓存分组总数相同但负载分布不同时 MAC 层的接入竞争对网络性能的不同影响。例如,在邻居节点负载总和为 4 时,存在两个负载均为 2 的邻居节点和存在四个负载均为 1 的邻居节点的不同情况下,两者引入的竞争时延将是不一样的,但该类协议却将两者同等对待。

基于时延的负载感知路由协议重点考虑了 IEEE 802.11 DCF MAC 协议情况下的估计时延,以此来间接地反映节点的负载情况,克服了基于分组的负载感知路由协议中将从负载总和角度看来相同但却可能导致不同接入时延的不同情形做同等对待的缺陷。

基于本地信息的负载感知路由协议重点考虑了邻居节点间对共享信道的公平占用问题,从吞吐率的角度利用本地信息对负载等级进行划分,因此所依据的本地信息主要包括信道利用率、节点等待队列大小和活跃邻居节点数等,该类方案尽可能地使所有活跃邻居对信道的利用率相等,在一定程度上解决了公平性问题。

(2) 负载均衡方式比较 路由协议中对负载信息进行感知的目的主要是利用收集到的负载信息对网络业务流进行均衡,具体体现为在新路由的路由发现阶段避开拥塞的重负载节点选择路径,主要方法有:路由发现时禁止中间节点进行路由应答,以利用最新的负载信息;中间节点利用负载信息来决

定丢弃路由请求分组,实现呼叫准入控制,以避免重负载节点成为新路由的中间节点;重负载中间节点拒绝继续转发路由请求分组可以减少冗余发射带来的节点间干扰,提高系统性能;路由应答阶段目的节点利用负载信息可以在众多从源到目的节点的轻负载路径中选择最优负载的路由;路由维护阶

段源或目的节点可以利用负载信息选择负载均衡的新路由。

表1为上述路由协议特点的比较,其中的负载均衡方法 A 指路由发现时由目的节点选择轻负载路径,方法 B 指路由发现时由中间节点进行呼叫准入控制。

表1 基于负载感知的各负载均衡路由协议特点比较

	ABR	LBAR	DLAR	LSR	DOSPR	D-LAOR	LWR	SIN
分布式操作	是	是	是	是	是	是	是	是
无环路由	是	是	是	是	是	是	是	是
按需/主动	按需	按需	按需	按需	主动	按需	按需	按需
中间节点应答	允许	禁止	禁止	禁止	允许	禁止	允许	允许
呼叫准入控制	无	无	无	无	无	有	有	有
路由发现时负载信息的作用阶段	路由应答阶段	路由应答阶段	路由应答阶段	路由应答阶段	路由应答阶段	路由请求阶段 路由应答阶段	路由请求阶段	路由请求阶段
路由维护时利用负载信息进行的处理	局部查找	断链时由目的节点使用替代路由	拥塞时由目的节点发起路由重选过程	使用松弛路径比较函数调整	CSM 维护	拥塞时丢弃路由请求分组,断链时重新路由发现	拥塞时丢弃路由请求分组	拥塞时改变节点的群状态
负载均衡方法	方法 A	方法 A	方法 A	方法 A	方法 A	方法 A+B	方法 B	方法 B

4 自组网中的多径负载均衡路由协议

采用多径路由可获得比单径路由更好的网络吞吐率和可伸缩性,该问题在有线网络中已有详尽地研究,但在自组网中目前研究还不多,提出的协议比较少。多径路由协议通过将业务流分配到一系列不同路径上传送的方式实现负载均衡,且可通过冗余路由增加网络的可靠性和顽存性。但是,同一对端节点之间的多条路径在地理位置上的邻近将导致路由耦合的出现,使得在有线网络中采用多径路由进行负载均衡所具有的优势难以在自组网中很好实现。在多信道网络中,当不同路径经过相同中间节点时将发生耦合。在单信道网络中耦合问题更为严重,只要一条路径经过另一条路径的无线覆盖区域就会产生耦合。而且,路由协议无法全面掌握网络的当前连接性将加重网络潜在的路由耦合。因此,多径路由协议的研究主要集中在两个方面:构建代价最小的低耦合多路径路由集合即“K 条最优路径问题”;在建立的多条路由间进行业务流分配以实现负载均衡。

大多数解决“K 条最优路径问题”的算法都侧重于构建不相交的最小代价路径集合,但不相交的路径多数情况下是不存在的,即使存在也可能包含很长的路径,在对路径长度进行限制的情况下可获得一些具有可接受代价和重叠路径数最小化的多条替代路径。采用控制策略在多条路径之间对分组数据流进行优化分配以减少路由延迟时,需要重点考虑路由转换频率问题。从网络层的角度看,随着路由转换频率的增加,基于每个分组的业务流分配的最优策略将使网络的端到端吞吐量性能随之改善。但是,基于每个分组粒度进行路由转换可能导致分组错序递交,使 TCP 误解为发生了网络拥塞,且分组重新排序会产生额外的时延。

4.1 自组网中的多径负载均衡路由协议及方法描述

(1) APR^[2]。主动路由协议能够为网络中的每个节点提供完整而及时的网络连接性信息,节点可根据该信息找出网络中存在的最好替代路径,但在节点移动性高的自组网中跟踪网络连接性的变化,其开销很大。按需路由协议通常只能获得部分网络连接性信息,难以提供低耦合的最佳多径路由。文

[2]中采用“多样化注入”的方式在不产生额外路由应答的情况下对按需路由协议的报告能力进行扩展,提高 APR(Alternate Path Routing)路由的多样化性能,减少多径路由之间耦合。在路由查询阶段,节点暂时缓存前一跳节点的 ID 和本节点收到的所有查询分组所经过的跳数。在应答阶段,利用缓存的路径信息使应答分组沿着更为多样化的路径返回源节点,即应答分组通过节点所缓存的所有路径中很少被选择的最短无环路径进行中继,从而使路由发现完成以后产生的多径路由之间的耦合尽可能低。

(2) MSR(Multipath Source Routing)^[13]。基于排队理论建立网络模型,根据背景业务对负载在多径路由中的分配的影响进行负载均衡。MSR 通过路径探测机制验证路径的有效性,定期向每条路径发送探测分组,测量往返时间 RTT,用 Karn 算法估计路径时延。路径时延是反映路径性能的重要参数,一定意义上代表了路径拥塞程度。根据路径时延分配网络业务,实现网络系统中总时延最小。

设第 k 条路径负载分配权重为 $W_k(k=1,2,\dots,N)$,多径负载均衡算法为: $W_k = \min(\lceil \frac{d_{max}}{d_k} \rceil, U) \times R$, 其中, d_k 为第 k 条路径的平均时延, d_{max} 为 N 条路径中的最大平均时延。 U 为 W_k 取值的上限,防止 W_k 取值太大,因为一条路径上过量分配负载而使多径退化成单径,起不到负载均衡的效果。 R 用来控制每条路径上的负载分配粒度, R 越大,单条路径一次分配到的负载越多,多条路径之间的切换频率越低,因而乱序的可能性越小。在多条路径上分配负载时,采用轮循调度算法。

(3) MRP-LB (Multi-path Routing Protocol with Load Balancing policy)^[14]。认为 MSR 中的 RTT 不能正确反映一条链路的负载,难以获得满意的负载平衡条件,因此 MRP-LB 通过在分组级分配业务流均匀地将负载分配到多条路径中,使每条路由中拥塞分组的总数相等。

在 MRP-LB 的路由发现阶段,每个转发节点对每个源—目的节点对之间的路由请求分组仅转发一次,目的节点用 N_s 个路由应答分组对最早到达的 N_s 个路由请求分组进行应答以获得期望的 N_s 条路由。路由应答分组在由目的节点按照

与路由请求分组相反的路径向源节点发送的过程中收集所经过的各中间节点的拥塞分组数,使源节点获得 N 条互不相连的无环路及各路由的拥塞分组总数。路由建立后,源节点以源路由的方式通过建立的 N 条路由向目的节点发送数据分组, N 条路径中数据分组的分配按照使每条路由中拥塞分组总数相等的方式进行分配,每个源节点记录向每条路由中发送的分组数。为保证源节点能及时了解各路由中的最新负载信息,目的节点周期性向源节点发送负载分组,通过负载分组收集从目的节点到源节点的路由中各中间节点的拥塞情况向源节点提供最新的负载信息。

(4) SBPMR (link Stability, loading Balance and Power control based Multi-path Routing)^[15]。基于代价计算进行路由发现和路由维护,以建立可靠、负载均衡的多径路由。SBPMR 根据 GPS 确定主机的位置和移动速度,通过在邻居节点间交换节点信息以确定主机的下一位置,从而获得确定主机发射范围内影响链路稳定性的生存时间 TTL 值。SBPMR 采用与 LBAR 类似的方法进行负载均衡,保证每个源和目的节点对之间的路由路径数不超过三个,以降低单径情况下路由中断时进行路由重选的开销,其多径路由通过修改 AODV 获得。SBPMR 采用基于节点间距离的功率控制策略,可以降低功率消耗,延长主机操作时间。

4.2 自组网中多径负载均衡路由协议的特点比较

现有的几种自组网多径负载均衡路由协议都主要针对低耦合多径路由的产生和在多径路由中均衡分配负载的方法进行研究,不过各有侧重。APR 主要针对多径路由中的路由耦合问题,MSR 主要考虑如何根据 RTT 在多径路由之间均衡分配业务流的问题,MRP-LB 主要针对 RTT 在多径路由之间分配业务流的缺陷,采用分组总数作为分配准则的均衡方法进行研究,SBPMR 则采用经过各中间节点的路径数作为业务流分配准则的均衡方法。

5 需要进一步研究的问题

迄今为止,自组网中各种基于负载感知的单径负载均衡路由协议都分别针对不同的应用有所侧重的对负载感知方法和负载判决准则进行研究,如 LBAR 主要针对网络延迟要求较高的时延敏感应用,LWR 主要考虑在网络节点密度大、负载重的情况下仍然能保证网络性能的稳定,SIN 主要针对路由开销对路由协议的可扩展性和吞吐率影响进行研究,D-LAOR 主要考虑时延敏感的应用。如何综合考虑各种协议在不同应用中的性能特点和独特优势,设计能够适应多种要求的负载均衡路由协议是需要进一步研究的问题。

为了利用最新的负载信息,多数负载感知路由协议不采用中间节点应答路由请求,虽然可以通过重负载中间节点拒绝继续转发路由请求分组的方法减少一定的冗余发射,但仍然会造成请求分组的洪泛开销,尤其是拓扑变化比较频繁的情况下。因此,如何在保证路由稳健性的前提下设计节点的负载拥塞门限以尽量减少该类控制开销也是需要进一步考虑的问题。

另外,在多径路由协议中,针对路由稳健性的基于负载感知的替代路由方法、为保证 QoS 要求而采用的根据负载信息在多条路径之间进行业务流调度的方法、降低路由间耦合的方法,以及如何在协议设计时综合考虑上述三个问题都需要

进一步深入研究。

结束语 本文综述了自组网路由协议中占重要地位的负载均衡路由协议的研究。由于自组网的竞争共享信道方式、有限的无线传输带宽和动态变化的网络拓扑结构等特点为自组网路由协议的设计带来了一些新的问题,需要重新根据网络的应用等特点考虑网络的拥塞和负载均衡问题。文中详细地描述了具有代表性的自组网负载均衡路由协议,分析比较了各自的设计思路和方法,并提出了需要深入研究的问题,有待于对该类协议做进一步的研究和完善。

参考文献

- 1 IETF. Mobile ad hoc networks charter [EB/OL]. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>,2003
- 2 Pearlman M R,Haas Z J,Sholander P,et al. On the impact of alternate path routing for load balancing in mobile ad hoc networks [A]. In: 2000 First Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing[C], Aug. 2000. 3~10
- 3 Toh C K. Associativity-Based Routing for Ad-hoc Mobile Networks [J]. Wireless Personal Communications Journal, 1997, 4 (2):103~139
- 4 Zhou A, Hassanein H. Load-balanced wireless ad hoc routing [A]. In: Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering [C],2001,2:1157~1161
- 5 Lee Sung-Ju, Gerla Mario. Dynamic Load-Aware Routing in Ad Hoc Networks [A]. ICC 2001. In: IEEE Intl. Conf. on Communications [C]. June 2001, 10:3206~3210
- 6 Wu K, Harms J. Load-sensitive routing for mobile ad hoc networks [A]. In: Tenth Intl. Conf. on Computer Communications and Networks Proc. [C], Oct. 2001. 540~546
- 7 Sheu Shiann-Tsong, Chen Jenhui. A novel delay-oriented shortest path routing protocol for mobile ad hoc networks [A]. In: IEEE Intl. Conf. on Communications [C], 2001, 6:1930~1934
- 8 Song Joo-Han, Wong V, Leung V C M. Load-aware on-demand routing (laor) protocol for mobile ad hoc networks [A]. In: The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conf. [C], 2003, 3: 1753~1757
- 9 Yi Yunjung, Kwon T J, Gerla M. A load aware routing (LWR) based on local information [A]. In: IEEE Intl. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications [C], 2001, 2: G-65~G-69
- 10 Yi Yunjung, Gerla M, Kwon T J. The selective intermediate nodes scheme for ad hoc on-demand routing protocols [A]. In: IEEE Intl. Conf. on Communications [C], 2002, 5: 3191~3196
- 11 Cali F, Conti M, Gregori E. IEEE 802.11 wireless LAN: capacity analysis and protocol enhancement [A]. In: INFOCOM '98. Seventeenth Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies [C]. 1998, 1:142~149
- 12 Elmallah E S, Hassanein H S, AboElFotouh H M. Supporting QoS routing in mobile ad hoc networks using probabilistic locality and load balancing [A]. GLOBECOM '01, 2001, 5: 2901~2906
- 13 Zhang Linfang, Zhao Zenghua, Shu Yantai, et al. Load balancing of multipath source routing in ad hoc networks [A]. In: IEEE Intl. Conf. on Communications [C], 2002, 5: 3197~3201
- 14 Pham P, Perreau S. Multi-path routing protocol with load balancing policy in mobile ad hoc network [A]. In: 4th Intl. Workshop on Mobile and Wireless Communications Network [C], Sept. 2002. 48~52
- 15 Hwang I-Shyan, Yeh Cheng-Ching, Wang Chiung-Ying. Link stability, loading balance and power control based multi-path routing (SBPMR) algorithm in ad hoc wireless networks [A]. In: 10th Intl. Conf. on Telecommunications [C], 2003, 1: 406~413