

自组网中一种基于跨层负载感知的按需负载均衡路由^{*})

郑相全^{1,2} 郭伟¹ 葛利嘉²

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)¹ (重庆通信学院 重庆 400035)²

摘要 本文提出了一种新的基于跨层负载感知的自组网负载均衡路由协议(CELLOR)。CELLOR在路由发现阶段和路由维护阶段将整个路径中各节点MAC层的总平均估计时延和路径总业务流负载结合起来共同作为路由选择和路由调整的重要依据,以实现网络业务流的均衡分布和均衡传输。协议通过禁止中间节点对路由请求进行应答和阻止不必要的路由请求分组经由重负载的中间节点转发,以保证路由发现时能够利用最新的负载信息,并避免了节点在重负载情况下成为新建路由的中间节点,使得协议具有一定的拥塞控制功能,以间接的方式实现了请求接纳控制。通过上述措施,可以很好地避免网络中出现拥塞节点,减少了网络瓶颈对网络性能的影响。仿真表明,CELLOR在分组丢失率、平均端到端时延和路由附加开销等方面具有良好的性能,其优良的分布式控制特征能适应自组网的动态环境。

关键词 自组网,负载感知,拥塞控制,负载均衡,按需路由算法

A Novel Cross-layer Load-aware Based Load-balanced On-demand Routing for Ad-hoc Networks (CELLOR)

ZHENG Xiang-Quan^{1,2} GUO Wei¹ GE Li-Jia²

(National Key Laboratory of Communication, UEST of China, Chengdu 610054)¹ (Chongqing Communication College, Chongqing 400035)²

Abstract This paper presents a novel dynamic load-aware based load-balanced On-demand routing (CELLOR) algorithm for ad hoc networks. In order to balanced distribute the traffic loads in network, CELLOR combines the total path average estimated delay with the total path traffic loads as the primary metric for route selection and route adjustment during the route discovery and route maintenance periods. At the same time, protocol makes use of the updated load information during the route discovery period by forbidding the intermediate nodes to reply the route request packets and allow the heavy load nodes to be the intermediate nodes of new routes by preventing the heavy load nodes from forwarding the route request packets, which can endue the protocol with capability of congestion control and admission control. With the above properties, the protocol presented in the article can bring down the congested nodes and bottlenecks in the networks, and improve the network performance. By presenting and analyzing simulation results, the CELLOR is shown to result in good performance of packet delivery ratio, average end-to-end delay and routing overhead, while exhibiting many attractive features of distributed control to adapt to the dynamic ad hoc networks.

Keywords Ad hoc networks, Load aware, Congestion control, Load balance, On-demand routing algorithm

1 引言

自组网(ad hoc networks)^[1]是一种移动通信和计算机网络相结合的网络,网络中的终端节点在网络中可任意移动、自由加入和退出,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。由于自组网的特殊组织形式,固定网络和有线中心无线网络(如蜂窝网)的很多协议无法直接被它采用,因而需要设计专门适用于自组网的协议。其中,路由协议是自组网设计、研究的主要技术难点之一,网络的性能如吞吐量、容量及时延等都依赖于所采用的路由协议,其设计目标是快速、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路由协议的开销,以满足移动终端在计算能力、储存空间以及电源等方面的限制。

自组网中现有的路由协议可分为主动路由和按需路由两

大类。针对自组网特点对适合于常规有线网络的主动路由协议进行修改而得到的协议在应用于自组网时仍然存在着诸多缺陷,如控制信息分组的周期性广播和复杂的路由表维护会大量消耗有限的网络带宽和移动终端的资源,拓扑结构的快速变化会使很多路由信息很快过时而造成资源的浪费等。采用按需路由协议的节点仅当需要建立路由时才会发出路由建立请求,在路由请求和维护不频繁的情况下,比传统的主动路由方案具有更低的路由开销、更高的分组成功递交率和运行效率,更能适应自组网拓扑的频繁变化和有效地利用有限的带宽资源和电池能源。但是按需路由方案的控制开销随节点的地理分布密度和业务流强度的增加而增加,使得在业务流负载增加时协议的控制开销难以控制,导致可扩展性能的恶化。在大多数按需方案中,拥塞导致的路由信息丢失将很快触发更多路由请求和路由维护等控制分组的产生,从而进一步加重网络拥塞。由于控制分组通常比数据分组具有更高的优先级,更多路由控制分组的传输将进一步加剧网络中正在传输的数据分组被丢弃,即按需路由在高业务流负载网络中将出现功能性故障。事实上,为了避免网络饱和,在很多文献中对按需路由的验证都采用低负载。

^{*}国家自然科学基金(No. 60472052)、重庆市科技计划项目(No. 8030)和通信抗干扰技术国家级重点实验室基金(No. 51434020101ZS0404和No. 51434040103ZS0401)资助。郑相全 博士研究生,主要研究方向是自组网技术、软件无线电组网技术等。郭伟 博士生导师,主要从事网络优化设计及仿真技术、网络可靠性、自组网技术、信号检测与处理技术等方面的研究。

上述问题产生的根本原因在于,现有大多数自组网路由协议都没有考虑在网络中各移动节点之间均衡地分配路由任务,其运行的结果都是使产生的众多路由经过一部分处于网络中心位置的节点,这样,非均衡的数据业务流分配将快速耗尽重负载节点的电能,缩短了网络的总体生存时间。随着电能耗尽节点的增加,网络的连接性将随之减弱而出现网络分裂,最终导致路由请求和数据传输失败。另外,担负大量路由重任的节点也将产生很大的排队等待时延和很高的分组丢失率,导致网络拥塞和瓶颈的出现,使得以这些节点为中间节点的路由连接的端到端时延和分组丢失率都将增大,如典型的按需路由协议 AODV^[2] 和 DSR^[3] 的分组传输时延随着节点移动性的降低反而呈上升趋势^[4]。解决功率和带宽受限的自组网中存在的上述问题的方法之一,就是在自组网路由协议的设计中考虑网络中各节点的负载和拥塞情况,在路由选择过程中根据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,网络的分组丢失率、端到端的分组传输时延、网络总吞吐率和附加开销等综合性能达到最优,从而为业务提供更好的 QoS 保证。负载均衡在本质上就是利用分组传输可能存在的多条路径构建分组路由,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,在网络中对动态变化的负载进行成功传输^[5]。评价网络性能的指标主要是吞吐率和网络传输时延^[6],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。

另外,现有的主动和按需路由协议在解决路由问题时大都按照典型的分层体系结构进行设计,没有综合考虑不同协议层之间在感知的业务流负载等信息方面的高效共享和相互影响问题。网络分层协议的产生主要源于链路的传送费用相对于器件的处理费用要便宜得多,所以最大限度地降低路由器处理的费用是当时必然的要求,通过增加对等层之间的通信量,降低路由器层与层之间的处理开销和信息交互,其优点是层与层之间的共享度低,层次明显,协议设计简单。随着器件水平的发展,从处理速度、存储容量到器件的体积和功耗都有质的飞跃。分层结构设计方式产生的大量难以控制的链路开销将消耗大量的有限频谱资源和节点能量,加之安全性要求,链路的信息冗余度要求很高,使得频率资源更加紧张,所以最大限度地降低通信开销则成为了当今自组网设计的一个首要问题。因此,有必要针对自组网特殊的网络局限,采用基于跨层设计^[7~10]的组网方法,综合考虑各网络协议层之间的信息对网络业务负载进行均衡,以便在减少链路开销的同时充分利用网络资源,使网络保持连续、高效、稳定的运行,网络综合性能达到最优。

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,根据源节点和目的节点之间的路由采用的路径数可分为单径路由协议和多径路由协议,前者将业务流通过一条路由进行传输,后者则将业务流分配到多条路由上同时传输,两者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,通过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。由于业务流的均衡分布,网络拥塞得到缓解,网络的吞吐率和时延性能提高,同时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。由于在多径路由协议中,针对路由稳健性的基于负载感知的替代路由问题^[11]、为保证 QoS 要求而在多条路径之间进行业务流调度的

问题^[12]、路由间的耦合问题^[13]等对于自组网环境而言都是值得深入研究的技术问题,不过涉及的方法较复杂,因此本文主要讨论单径路由协议。

2 自组网中的单径负载均衡路由协议研究现状

自组网中现有的各种单径负载均衡路由协议分别采用不同的方法对网络负载强度状态进行映射,并利用感知的负载强度信息从不同的角度作为路由选择的重要因素,以实现网络业务流在网络中的均衡分布和均衡传输,即负载均衡路由协议通常由负载感知和负载均衡两个方面组成,对负载信息感知的准确程度将影响协议进行负载均衡的效果。

根据对负载进行感知时采用的不同计算方法可将单径的基于负载感知的负载均衡路由协议分为基于流的负载感知路由协议、基于分组的负载感知路由协议、基于时延的负载感知路由协议和基于本地信息的负载感知路由协议四类^[14]。基于流的负载感知路由协议中由经过节点的路由数(如 ABR^[15])或经过节点及其邻居的路由数(如 LBAR^[16])来间接度量节点的业务流负载,后者考虑了自组网无线信道的广播特性,较前者能更细致地反映自组网应用环境的特性。由于不同路由对应的会话不可能具有完全相同的业务流负载强度,因此该类协议不能较准确地反映实际的网络业务流负载。基于分组的负载感知路由协议使用节点 MAC 层接口队列中(如 DLAR^[17])或节点及其邻居节点的 MAC 层接口队列中缓存分组的总和(如 LSR^[18])作为网络负载,后者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,即节点的网络负载包括节点的本地负载和该节点的邻居节点的负载。基于分组的负载感知路由协议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 MAC 层接口队列中缓存分组总数相同但负载分布不相同 MAC 层的接入竞争对网络性能的不同影响。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,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,如 DOSPR^[19] 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^[20] 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。基于本地信息的负载感知路由协议侧重于邻居节点间对共享信道的公平占用问题,从吞吐率的角度根据信道利用率、缓存队列大小、活跃邻居节点数、回退定时器的值(如 LWR^[21])或节点的分群状态(如 SIN^[22])等本地信息来确定负载轻重等级,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。可见,基于时延进行负载感知较基于缓存分组数的方法更能细致全面地反映自组网环境下的负载情况。在对底层资源占用的公平性方面,基于本地信息的负载感知方式则具有更好的性能表现,但该类协议计算比较繁杂。

上述各种路由协议都有其特定的适用范围和先决条件,在其假定的条件下具有最优性能表现,在其它应用环境中则表现出一定的缺陷和不足,相应的有其自身的局限性^[23]。即上述各种基于负载感知的单径负载均衡路由协议都是分别针对不同的应用各有侧重的采用不同的负载感知方法和负载判决准则,负载感知的目的主要是针对不同的应用场景利用收集到的负载信息对网络业务流进行均衡,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。因此, 上述协议分别存在不同的应用缺陷, 如在共享竞争信道情况下对路径业务流负载的准确映射问题^[15~18], 中间节点对包含更优路径的复制 RREQ 分组进行转发带来难以控制的附加控制开销问题^[20], 统计本地负载信息的计算复杂度问题^[21, 22]等。

基于上述分析, 本文提出了一种基于跨层负载感知的按需单径负载均衡路由方案 (CLLOR), 采取按需方式进行路由发现和维护, 网络负载信息的感知基于 MAC 层的时延和节点中缓存队列的大小等本地信息进行映射。协议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在路由发现和数据传输期间高效地发现更好路径, 把路由选择的计算开销分配给源节点到目的节点之间的所有中间节点, 可缩短路由发现阶段和断链、拥塞时路由调整的响应时间。协议通过避开拥塞路径使网络负载趋于平衡, 实现网络负载均衡和减少端到端延迟, 对网络拓扑的动态变化、高业务流负载强度和节点分布密度具有良好的适应能力, 提高了网络的健壮性和扩展能力。在路由维护期间, 协议能够根据一条活跃路径的初始状态, 在该活跃路径变得拥塞时动态地搜索更好的路径, 利用负载信息对协议性能进行调整。协议能够很好地支持节点的移动性和适应网络业务流强度的变化, 具有很强的环境适应能力和广泛应用前景, 如可应用为我军无线通信装备的组网自动化^[24~26]。

3 CLLOR 路由协议描述

3.1 协议设计思想

基于跨层负载感知的按需负载均衡路由协议 (CLLOR) 的主要设计思想是采取按需的方式在路由发现和路由维护阶段通过对 MAC 层的处理时延和队列中缓存的分组数情况进行统计, 得到整个路径的 MAC 层总平均估计时延和路径总业务流负载, 并将该信息跨层共享作为网络层路由判断和选择的依据。整个路径的 MAC 层总平均估计时延表征路径中节点对业务流负载的处理速度, 路径总业务流负载反映路径中业务流负载强度, 两者结合共同表征网络业务流负载在网络中的均衡传输和均衡分布状况。节点无数据传输时无需维护路由表, 也无需在邻居节点间周期性交换负载信息。

在路由发现阶段, 为了利用最新感知的负载信息, 协议禁止中间节点对路由请求进行应答。为降低冗余路由控制分组的发射导致的干扰对网络整体性能的影响, 在新路由选择时各节点根据感知的本地负载信息状态决定是否继续对请求分组进行转发, 通过阻止不必要的路由请求分组经由重负载的中间节点转发, 避免了本节点在重负载情况下成为新建路由的中间节点, 使得协议具有一定的拥塞控制功能, 以间接的方式实现了准入控制。中间节点在收到来自不同路径的多个复制路由请求时, 对收到的各请求分组中包含的路径信息进行缓存, 直到缓存信息超时或收到路由应答分组后才予以释放。目的节点在收到路由请求分组后, 利用路由请求分组中的反向路径信息向源节点发送路由应答消息, 而不需要等待所有可能的路径, 使得源节点可以快速得到路由信息并进行数据分组的传输。中间节点在收到路由应答分组后, 路由应答分组中由当前中间节点到源节点的剩余路径将由节点中缓存的到源节点代价最优且不会形成环路的路径所替换, 同时本节点将从收到的多个来自不同路径的路由应答分组中包含的到

目的节点的路径中选择最优路径进行记录, 以便数据分组可以选择到目的节点代价最优的路径进行传输。

路由维护阶段, 目的节点对数据传输的活跃路径的负载状态进行监测, 通过路径比较函数对路径的优劣状况进行判断, 在当前活跃路径恶化到一定程度后发起路由调整过程以选择新的负载状态更好的路径进行后续数据的传输。

3.1.1 负载信息感知及负载状态判断 对本地时延的测量可按照如下方法进行: 每个移动节点监视 MAC 层接口队列, 在收到每个分组后都要对节点的平均估计时延进行计算。设 a_i, s_i 分别表示 i^{th} 分组到达节点 k 和被节点 k 成功发送时间, 则 i^{th} 分组成功发送后, 节点 k 的平均估计时延值 d_i^k (包括排队、竞争和发送时延, 传播时延假定可忽略) 为^[20]:

$$d_i^k = (1 - \lambda) d_{i-1}^k + \lambda (s_i - a_i), i > 1 \text{ 且加权平滑参数 } \lambda \text{ 满足 } 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (1)$$

从节点 1 到 n 的无环路径 $P(n) = \langle 1, \dots, k, \dots, n \rangle$ 的路径总平均估计时延 $D_p(n)$ 和节点平均估计时延 $\overline{D_p(n)}$ 分别为:

$$D_p(n) = \sum_{k=1}^n d^k \quad (d^k \text{ 为节点 } k \text{ 在路由发现时的平均估计时延}) \quad (2)$$

$$\overline{D_p(n)} = \frac{D_p(n)}{n} \quad (3)$$

如果假设 $L_p(n)$ 表示路径 $P(n) = \langle 1, \dots, k, \dots, n \rangle$ 的业务流总负载, $L(k)$ 为每个节点 $k (1 \leq k \leq n)$ 维护的业务流负载, 即节点 k 的 MAC 层接口队列中缓存的分组数, 则

$$L_p(n) = \sum_{k=1}^n L(k) \quad (4)$$

设节点 k 的 MAC 层接口队列中当前缓存的分组数为 $L(k)$, 节点 k 的 MAC 层接口队列缓存容量为 $C(k)$, 则节点 k 的 MAC 层接口队列的当前占用率为:

$$\eta = L(k)/C(k) \quad (5)$$

给定无环路径 $P(n) = \langle 1, \dots, k, \dots, n \rangle$ 以及任意节点 $k (k \in P(n), 2 \leq k \leq n)$, 节点负载状态的判断可以通过如下方式进行:

$$\begin{cases} \text{节点 } k \text{ 相对路径 } P(n) \text{ 处于拥塞状态, 若 } (d^k \geq \frac{D_p(k-1)}{C(k-1)}) \cap (\eta \geq \Gamma) \\ \text{节点 } k \text{ 相对路径 } P(n) \text{ 处于可接纳状态 其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中拥塞门限参数 $\Gamma \in (0, 1)$ 。可见, 对节点负载状态的判断有两个条件: 本节点估计时延与路径中节点的平均估计时延的可比性条件反映本节点对业务流负载的处理速度、处理能力和占用共享信道的公平性问题; 节点 MAC 层接口队列缓存容量的占用百分比条件反映本节点的业务流强度及本节点 MAC 层接口队列还可接纳的分组容量。上述两个条件共同作用, 反映了节点对后续路由请求的接纳能力。

3.1.2 负载均衡规则 为实现 CLLOR 算法, 定义以下操作规则:

规则 1 请求接纳规则。在进行路由发现时需要由路由请求实行接纳控制, 即每个收到路由请求的节点 $k (2 \leq k \leq n)$ 需要对本节点的业务流负载强度及对业务流负载的处理能力进行判断, 并根据判断结果采取不同的措施: 当节点 k 相对所收到的请求分组中包含的路径处于拥塞状态时, 丢弃所收到的路由请求分组; 当节点 k 相对所收到的请求分组中包含的路径处于可接纳状态时, 对所收到的路由请求分组进行修改并继续转发。

规则 2 路径比较规则。在路由发现和路由维护阶段进行路由选择或重选时基于整个路径总的平均估计时延和路径

业务流总负载确定最优路径,其判断准则可通过路径比较函数 $C(A, B)$ (A, B 为两条路径) 实现。在 $C(A, B)$ 中, 采用 D_P 作为主要的比较判别准则, L_P 作为辅助的判别准则, 节点获得路径负载信息的时刻 t_P 作为参考准则。 D_P 反映了所考查的路径在考虑了邻居干扰环境的情况下对于数据分组的处理速度, L_P 反映了所考查路径的路径业务流负载强度。路径比较函数定义如下:

$$C(A, B) = \begin{cases} -1, ((D_A = D_B = 0) \cap (L_A = L_B) \cap (t_A > t_B)) \cup ((D_A = D_B = 0) \cap (L_A > L_B)) \cup ((D_A > 0) \cap (D_B = 0)) \\ 1, ((D_A = D_B = 0) \cap (L_A = L_B) \cap (t_A < t_B)) \cup ((D_A = D_B = 0) \cap (L_A < L_B)) \cup ((D_A = 0) \cap (D_B > 0)) \end{cases} \quad (7a)$$

否则

$$C(A, B) = \begin{cases} -1, \text{若 } (D_A > D_B * (1 + \alpha)) \cup ((|D_A - D_B| \leq D_B * \alpha) \cap (L_A > L_B * (1 + \beta))) \\ 0, \text{若 } (|D_A - D_B| \leq D_A * \alpha) \cap (L_A \leq L_B * (1 + \beta)) \\ 1, \text{其他} \end{cases} \quad (7b)$$

假定网络中任意节点在某一时刻最多只能成功接收一个分组(多于一个分组时将由于共享信道中的竞争冲突而无法正确接收), 则任意节点从接收到的分组中获得路径负载信息的时刻将互不相同, 如(7a)式中不可能出现 $t_A = t_B$ 。因此, 当 D_A, D_B, L_A 和 L_B 中至少有一个取值为 0 时, 可以通过(7a)式对路径的优劣进行比较, 且不会出现两条路径负载状况相同的情况, 该规则可以优化网络初始化完成后进行数据传输前的路由发现中的路径选择问题。在 D_A, D_B, L_A 和 L_B 取值均大于 0 时, 如果 D_A 比 D_B 至少大 α 倍, 或者 D_A 虽然大于 D_B 不超过 α 倍但 L_A 比 L_B 至少大 β 倍, 那么可以认为路径 B 优于路径 A, 用 $C(A, B) = -1$ 表示。当 $C(A, B) = 0$ 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。 $C(A, B) = 1$ 表示路径 A 优于路径 B。

采用参数 α 和 β 可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, 直接影响选路的收敛时间。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, 协议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。在路由自适应维护阶段, 协议根据网络负载信息对正在传输数据的活跃路由进行状态判断, 在同一活跃路由的当前路径负载信息比初始路径负载信息远为恶劣时, 通过路由调整过程重新选择一条新的更好路径以避免网络中可能出现拥塞的节点。为了判断当前路径是否变得很差, 协议根据路径负载信息分别采用严格或松弛的路径比较函数, 在这两种不同情况下参数 α 和 β 的取值就成为是否启动路由的自适应调整的门槛值。

3.2 协议操作方法及步骤

3.2.1 路由发现 当源节点需要和另一节点进行通信且没有到目的节点的有效路由可使用时, 协议通过对路由请求分组(RREQ)进行广播的方式发起路由发现过程。RREQ 消息携带有源节点和目的节点地址、初始化为 0 且每次递

加 1 的序列号、RREQ 所经过路径中包含的节点序列和路径负载信息。路径负载信息包括通过式(2)和(4)进行计算得到的路径总平均估计时延 D_p 和该路径的业务流总负载 L_p 。收到 RREQ 消息的各中间节点将对本节点的负载强度状态进行判断, 并按照规则 1 进行接纳控制。拥塞节点通过丢弃 RREQ 而防止本节点成为新路径的中间节点, 使产生的路由在避开拥塞节点的同时减少了拥塞节点转发 RREQ 带来的附加控制开销。非拥塞状态的中间节点在收到第一个 RREQ 时, 对 RREQ 中携带的节点序列和相应路径的负载信息进行处理。之后, 再将本节点的 ID 号和节点负载信息添加到 RREQ 的相应域以实现 RREQ 的更新, 并将更新后的 RREQ 再次向目的节点广播。源节点和目的节点地址、序列号相同的两个 RREQ 被认为是同一个 RREQ 分组, 中间节点将后续重复收到的 RREQ 中携带的路径与本节点中缓存的路径按照规则 2 中的(7a)和(7b)式进行比较, 以决定是否对节点记录的路径和负载信息进行更新, 从而保证节点只记录一条到同一个源节点的代价最优路径。为了减少广播路由请求带来的开销, 中间节点对于后续到达的重复 RREQ 不再继续向目的节点广播。为了利用最新的路径负载信息和使经过网络中各节点的重叠路由尽可能少, 协议不允许任何中间节点对 RREQ 进行应答, 因为中间节点对当前本节点到目的节点的路径负载信息的记录可能不准确。

目的节点收到 RREQ 以后, 利用 RREQ 中的反向路径信息以单播的方式向源节点发送路由请求应答(RREP)。由于目的节点并不等待所有可能的路由, 使得源节点可以快速得到路由信息并对呼叫的连接请求进行应答。协议让目的节点对收到的所有 RREQ 进行应答以便为断链提供冗余路径, 使源节点有更多的路由选择。RREP 在返回源节点的过程中要对路径负载信息重新进行计算。

一方面, 当一个中间节点收到 RREP 分组时, RREP 中到源节点的剩余路径将被缓存在本节点中的具有更好路径负载信息且不会形成环路的路径所替换。否则, 如果节点没有到源节点的最优路径或是替代路径后有环路存在, 则直接按照 RREP 中包含的路径对 RREP 继续进行转发。通过比较节点中缓存的到源节点的路径所包含的节点 ID 号和收到的 RREP 所携带的节点序列, 当节点记录和 RREP 的节点序列包含相同节点时将相应的 RREP 丢弃, 就可以实现对环路的检测和保证所选择的路由无环。另外一方面, 当中间节点收到 RREP 分组时, 还会更新本节点到目的节点的路由, 包含沿途所经过各节点的 ID 号序列。对于来自不同路径的后续到达的同一序列号的重复 RREP, 节点将根据规则 2 中的(7a)(7b)式采用严格比较函数确定是否用后续 RREP 中包含的路径信息更新本节点到目的节点的路径信息, 以保证节点到目的节点具有代价最优路径。

源节点首次收到 RREP 时, 将立即使用包含在该 RREP 中的路径对分组进行转发, 同时记录包含在该 RREP 中的路径负载信息。如果后续到达的 RREP 中包含了一个更好的负载路径信息, 源节点将会把业务流转移到新获的路径上并更新其路径负载信息。源节点对最好路径的选择采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。中间节点在收到数据分组后, 数据分组到目的节点的剩余路径将被缓存在本节点中的具有更好路径负载信息且不会形成环路的路径所替换, 如果节点没有到目的节点的更优路径或是替代路径后有环路存在, 则直接按照数据分组中包含的路径继续对数据分组进行转发。

3.2.2 路由的自适应维护 在路由维护阶段,协议根据网络负载信息动态地选择活跃路由,自适应策略主要是基于一条活跃路径的初始状态和当前状态。当正在使用的路径变得拥塞时,协议尽力去寻找一条负载更轻的路径,源节点在更好的路径找到以前仍然采用该拥塞的路径发送分组。

数据分组在由源节点到目的节点的传输过程中,将对所经过路径的负载进行计算。目的节点在收到第一个沿所选择的最优路径转发的分组时,将该分组中所携带的路径负载信息记录下来,作为对应该路径的初始负载信息。当由同一个源节点沿同一条路径转发来的后续数据中携带的路径负载信息比目的节点中记录的初始路径负载信息远为恶劣时,目的节点可以推测出网络可能出现了拥塞而需要选择一条新的更好路径。由于是对同一条路径进行比较,为了保证算法的稳定性,使算法在低负载时仍然能够有效运行,规定在目的节点记录的初始路径负载信息中,只要表征路径负载强度的参数 D_p 和 L_p 中有任意一个为 0 时,就必须用后续数据分组中携带的路径负载信息替换目的节点中记录的初始路径负载信息。当 D_p 和 L_p 两个参数均大于 0 时,协议采用松弛路径比较函数对路径状态进行比较和确定是否启动路由由自适应调整过程,此时参数 α 和 β 的取值就成为是否启动的关键门限值。

当传输数据分组的路径的当前状态比目的节点中所记录的初始状态远远恶劣时,目的节点就发起路由的自适应调整过程,通过广播一个路由调整消息(RADJ)以搜索到源节点的路由。RADJ 采用与 RREQ 相同的方式对路径负载进行计算,且携带了目的节点最后收到的数据分组所携带的路径负载信息。源节点收到 RADJ 后,使用(7b)式的松弛路径比较函数检测 RADJ 计算的路径是否远远优于其当前正在使用的路径。如果 RADJ 中所包含的新发现路径的负载远远优于同样包含在该 RADJ 中的当前正在使用的路径的负载,则源节点将把后续的数据业务流转移到该 RADJ 包含的新路径上。目的节点在收到由同一个源节点沿不同路径转发来的后续数据分组后,通过路径比较函数判断是否用数据分组中携带的节点序列和路径负载信息替换节点中的初始路径负载信息。目的节点此时进行路径比较的目的,是为了防止通过新路径转发的数据先于先前路径中转发的残存数据到达目的节点时造成的初始负载信息记录被反复更改的情况出现。

当活跃路径由于节点移动而断链时,错误消息将返回源节点,源节点则重新发起一个路由发现过程。

4 性能分析与仿真

使用软件 OPNET 8.1 对协议进行仿真的结果如图 1~4 所示。仿真中节点移动模型采用典型的 Random Waypoint Model^[27],仿真参数设置为:MAC 层采用 IEEE 802.11DCF,信道带宽为 1Mbps,40 个节点随机分布于 $1000 \times 1000m^2$ 区域内,每个节点的通信范围是 250m,在 0.1 秒时开始同时发送数据分组,严格比较函数中参数 $\alpha = \beta = 0.1$,节点平均估计时延的加权平滑参数。仿真中对协议性能的评估主要集中在协议对网络吞吐量、端到端时延和附加开销的影响。

DSR^[3]和 CLLOR 协议的性能比较如图 1~4 所示。其中图 1、图 2 为每个节点发送数据分组的速率为 4 分组/秒、每个分组大小为 1Kbits,路由维护阶段松弛比较函数中参数取值为 $\alpha = \beta = 0.2$ 时,改变节点运动速度分别为 10 米/秒和 20 米/秒的不同场景下的仿真比较结果;图 3、图 4 为每个节点都是以 10 米/秒的速度在场景中做随机运动、发送分组速率为 4 分组/秒路由维护阶段松弛函数中参数取值为 $\alpha = \beta = 0.2$ 时,改变分组大小分别为 1Kbits 和 0.5Kbits 情况下得到

的仿真比较结果。从比较结果可以看出,CLLOR 在端到端时延特性、分组成功递交率特性方面都具有优于 DSR 的对高节点移动速度、大业务流负载强度的适应能力,而两者引入的附加开销大致相当(由于篇幅没有给出开销比较结果),这主要是因为 DSR 没有任何负载平衡机制,使得网络容易出现瓶颈和拥塞,而 CLLOR 采用了拥塞控制的接纳机制和业务负载均衡

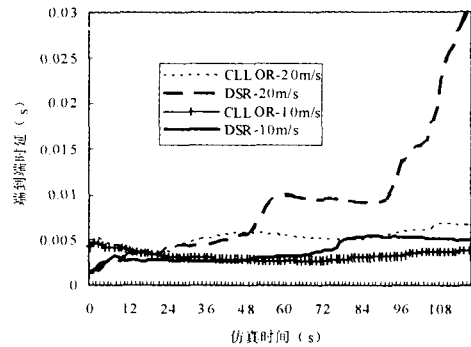


图 1 速度对端到端时延影响特性比较

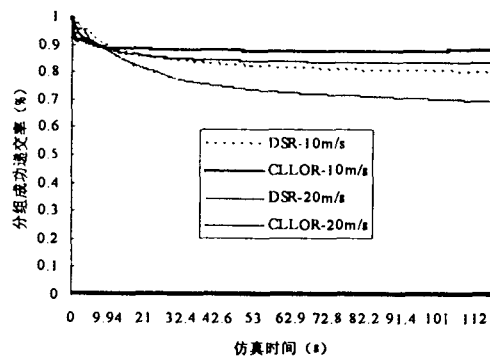


图 2 速度对分组成功递交率影响特性比较

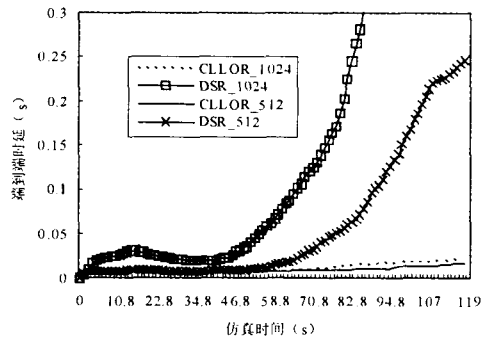


图 3 业务流强度对端到端时延特性的影响

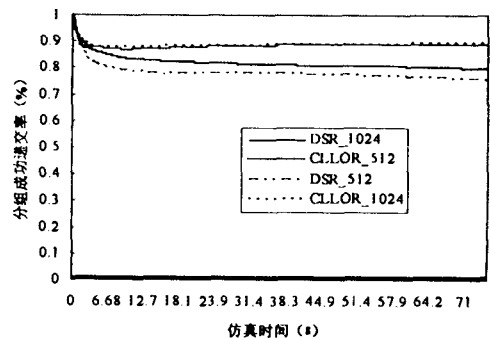


图 4 业务流强度对分组成功递交率特性的影响

均衡传输机制,能够在负载较轻的链路上对分组进行转发以

尽量避免在负载较重的节点出现过载,从而有效地改善了网络中数据业务流传输的端到端时延性能和分组成功递交率特性,使协议对网络拓扑的动态变化、高业务流负载强度和节点分布密度具有良好的适应能力,提高了网络的健壮性和扩展能力。

松弛函数中的参数 α 、 β 的取值对 CLLOR 协议性能的影响情况如图 5、图 6 所示,其中每个节点以 10 米/秒的速度做随机运动,节点的分组到达速率为 3 分组/秒,分组大小为 4Kbits。参数 α 、 β 的取值的减小可带来时延特性的改变,但相应地会增加路由调整过程的次数,带来算法的震荡和附加开销,且当 α 、 β 的取值在小于 0.15 后进一步减小时对协议整体性能的提高不大。

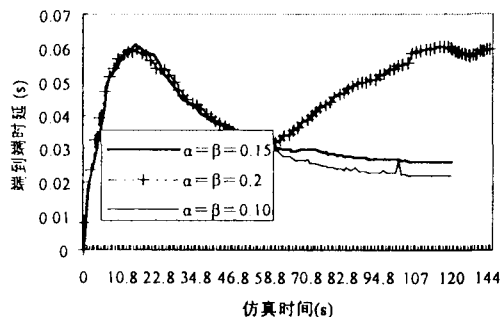


图 5 松弛函数参数对 CLLOR 端到端时延特性的影响

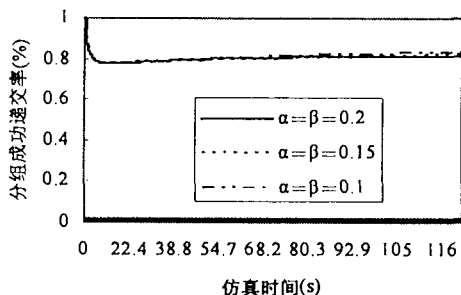


图 6 松弛函数参数对 CLLOR 分组成功递交率的影响

结束语 本文提出了一种基于跨层负载信息感知和共享的自组网负载均衡路由算法,在路由发现时通过基于中间节点负载状态的接纳控制可以使重负载节点不参与新路由的发现,避免网络中出现拥塞节点和减少网络瓶颈对网络性能的影响,使在网络节点密度大、负载重的情况下仍然能获得很高的数据递交率和保证性能的稳定。不允许中间节点对路由请求分组进行应答,可以使路由选择依据更为准确的路径负载信息。中间节点的接纳控制和不转发重复收到的路由请求分组措施大大减少了网络中的冗余业务流和洪泛分组带来的网络干扰,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。同时,通过严格路径比较函数使得源节点可以从众多轻负载路径中选择出代价最优的路径。在数据分组传输过程中,算法通过对活跃路径的断链和负载状况进行监视,采用松弛的路径比较函数对活跃路径的负载状态进行比较,在附加开销增加不大的情况下可以有效地实现数据分组由重负载路径向轻负载路径转移,保证了网络业务流的均衡分布和均衡传输。CLLOR 是一种自适应的协议,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。仿真结果表明,CLLOR 在分组丢失率和平均端到端时延等方面具有良

好的性能,其优良的分布式控制特征能适应 ad hoc 网络的动态环境。

参考文献

- 1 IETF. Mobile ad hoc networks charter[EB/OL]. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- 2 Perkins C E, Royer E M. Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing [EB/OL]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
- 3 Broch J, Johnson D, Maltz D. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks[EB/OL]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-10.txt>
- 4 Das S R, Perkins C E, Royer E M. Performance Comparison of Two On-demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks[C]. INFOCOM 2000. In: Proc. of Nineteenth Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies, Vol. 1, March 2000. 3~12
- 5 Schoonderwoerd R, Holland O, Bruten J, Rothkrantz L. Ant-based load balancing in telecommunications networks[J]. Adaptive Behavior, May 1997. 169~207
- 6 Corson S, Macker J. Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations (RFC 2501)[EB/OL]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2501.txt>
- 7 Pham P, Perreau S. Multi-path routing protocol with load balancing policy in mobile ad hoc network[C]. In: 4th Intl. Workshop on Mobile and Wireless Communications Network, Sep. 2002. 48~52
- 8 Zhang L, Zhao Z, Shu Y, et al. Load balancing of multipath source routing in ad hoc networks[C]. In: IEEE Intl. conf. on Communications, Vol. 5, 2002. 3197~3201
- 9 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[C]. 2000 First Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing, Aug. 2000. 3~10
- 10 Stark W, Wang H, Lafortune W A, et al. Low-energy wireless communication network design[J]. IEEE wireless communications, 2002, 9(4): 123~128
- 11 Yuen W H, Lee H-N, Andersen T D. A simple and effective cross layer networking system for mobile ad hoc networks[C]. In: The 13th IEEE Intl. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Vol. 4, Sept. 2002. 1952~1956
- 12 Fang Y, McDonald A B. Cross-layer performance effects of path coupling in wireless ad hoc networks: power and throughput implications of IEEE 802. 11 MAC[C]. Performance, Computing, and Communications Conf. 2002. 21st IEEE International, April 2002. 281~90
- 13 Safwati A, Hassanein H, Mouftah H. Optimal cross-layer designs for energy-efficient wireless ad hoc and sensor networks[C]. In: Proc. of the 2003 IEEE Intl. Conf. on performance, Computing, and communications, pp123-1289-11, April 2003
- 14 郑相全, 等编著. 无线自组网技术实用教程. 北京: 清华大学出版社, 2004
- 15 Toh C K. Associativity-Based Routing for Ad-hoc Mobile Networks[J]. Wireless Personal Communications Journal, 1997, 4(2): 103~139
- 16 Zhou A, Hassanein H. Load-balanced wireless ad hoc routing [C]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2001, 2: 1157~1161
- 17 Lee S-J, Gerla M. Dynamic Load-Aware Routing in Ad Hoc Networks[C]. IEEE International Conference on Communications, 2001, 10: 3206~3210
- 18 Wu K, Harms J. Load-sensitive routing for mobile ad hoc networks[C]. In: Tenth Intl. Conf. on Computer Communications and Networks Proc. Oct. 2001. 540~546
- 19 Sheu S-T, Chen J. A novel delay-oriented shortest path routing protocol for mobile ad hoc networks[C]. IEEE International Conference on Communications, 2001, 6: 1930~1934
- 20 Song J-H, Wong V, Leung V C M. Load-aware on-demand routing (laor) protocol for mobile ad hoc networks[C]. The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003, 3: 1753~1757
- 21 Yi Y, Kwon T J, Gerla M. A load aWare routing (LWR) based on local information[C]. In: IEEE Intl. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, vol. 2, 2001. G65~G69
- 22 Yi Y, Gerla M, Kwon T J. The selective intermediate nodes scheme for ad hoc on-demand routing protocols[C]. IEEE International Conference on Communications, 2002, 5: 3191~3196
- 23 郑相全, 郭伟. 自组网中的负载均衡路由协议[J]. 计算机科学, 2004, 31(11): 40~45
- 24 郭伟, 郑相全, 等. 短波抗干扰电台组网技术研究. 电子科技大学通信抗干扰技术 7 国防重点实验室预研基金项目书, 2002
- 25 葛利嘉, 郑相全, 等. 超宽带 ad hoc 网络的关键技术研究. 重庆市科技计划项目书, 2003
- 26 Johnson D B, Maltz D A. Mobile Computing [M]. Kluwer Academic Publishers, 1996. 153~181