

基于沙堆模型的无线 Mesh 网负载均衡算法

张云春 李龙宝 姚绍文 胡建陶 张晨斌

(云南大学软件学院 昆明 650095)

摘 要 无线网络中广泛使用的基于最短路径路由算法的负载均衡机制,存在部分节点负载过重而导致网络拥塞的问题,严重降低了网络的传输性能;同时,无线网络的广泛部署和应用需求急剧增长,迫切需要对现有的负载均衡机制进行优化和改进。因此,基于沙堆模型的坍塌机制及其改进,提出了一种适用于无线 Mesh 网络的负载均衡算法,重点设计了负载均衡的触发条件、候选节点集合计算和负载分配机制。仿真结果表明,基于沙堆模型的负载均衡算法在丢包率和吞吐量方面相比同类算法分别改善了 10.4% 和 7%。

关键词 负载均衡,无线 Mesh 网,沙堆模型,吞吐量

中图分类号 TP393.04 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.08.015

Sandpile Model Based Load Balancing Algorithm in Wireless Mesh Networks

ZHANG Yun-chun LI Long-bao YAO Shao-wen HU Jian-tao ZHANG Chen-bin

(School of Software, Yunnan University, Kunming 650095, China)

Abstract The shortest path routing based load balancing mechanisms, which are widely used in wireless networks, result in congestion problem on some overloaded nodes. This seriously degrades the network transmission performance. Meanwhile, with the wide deployment of wireless networks and the increasing demand of application requirements, the optimization and improvement for existing load balancing mechanisms are urgent needed. Consequently, on the basis of “collapse” mechanism and its improvement, a load balancing algorithm suitable for wireless Mesh networks was proposed. It focuses on designing the triggering condition under which the load balancing is started, candidate node set computation and traffic load distribution mechanism. The experimental results show that the sandpile model based load balancing algorithm outperforms the other similar algorithms in both packet drop ratio and throughput by 10.4% and 7% respectively.

Keywords Load balancing, Wireless Mesh networks, Sandpile model, Throughput

1 引言

无线 Ad Hoc 网络作为典型的多跳传输网络,在移动性、传输性能和部署开销之间取得了良好的平衡。无线网状网(Wireless Mesh Network, WMN)作为未来无线网络理想的组网方式和关键技术之一,是一种特殊的多跳 Ad Hoc 网络^[1-2]以及为适应高数据量的传输而提出的一种新型网络。相比其他类型的网络,无线 Mesh 网络具有高可靠性、可扩展性、自组织、自愈性、结构灵活、高带宽、覆盖范围大等优势,其相关研究和开发得到了蓬勃发展。尽管无线 Mesh 网络具有特殊的优势以及广泛的应用前景^[3],其仍存在信道干扰、关键节点负载过重、安全性低等问题。其中,负载均衡问题是影响网络性能的一个重要方面。负载均衡算法提出的目的是使网络负载均衡合理分布^[4],以防止过多负载集中在小部分节点

或链路上。设计有效的负载均衡算法的难度较大,原因如下: 1)负载均衡与路由密切相关。机会路由^[5]、协作式路由^[6]等多径传输机制能提高吞吐率,缓解负载压力,但在节点移动性较高、网络拓扑频繁改变的应用中,此类算法的性能显著下降。选择最佳路径的度量包括跳数、期望传输时间(Expected Transmission Time, ETT)、期望传输次数(Expected Transmission Count, ETX)、信噪比等^[7]。单一的判据会导致准确率较低,多个判据的综合运用虽然能有效提高精度,但会导致计算复杂度增加且开销增大。2)无线 Mesh 网络采用“网关-Mesh 路由器-Mesh 客户端”3 层结构,使得最短路径上的节点容易负载过重,导致网络性能降低。单纯依赖路由算法并不能充分解决负载均衡问题。3)无线网络性能的提升程度无法匹配无线网络的应用范围和网络规模的扩张速度,导致负载严重不均衡。

收稿日期:2017-06-01 返修日期:2017-09-21 本文受云南省应用基础研究计划青年项目(2012FD004),国家自然科学基金项目(61363021),云南大学软件学院教育创新基金项目(2012EI07)资助。

张云春(1981—),男,博士,讲师,主要研究方向为无线网络, E-mail: yunchunzhang@hotmail.com; 李龙宝(1989—),女,硕士,主要研究方向为无线网络; 姚绍文(1966—),男,博士,教授,主要研究方向为无线网络、业务流程建模; 胡建陶(1992—),女,硕士,主要研究方向为无线网络; 张晨斌(1994—),男,主要研究方向为无线网络。

路由问题和负载均衡问题的结合已经被证明为 NP 复杂问题^[8],在时空复杂度受限的条件下很难找到全局最优解,多数改进的启发式算法仅计算局部最优解。多路径路由算法的复杂度较高、开销较大、可扩展性较低。协作式路由面临自私节点、计算复杂度高等缺点。因此,结合上述新技术的负载均衡问题仍有待进一步研究。与此同时,随着大数据时代的来临和无线网络在人们生活中的日益深入,无线网络的规模成倍增长、业务数据量急剧攀升。如何在现有技术的基础上满足新应用的高性能需求显得尤为重要。为提升无线网络的性能,实现基于负载均衡的路由协议是关键。随着无线节点的规模化配置和功能的逐步增多,现有的无线网络节点都朝着智能化和社会化的趋势发展,新型的应用也多侧重于无线社交网络。因此,许多学者引入人工智能和社交网络领域的算法来改善无线网络的性能^[9]。沙堆模型作为典型的自组织临界系统,具有自适应性和分布式等优点,适合求解复杂问题。

因此,本文借鉴传统的沙堆模型及其坍塌机制,对无线 Mesh 网络中的负载均衡问题进行建模,设计和实现了基于沙堆模型的无线 Mesh 网络负载均衡算法。其中,重点实现负载转移临界值、转移量大小和候选转发节点的计算。

本文第 2 节介绍了沙堆模型及其坍塌机制的原理;第 3 节介绍了基于沙堆模型的负载均衡算法;第 4 节介绍了仿真测试和结果分析;最后总结全文。

2 沙堆模型与无线网络负载均衡

美国物理学家 Bak 等使用沙堆模型来说明自组织临界状态的形成和特点^[10]。在沙堆模型中,初始阶段下落的沙子对沙堆的影响不大。当沙堆到达一定高度时,增加一粒沙子便可能引起整个沙堆的坍塌。Bak 等基于上述观察,提出了自组织临界状态理论。

实际沙堆往往难以进行操作和分析,为了便于研究和观察,Bak 等提出了一种与实际沙堆性质类似且可以在计算机上模拟的元胞自动机二维平面模型。在此模型中,设置一个尺度为 L 的二维网格平面,每个网格的坐标是 (x, y) ,用 $S(x, y)$ 来表示落在每个网格的沙子数目。当网格中的沙子数超过临界值 δ 时,该网格的沙子滑落到 4 个邻居网格中;如果邻居网格内的沙子数又超过 δ ,则坍塌继续,直到没有网格中的沙子数超过临界值 δ 为止。其模拟过程可表示为如下几个步骤。

1) 设定平面尺度 L 和临界值 δ (一般设为 4),初始化每个网格中的沙子数为 $S(x, y)$ 。

2) 随机选择一个网格,在其上添加一粒沙子,则 $S(x, y) = S(x, y) + 1$ 。

3) 若 $S(x, y) \geq \delta$,且相邻单元的沙子数相差超过 4,则执行下列操作,如式(1)所示:

$$\begin{cases} S(x, y) = S(x, y) - 4 \\ S(x \pm 1, y) = S(x \pm 1, y) + 1 \\ S(x, y \pm 1) = S(x, y \pm 1) + 1 \end{cases} \quad (1)$$

4) 对每一个邻居网格,执行步骤 3),直至所有网格中的沙子数量均小于规定的临界值,整个网络达到稳定状态。

对每个节点迭代执行上述过程,直到没有坍塌为止。从

沙堆模型的特点可看出,沙堆坍塌所引起的效应会扩散到周边区域,最终在一定时间内恢复至平衡状态。影响坍塌的范围和程度的参数包括沙堆的高度、相邻区域沙堆的高度差、区域面积、沙堆的增长速度。

负载均衡问题一直是困扰无线网络通信的难题^[11-12],其成因主要是各个发送请求的源节点之间缺乏对所选重复路径、负载量大小等的决策信息,使得少数节点或链路被多个传输请求选定为“最佳”路径,造成发送时的丢包。随着应用需求对服务质量要求的不断提高,大量研究集中在负载均衡机制的不断改进上。在已有的负载均衡机制中,分布式负载均衡算法具有较高的响应速度、较低的开销等优势,因此其应用备受关注。Laredo 等^[13-14]与 Zhou 等^[15]通过对负载均衡原理的分析,证明了负载均衡的实现与自组织临界系统具有相似性,其研究表明沙堆模型在解决分布式负载均衡方面具有良好的性能。综上所述,沙堆模型与网络的负载均衡问题具有一定相似性,且基于沙堆模型优化无线网络性能的研究尚不多见。因此,本文借鉴沙堆模型及其坍塌机制,来求解和优化负载均衡问题。

3 基于沙堆模型的负载均衡算法

无线网络中负载均衡问题的求解通常以路由算法为基础,算法中路径的频繁计算会造成较大的开销。负载过重时,如果能够避免路径的重新计算,通过局部节点以较小的开销快速计算负载转移的有效路径,将提高算法效率。鉴于此,本文将从负载均衡问题出发,提出基于沙堆模型的无线 Mesh 网络负载均衡机制。

无线 Mesh 骨干网是一个无向图 $G(V, E)$,其中包含有限的、非空的节点集 V 和两个节点之间的链接集 E 。 $N = |V|$ 表示网络中节点的数量, M 表示网关的数量, $N - M$ 表示 Mesh 路由器的数量。本文假定网络为单网关节点,多网关节点情况下的负载均衡可进行相应的扩展。基于沙堆模型的负载均衡算法设计的关键在于:负载转移临界值的计算、候选邻居节点的计算与负载转移量的计算。

3.1 负载转移临界值的计算

以节点当前的负载量进行判断。设每一个节点的负载为 l_i ,节点的负载一方面来自转发其他节点产生的流量负载,另一方面是节点自身产生的数据流量。设每个节点所能承受的负载量临界值为 δ_i ,当 $l_i \geq \delta_i$ 时,认为当前节点负载过重,触发负载均衡机制。 δ_i 可以通过计算当前节点的空闲队列或节点的丢包率、有效带宽等参数进行设定。坍塌定义为当某节点上的负载量超过规定的临界值时,该节点上的负载将进行转移。坍塌过程按照如下规则进行:当 $l_i \geq \delta_i$ 时,该节点计算将要转移的负载量 l_i' ,并将其转移至候选节点。可以简单地将 l_i' 平均分配给每个候选邻居节点,但这样忽略了不同的候选节点所拥有的资源不同的事实,因此转移到每个候选节点的负载量需要根据该节点的可用空闲队列计算。

设节点 i 在时刻 t 的负载为 $L_i(t)$,触发负载坍塌的临界值为 δ_i 。定义每个节点的队列总长度为 Q_i ,参数为 α ,每个节点的临界值为 $\delta_i = \alpha Q_i$,其中 $\alpha \in [0, 1)$,以保证临界值小于队列的长度。节点队列当前时间存放的数据包的总数为节点的

当前负载, $LI_i(t)$ 和 $LO_i(t)$ 分别表示时间 t 到 $t+1$ 的时间段内从节点 i 入队和出队的负载量。因此, 节点 i 的负载量为 $L_i(t) = LI_i(t) - LO_i(t)$ 。在该时间段内, 节点入队和出队的负载量 $LI_i(t)$ 和 $LO_i(t)$ 的值可以从节点中获取, 节点自身产生的数据量可以通过节点本身计算得到。因此, 节点 i 在 $t+1$ 时的负载为 $L_i(t+1) = L_i(t) + LI_i(t) - LO_i(t)$ 。

3.2 候选邻居节点的计算

在基于网格的拓扑结构中, 当前节点多余的负载将转移到与之相邻的 4 个邻居节点上; 对于任意网络拓扑结构, 需要确定可以转移负载的候选节点。从当前节点的邻居节点集合中选择候选节点, 然而不是所有邻居节点都比当前节点距离目标节点更近, 因此负载的转移需要根据邻居节点所在的方向(朝向目标节点)来确定。特殊节点如上一跳节点和下一跳节点应排除在外, 因为上一跳节点是流量的上一个发送方, 而下一跳节点和当前节点之间的链路达到饱和时才会导致当前节点的负载量触发坍塌。节点 i 的候选邻居节点 j 应满足两个条件: 节点 j 在当前传输路径中不是节点 i 的上一跳或下一跳节点; 节点 j 在时间 t 的负载未达到临界值, 即满足 $L_j(t) < \alpha Q_j$ 。定义候选转发节点集合为 M_i , $|M_i|$ 表示节点 i 的候选邻居节点的个数。当 $|M_i| < 1$ 时, 无可用候选节点, 触发上一跳节点进行负载转移。

3.3 负载调度分配

将负载转移到候选节点集合时, 应设计相应的负载分配机制。平均分配方法简单且容易实现, 但性能较低。本文设计的分配机制中, 转移到每个候选节点的负载量大小依据节点的空闲队列的大小来计算, 为 $Q_j - L_j(t)$ 。但在实际计算候选节点时, 有 $L_j(t) < \alpha Q_j$ 。实际用于转移负载的队列空间大小为 $Q_j' = \alpha Q_j - L_j(t)$ 。节点空闲队列越长, 转移到该节点的负载量越大。当前节点按照邻居节点的空闲队列长度计算每一个候选邻居节点集合的负载期望值, 并降序排列。

当前节点 i 即将转移的负载总量定义为 $S_i = L_i(t) - \alpha Q_i$ 。每个候选节点接收到的负载量与其可用空闲队列的大小成正比。根据上述定义, 节点 j 接收到的负载量如式(2)所示:

$$f_j(t) = S_i \cdot (Q_j' / \sum_{k=1}^{|M_i|} Q_k') \quad (2)$$

执行算法时, 首先初始化网络, 并在每个节点上定义一个检测函数。监控节点的负载量变化, 一旦负载量超过预先定义的临界值, 就触发坍塌过程函数。在坍塌过程被触发后, 当前节点需要向邻居节点转移负载。此时, 先计算当前节点的所有候选邻居节点列表(去除上一跳节点和下一跳节点), 再计算每个候选节点自身的负载期望值, 并反馈到当前节点。收到邻居节点列表中所有节点的反馈信息后, 当前节点计算转移到各个节点的负载量, 并对其进行排序, 然后启动负载转移过程。每一个候选邻居节点中的节点在接收到特定的转移负载量后, 判断当前负载量是否超过规定的临界值, 如果超过, 则触发该节点上的坍塌过程; 如此递推, 直到网络中所有节点上的负载量都小于规定的临界值, 达到稳定状态。

算法需要定义每个节点队列管理函数以及查找候选邻居节点的函数, 如表 1 所列。基于表 1 中定义的函数, 当节点需

要向邻居节点转发数据包时, 首先调用 $nb_lookup()$ 函数获取邻居节点的集合。转发数据包时, 调用 $rqueue_deque()$ 函数从发送节点的缓存队列中移出数据包。接收到该数据包的邻居节点后, 调用 $rqueue_enqueue()$ 函数将接收到的数据包插入到缓存队列中。

表 1 队列有关的主要函数

Table 1 Main functions related to queue

功能函数	描述
$rqueue_enqueue(p)$	将数据包 p 插入队列中
$rqueue_deque(p, dst)$	发送数据包 p 的目的地址 dst , 将其移出队列
$nb_lookup(v)$	获取节点 v 的邻居节点集合

基于沙堆模型的无线 Mesh 网络负载均衡算法的详细步骤如下:

- 1) 监控每个节点上的负载量, 当节点 i 上的负载量超过临界值时, 触发负载转移函数 $Loadbalance(i)$;
- 2) 调用函数 $nb_lookup(i)$ 查找节点 i 的候选邻居节点集合;
- 3) 对于每一个候选邻居节点, 计算该节点的负载期望值, 并返回该参数给节点 i ;
- 4) 节点 i 计算转移到每一个节点的负载量, 执行数据包的分配和传输;
- 5) 对每一个候选邻居节点 j , 调用 $Loadbalance(j)$ 函数。

通过上述函数的递归执行, 以分布式的方式实现动态的负载均衡。当算法中每一个节点的负载均小于规定的临界值时, 网络恢复到稳定状态。通过算法的执行过程可以看出, 上述算法避免了负载均衡算法对全局信息的收集, 降低了复杂度, 因此具有良好的可扩展性。

4 仿真实验与性能分析

4.1 仿真环境

为了分析和评价算法的性能, 采用 NS-2 进行仿真实验, 并将本文设计的负载均衡算法与 AODV(Ad Hoc On-demand Distance Vector)^[16] 算法进行比较。仿真实验中, 假定所有构成 Mesh 网络骨干的 Mesh 路由器的配置相同, 信号发送半径为 250m, 干扰半径为 550m, 网络由 5×5 的网格共计 25 个节点构成。仿真实验中, 节点相关的参数设置如表 2 所列, 其他参数均为仿真环境中的默认值。仿真时, 分别设置不同数量的源节点和目的节点, 将多次测试结果的平均值作为最终结果。仿真时仅设置单网关节点进行测试, 但本文算法可扩展到多网关节点网络中。

表 2 仿真环境参数设置

Table 2 Setting of simulation parameters

参数	值
信道类型	Channel/WirelessChannel
数据链路层协议	802.11
接口队列类型	DropTail/PriQueue
队列最大容纳分组数	50 个
天线类型	全向天线

下文将对本文设计的算法与 AODV 算法在性能上的差异进行对比分析。

4.2 丢包率

丢包率是衡量网络性能的关键参数,在数据包发送过程中,若节点拥塞,缓存队列空间不足,发送给该节点的数据包将无法存储在缓存队列中,从而导致丢包。发送的数据包总数与接收到的数据包总数的差值等于丢失的数据包总数,定义丢失的数据包总数占全部发送数据包的百分比为丢包率。实验中,不断增大发送节点的发送速率(因网络规模限制,每个源节点的发送速率限制在 30 packets/s 以内),分别统计 AODV 协议和基于沙堆模型的负载均衡算法(以下简称 SandPile)的丢包率,测试结果如图 1 所示。

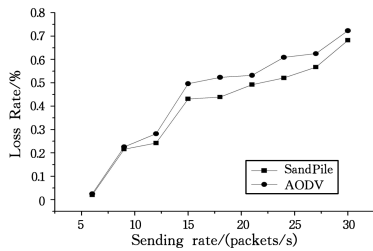


图 1 丢包率对比

Fig. 1 Comparison of drop-ratio

由图 1 可以看出,随着数据包发送速率的增大,两种协议的丢包率随之增加。通过比较可以看出,在数据包发送速率较低时,基于沙堆模型的负载均衡算法的丢包率并没有明显改善,因为节点有大量的缓存空间来存储接收到的数据包。随着数据包发送速率的逐渐增大,网络中传输的数据包数量随之增大,此时 SandPile 相对于 AODV 的丢包率有所减少,因为在节点队列将要拥塞时,SandPile 算法已经向邻居节点转移了负载,使得接收节点队列不至于满载,所以降低了丢包率。综合对比结果,基于沙堆模型的负载均衡算法的丢包率比 AODV 算法降低约 10.4%。

4.3 时延

端到端时延指包的接收时间与包的发送时间之差,平均端到端时延指计算整个网络中所有数据包的时延均值。如果数据包在队列中排队的等待时间过长,则会导致端到端时延过大。设 R 表示目的端节点接收到的数据包总数, T_{s_i} 和 T_{r_i} 分别表示第 i 个数据包的发送时间和到达目的节点的时间,两者之差即为数据包在网络中传输的延迟时间。因此,网络中 R 个数据包的平均端到端时延的计算方法如式(3)所示:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^R (T_{r_i} - T_{s_i})}{R} \quad (3)$$

针对两个算法进行的平均端到端时延的测试结果如图 2 所示。由图 2 可以看出,两种算法在数据包发送速率 24 packets/s 之前,平均端到端时延整体呈上升趋势,随后有一定下降。而 SandPile 的平均端到端时延在数据量不大时没有明显改善,有时甚至大于 AODV 算法的时延,因为 SandPile 在负载转移的过程中可能会导致数据包的时延增加。随着数据量的增大,当拥塞节点转移负载之后,网络负载整体趋于均衡,数据包到达该节点不需要等待很长时间,因此时延有所降低。当发送速率超过 25 packets/s 后,网络中大量节点的空闲队列稀缺,致使大量数据包被丢弃,因此造成到达目的节点的数据包总数减少,此时统计的结果反而表现出平均时延的降低。

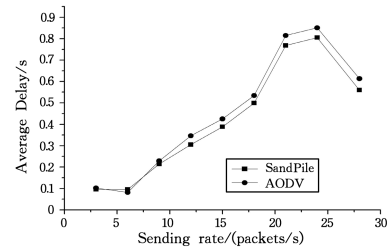


图 2 平均端到端时延对比

Fig. 2 Comparison of average end-to-end delay

4.4 吞吐量

吞吐量指单位时间内目的节点成功接收到的数据包总量,它是一种最直观的衡量算法性能的标准。网络吞吐量受网络带宽或发送速率的限制,在给定带宽和发送速率的前提下,吞吐量越高,说明网络性能越好。随着节点发送速率的增加,两种算法的吞吐量变化如图 3 所示。

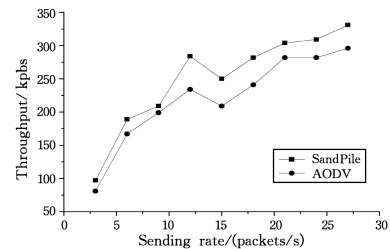


图 3 吞吐量对比

Fig. 3 Comparison of throughput

由图 3 可以看出,随着数据包发送速率的增加,两种算法的吞吐量随着发送速率的增加而增大,当超过链路所能处理的容量时,吞吐量缓慢降低。总体而言,本文提出的算法比 AODV 的吞吐率提高约 7%。

综合上述分析,基于沙堆模型的负载均衡算法能够提高无线网络的性能,初步证明了基于沙堆模型的坍塌机制应用于改善无线网络性能的可行性。然而,性能改善的程度还有待进一步提高,主要原因在于负载转移的节点不一定位于较优的路径上,甚至可能存在负载多次转移之间的节点均负载过重的情况,此时网络性能并无有效改善。因此,可以考虑借鉴最新的技术来改善性能,如多径路由协议、网络编码等,这将是本项目下一步的主要研究方向。

结束语 负载均衡问题是无线 Mesh 网络中的关键问题,尤其是网关节点和骨干网中的 Mesh 路由器容易负载过重,导致数据包丢弃从而严重影响网络性能。采用负载均衡机制可以弥补少数节点负载过重的缺陷,保证数据的可靠传输,减少网络延迟并提高网络吞吐量。在分析了现有负载均衡算法的研究现状和存在的问题的基础上,提出了基于沙堆模型的负载均衡算法,对触发负载转移的临界值、候选邻居节点的选取、转移量的分配等方面进行了设计和实现。仿真测试结果表明,所提算法能够实现良好的负载均衡效果,避免关键节点负载过重而其他节点负载过轻的情况,能很好地适应无线 Mesh 网络环境,有助于无线 Mesh 网络的进一步推广应用。从仿真结果中可以看出,本文算法的性能尚待提高,有望

(下转第 124 页)

式算法。仿真结果表明,与低复杂度算法相比,使用贪婪式算法所得到的节点接入方案能达到更高的网络总吞吐量,但其复杂度略高,因此可用于节点数目较少的场景,而低复杂度算法可用于节点数目较多的场景。

参考文献

- [1] OZEL, TUTUNCUOGLU K, YANG J. Transmission with Energy Harvesting Nodes in Fading Wireless Channels: Optimal Policies[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(8): 1732-1743.
- [2] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 757-789.
- [3] ZUNGERU A M, ANG L M, PRABAHARAN S, et al. Radio Frequency Energy Harvesting and Management for Wireless Sensor Networks[M]. Green mobile devices and networks: Energy optimization and scavenging techniques, Boca Raton: CRC Press, 2012: 341-368.
- [4] NISHIMOTO H, KAWAHARA Y, ASAMI T. Prototype im-

plementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors, 2010, 143(2): 1282-1287.

- [5] HE S, CHEN J, JIANG F, et al. Energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(10): 1931-1942.
- [6] FU L, CHENG P, GU Y, et al. Minimizing charging delay in wireless rechargeable sensor networks[C]// IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). IEEE, 2013: 2922-2930.
- [7] LI Y, FU L, CHEN M, et al. RF-Based Charger Placement for Duty Cycle Guarantee in Battery-Free Sensor Networks [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(10): 1802-1805.
- [8] BI S, ZHANG R. Placement Optimization of Energy and Information Access Points in Wireless Powered Communication Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 15(3): 2351-2364.
- [9] JU H, ZHANG R. Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(1): 418-428.

(上接第 87 页)

在多径并发传输机制的基础上实现负载均衡,这也是我们下一步的研究方向。

参考文献

- [1] SU J F, WU M Q, ZHANG Q J. Quantized optimal throughput analysis model of wireless multi-hop Ad hoc networks[J]. Journal of XIDIAN University, 2012, 39(1): 128-134. (in Chinese) 宿景芳, 武穆清, 张钦娟. 多跳 Ad Hoc 网络最佳吞吐率量化分析模型[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(1): 128-134.
- [2] LIU Y B, LIU N A, LI X H, et al. Load Balancing Routing Protocol Based on Traffic Prediction for Wireless Mesh Networks [J]. Computer Science, 2017, 44(1): 109-112. (in Chinese) 柳永波, 刘乃安, 李晓辉, 等. 基于流量预测的无线 Mesh 网络负载均衡路由协议[J]. 计算机科学, 2017, 44(1): 109-112.
- [3] AJAYI A O, ROEDIG U, EDWARDS C, et al. A survey of rural Wireless Mesh Network (WMN) deployments[C]// 2014 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile. Bali: IEEE Press, 2014: 119-125.
- [4] SHEN X J, CHEN Z G, LIU L. Load balancing multicast routing based on network coding in wireless mesh network[J]. Journal on Communications, 2015, 36(4): 89-95. (in Chinese) 沈小建, 陈志刚, 刘立. 无线 mesh 网络中编码感知且负载均衡的多播路由[J]. 通信学报, 2015, 36(4): 89-95.
- [5] DARESHOORZADEH A, GRANDE R D, BOUKERCHE A. Towards a Comprehensive Model for Performance Analysis of Opportunistic Routing in Wireless Mesh Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 65(7): 5424-5438.
- [6] QIAO H, ZHANG D F, XIE K, et al. Distributed Fair Cooperative Routing in Multi-gates Wireless Mesh Network[J]. Journal on Communications, 2015, 36(2): 175-185. (in Chinese) 乔宏, 张大方, 谢鲲, 等. 分布式多网关无线 Mesh 网公平协作路由算法[J]. 通信学报, 2015, 36(2): 175-185.
- [7] SHESHADRI R K, KOUTSONIKOLAS D. An Experimental

Study of Routing Metrics in 802. 11n Wireless Mesh Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(12): 2719-2733.

- [8] GAO J, ZHANG L. Load-Balanced Short-Path Routing in Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2006, 17(4): 377-388.
- [9] GAUR N, CHAKRABORTY A, MANOJ B S. Load-aware routing for non-persistent small-world wireless mesh networks[C]// IEEE 2014 Twentieth National Conference on Communications (NCC). Kanpur: IEEE Press, 2014: 1-6.
- [10] BAK P, TANG C, WIESENFELD K. Self-organized Criticality-An Explanation of $1/f$ Noise[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(59): 381-384.
- [11] AHMED A M, PAULUS R. Congestion detection technique for multipath routing and load balancing in WSN[J]. Wireless Networks, 2017, 23(3): 881-888.
- [12] DELGADO COLLAO O, LABEAU F. Delay aware load balancing over multipath wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, PP(99): 1.
- [13] LAREDO J L J, BOUVRY P, GUINAND F, et al. The sandpile scheduler: How self-organized criticality may lead to dynamic load-balancing[J]. Cluster Computing, 2014, 17(2): 191-204.
- [14] LAREDO J L J, GUINAND F, OLIVIER D, et al. Load Balancing at the edge of chaos: how self-organized criticality can lead to energy-efficient computing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2017, 28(2): 517-529.
- [15] ZHOU T J, JIANG G P, TU X, et al. Local load redistribution strategy based on maximum residual capacity of nodes in complex networks [C]// 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC). IEEE Press, 2017: 3692-3696.
- [16] PERKINS C E, ROYER E M, DAS E. Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing[C]// Proceedings of the 2rd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications 1999. Louisiana, IEEE Press, 1999: 90-100.