

基于最大流的无线 mesh 网络负载均衡信道分配算法

李陶深, 韦亚欢, 葛志辉

(广西大学 计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004)

摘 要: 针对无线 mesh 网络中各信道间的干扰情况及流量负载均衡问题, 定义了负载均衡的目标优化函数, 设计一种基于最大流的负载均衡信道分配算法。该算法优先考虑为负载量比较大的链路分配更多的带宽, 使得一些关键链路能够承受较大的流量负载, 实现各信道的负载均衡, 减少网络拥塞, 降低分组丢失率和延迟。实验结果表明, 该算法较好地平衡了网络负载, 在网络业务较重的情况下还能获得较好的网络性能。

关键词: 无线 mesh 网络; 信道分配; 网络最大流; 负载均衡

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)Z1-0035-06

Max-flow based load-balancing channel assignment algorithm for wireless mesh network

LI Tao-shen, WEI Ya-huan, GE Zhi-hui

(School of Computer Electronics and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In view of the interference problem between channels and traffic flow load-balancing in wireless mesh networks, an objective optimization function for balancing network load was defined, and a load-balancing channel assignment algorithm based on maximum flow was proposed. In the algorithm, the links with larger flow load had a priority to allocate more bandwidth. The purpose of doing it was to make the key links could support larger flow load, balance the channels, reduce packet loss rate and delay in the network. Simulation results show that the algorithm can balance the network load and obtain better performance even in the heavier load network.

Key words: wireless mesh network; channel assignment; maximum flow; balance load

1 引言

无线 mesh 网络(WMN, wireless mesh network)已成为下一代无线网络中具有应用前景的新型无线组网技术, 可为用户提供灵活的自适应无线互联网络连接。在 WMN 中, 为了支持更高的数据传输速率和提高网络的性能, 采用的 MAC 协议是关键, 而采用多射频多信道技术是较好的解决方案之一^[1]。

目前, 国内外学者对多信道技术及多信道 MAC

协议做了大量研究, 提出了一些信道分配方案。文献[2]设计了一种基于负载感知的信道分配算法, 但该算法假设可预知端到端的路由以及链路上的流量等信息。文献[3]提出一种基于干扰感知的信道分配算法, 将网络中每条链路的干扰值从大到小进行降序排序, 优先给干扰较大的链路分配较少使用的信道, 并将信道分配和路由协议相结合, 通过不断迭代调整节点间的信道分配和路由路径, 从而为无线链路分配可用的信道带宽。文献[4]将信道分配问

收稿日期: 2012-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60963022, 61103245); 广西自然科学基金资助项目(2012jjAAG0044)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60963022, 61103245); The Natural Science Foundation of Guangxi Province (2012jjAAG0044)

题划分成 2 个子问题：接口信道分配和路由选择，并采用基于模拟退火算法进行信道分配，同时考虑均衡各信道间的流量负载。文献[5]充分考虑了网络中的拥塞情况，将分组的队列延迟和分组丢失率作为网络拥塞的评判依据，提出一种分布式拥塞感知信道分配算法。该算法能较好地避免网络拥塞，在一定程度上均衡了信道流量负载。文献[6]考虑到各节点间数据传输流量的差异，提出一种负载均衡的分布式信道分配算法（LBCA）。该算法通过分布式构建节点冲突图，将节点冲突图中的相邻顶点按其负载值进行降序排序并依次进行信道分配，从而平衡了各信道的负载问题。文献[7]提出了一种基于最大流的无线 mesh 网络信道分配算法（CMCA），该算法在信道分配之前，通过采用最大流方法计算网络中能达到的最大吞吐量，并将此时情况下各链路的流量负载作为信道分配的依据，并以最小干扰为目标对链路进行信道分配。但是该算法只考虑为流量负载较大的无线链路优先分配受干扰最小的信道，而在信道分配过程中却忽视了对各信道间的流量进行负载均衡。当网络负载较重时，由于各信道间流量负载不均致使某些信道负载过重，从而导致网络出现拥塞，影响了系统的性能。

现有的信道分配方法只是针对不同的应用及不同的约束条件下有所侧重地进行研究，对多射频多信道无线 mesh 网络信道分配问题还没有完全有效的算法。本文综合考虑各信道间的干扰情况及流量负载均衡问题，提出一种集中式基于最大流的无线 mesh 网络负载均衡信道分配算法（CMLCA, centralized maxflow-based load-balancing channel assignment algorithm）。

2 系统模型

2.1 网络模型

假定 WMN 由 n 个无线节点组成，本文使用 $G(V,E)$ 表示多信道 WMN 物理拓扑图，其中， V 表示 WMN 中所有节点的集合， E 表示 WMN 中所有无向边的集合。假设每个节点 i 配置了 $R(i)$ 个网卡，网络中可以使用 $|H|$ 个正交无线信道。对于 WMN 中的任意 2 个节点 $i,j \in V$ ，记 $d(i,j)$ 为 i,j 之间的距离， r 表示发射距离。如果 $d(i,j) \leq r$ ，表示节点 i,j 在各自的通信范围内，则 i 和 j 之间存在一条无向边，即 $e_{ij} \in E$ 。

2.2 干扰模型

根据协议干扰模型，对于物理拓扑 $G(V,E)$ ，如果存在 2 条边 $e_{ij} \in E, e_{mn} \in E$ ，且 $\min\{d(i,m), d(i,n), d(j,m), d(j,n)\} \leq r'$ ，其中， r' 表示干扰距离，那么就称这 2 条边为“潜在的”干扰边。对于任意的 $e \in E$ ，用 $PIL(e)$ 表示链路 e 的所有潜在干扰链路集合， $X(e)$ 表示分配给链路 e 的信道，则链路 e 的所有干扰链路集合为 $IL(e) = \{e' | e' \in PIL(e), X(e) = X(e')\}$ 。

由于在同一冲突区域中，使用相同信道同时进行通信时会产生干扰。因此，在进行信道分配时，尽量使同一冲突区域内各相关链路使用不同的信道。当网络中所有节点的信道分配结束后，即各链路所使用的信道已确定时，那么它的干扰链路集合也可知。此时，对于任意链路 e ，其干扰度可表示为

$$|IL(e)| = \sum_{e' \in PIL(e)} I(\chi(e') = \chi(e)), \forall e \in E, e' \in E \quad (1)$$

其中， $I(X(e') = X(e))$ 表示当在“潜在的”干扰链路 e' 上分配的信道与链路 e 相同时，该函数值等于 1，否则为 0。那么，整个网络的干扰度可表示为

$$TIL = \sum_{e \in E} |IL(e)|, \forall e \in E \quad (2)$$

通过信道分配后，将得到一个新的通信拓扑图 $G_c(V,E_c)$ ，其中， V 同样表示 WMN 中所有节点的集合。使用 $X(i)$ 表示分配给节点 i 的信道集合，对于任意一条边 $e_{ij} \in E_c$ 当且仅当 $e_{ij} \in E, X(i) \cap X(j) \neq \Phi$ 。

2.3 业务模型

本文参考文献[8]的链路流量模型来构建业务模型。首先，考虑一个业务，当它从源端 s 通过中间路由器转发最终到达目的端 t ，并在目的端接收到的业务速率为 γ^{st} 。假设该业务在转发过程中通过某条链路 e_{ij} ，定义一个变量 ρ_{ij}^{st} ，则有以下约束：

$$\rho_{ij}^{st} = \begin{cases} 1, & \gamma^{st} \text{ 经过链路 } e_{ij}, \forall i, j, s, t \in V, e_{ij} \in E \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

假定链路的流量负载用符号 f 表示。此时，业务从源端到目的端时经由链路 e_{ij} 并在该链路上的负载为

$$f_{ij}^{st} = \rho_{ij}^{st} \gamma^{st}, \forall i, j, s, t \in V, e_{ij} \in E \quad (4)$$

在网络中，上行流跟下行流并不对称，因此一般情况下 $\rho_{ij}^{st} \neq \rho_{ji}^{st}$ ，因此，链路 e_{ij} 的负载为

$$f_{ij} = \sum_{s,t \in V} (f_{ij}^{st} + f_{ji}^{st}), \forall i, j, s, t \in V, e_{ij} \in E \quad (5)$$

由于可用的正交信道数远远少于射频数，因此网络中的一部分链路要工作在相同的信道上。此时，如果它们处于同一个干扰区域中，同时进行通信时将会产生干扰，链路的实际容量将会降低并取决于同一干扰域内使用同一信道的链路数目。因此，将链路 e_{ij} 的实际容量定义为

$$c_{ij} = \frac{B}{1 + \sum_{e \in PLL(e_{ij})} I(\chi(e) = \chi(e_{ij}))} = \frac{B}{1 + |IL(e_{ij})|}, \quad \forall i, j \in V, \forall e_{ij} \in E, e \in E \quad (6)$$

其中， B 表示信道的固有容量。当在链路 e_{ij} 的干扰域内只有 e_{ij} 使用信道 h 时， e_{ij} 的容量则为 B 。同时，使用 μ_{ij} 来表示链路的负载率（即链路的业务负载与链路实际容量的比值），其计算式为

$$\mu_{ij} = \frac{f_{ij}}{c_{ij}} = \frac{f_{ij}}{B} (1 + |IL(e_{ij})|), \quad \forall i, j \in V, e_{ij} \in E \quad (7)$$

在信道分配中，除了要满足信道分配算法的约束外，还必须保证给定的链路流集可调度。如 f_{ij} 表示经过链路 e_{ij} 的流量负载，经过一时间间隔 T 后，该链路所传输的业务数据流量为 $f_{ij}T$ 。如果链路 e_{ij} 的容量为 c_{ij} ，那么传输 $f_{ij}T$ 这个数据量需要 $(f_{ij}/c_{ij})T$ 时间。对于任意链路 e ，若处于其冲突域内所有链路的数据传输时间总和不超过 T 时，即

$\sum_{e_{ij} \in IL(e)} \frac{f_{ij}}{c_{ij}} T \leq T$ ，那么称这些链路是可调度的。用 $U(e)$ 表示其计算结果，即可以化简为

$$U(e) = \sum_{e_{ij} \in IL(e)} \mu_{ij} \leq 1, \quad \forall e \in E \quad (8)$$

3 算法设计

3.1 算法指导思想

本文提出的 CMLCA 算法分成 2 个阶段：第一个阶段是链路一组的绑定；第二阶段是组一信道分配。在第一阶段，将同一干扰域中所有链路按其流量负载进行降序排序，优先对负载较大的链路进行分组，并对各组的流量进行负载均衡。在分组过程中，需同时确保分配给节点的组数满足其接口数目的约束。在第二阶段，将每组的最大链路负载率进行降序排序，优先给链路负载率较大的组分配剩余带宽较多的信道，同一组内的所有链路分配同一信道。最后，为了使同一干扰区域中所有链路均可调

度，还须满足式(8)所定义的条件。

3.2 算法目标

从式(7)可知， μ_{ij} 跟链路 e_{ij} 的负载 f_{ij} 和干扰度 $|IL(e_{ij})|$ 成正比。若 $\mu_{ij} \leq 1$ ，说明该链路容量能够满足其业务带宽的需求。 μ_{ij} 越小，说明链路的剩余带宽就越多，则越有利于接纳其他新的业务请求。也就是说网络在传输数据时应尽量使用带宽资源较充裕的信道，少使用带宽资源较紧张的信道，以达到网络中各信道间的负载均衡。因此，考虑到链路的流量负载及各信道在传输数据流量时的负载均衡，在信道分配时需要为 μ_{ij} 进行一个极小值的优化工作，即负载均衡的目标是

$$\text{Minimize } \mu_{ij}, \quad \forall i, j \in V, e_{ij} \in E \quad (9)$$

CMLCA 算法在整个信道分配过程中对网络最大负载率干扰域内的链路进行极小值的优化，保证信道带宽分配在链路上的容量能够满足其业务的需求。因此，CMLCA 算法的目标函数为

$$\text{Minimize } (\max_{e \in E} \sum_{e_{ij} \in IL(e)} \mu_{ij}), \quad \forall i, j \in V, \forall e \in E, e_{ij} \in E \quad (10)$$

3.3 算法描述

如前所述，CMLCA 算法分成 2 个阶段。

在第一阶段算法中，使用 L_{ij} 表示分配给链路 e_{ij} 的组，对任意的一个节点 $i \in V$ ， $neigh(i)$ 表示节点 i 所有邻居节点集合。 ζ 表示所有组的集合， $\zeta(i)$ 则表示分配给节点 i 的组集合， g 代表组号。每经过一轮迭代，就有一个节点的所有链路将被分配到相应的组中。在第二阶段算法中， $N(g)$ 表示链路分配了组 g 的相关终端节点的集合。

第一阶段算法的核心过程描述如下。

步骤 1 将 $G(V, E)$ 中每个节点 i 的链路 e_{ij} ($j \in neigh(i)$) 按流量降序排序，依次进行分组，并使每个节点链路的分组数不大于该节点的接口数。

步骤 2 按以下对链路 e_{ij} 进行分组。

- 1) 如果 $|\zeta(i)| < R(i)$ 、 $|\zeta(j)| < R(j)$ ，则为链路 e_{ij} 分配一个新组 $g(g \in \zeta)$ ；
- 2) 否则，选择一个组 $g(g \in \{g | g \in (\zeta(i) \cup \zeta(j))\})$ ，计算其 μ_{ij} 值；若 μ_{ij} 最小，则为链路分配组 g 。

步骤 3 对 WMN 所有的链路按照步骤 2 进行分组，并返回所有链路的分组结果。

任意链路 e_{ij} 在选择和分配上都优先选择满足 $\min \mu_{ij}$ 的组。在算法的执行过程中，实现 $\min \mu_{ij}$ 的

约束条件为

- 1) $\sum_{g \in \zeta} x_{i,g} \leq R(i) \quad \forall i \in V$
- 2) $\sum_{g \in \zeta} y_{e,g} = 1 \quad \forall e \in E$
- 3) $x_{i,g} + x_{j,g} \geq 2y_{e,g} \quad \forall e = i \leftrightarrow j \in E, g \in \zeta$
- 4) $\mu_{ij} \leq 1 \quad \forall i, j \in V$
- 5) $\mu_{ij} = \frac{f_{ij}}{B} \cdot (1 + |IL(e_{ij})|) \quad \forall i, j \in V, e_{ij} \in E$

其中，二元变量 $x_{i,g}$ 、 $y_{e,g}$ 分别表示节点、链路与组之间的约束关系， $x_{i,g}$ 、 $y_{e,g} \in \{0,1\}$ 。当 $x_{i,g}$ 或 $y_{e,g}$ 为 1 时，表示节点 i 或链路 e 分配了组 g ，否则，表示没有分配。1) 式表示分配给节点 i 的组数不大于该节点的接口数；2) 式表示任意一条链路 e 最多只能分配到一个组 g 中；3) 式则表示一条链路分配了组 g 的必要条件是链路的 2 个终端节点同时分配了组 g ；4) 式表示链路容量能够满足业务带宽需求的必要约束条件。

第二阶段算法的核心过程描述如下。

步骤 1 计算每个组中所有链路干扰域内的负载值，即计算 $U(e) = \sum_{e_{ij} \in IL(e)} \mu_{ij}$ ，并将每组的最大链路负载率进行降序排序，依次进行信道分配。

步骤 2 若组 g 中的最大链路负载率为当前所有组中的最大值，则选择当前剩余带宽最多的信道分配给组 g 内的所有链路，并将选择结果发送给其他组；否则，等待接收网络中的信道选择信息，参加下一轮的信道分配。

步骤 3 重复步骤 2，依次分配直至完成。

4 仿真实验

采用 NS2^[9] 对实验进行仿真。在仿真场景中，将网络的节点数配置为 25，并以网格状均匀分布在场景大小为 1 000m × 1 000m 范围内，传输距离和干扰距离分别为 250m 和 500m。为每个节点配置 2 个射频，网络中可以使用 12 个无重叠信道。同时，在网络中设有 2 个网关节点，分别为节点 8 和节点 16，网络拓扑与图 3、图 4 一致。随机选取其他节点作为业务源并产生业务，每个业务源的流量取值为 0~500kbit/s 之间的随机数，仿真时间为 20s。

实验主要以网络吞吐量、端到端时延、分组丢失率、网络信道负载作为性能指标，对 CMLCA 算法与 CMCA 算法进行分析与比较，分析 2 种

算法的网络吞吐量、端到端时延、分组丢失率随网络业务流数目增加的变化情况，对比 2 种算法网络中各信道的负载情况，以证明 CMLCA 算法的有效性和优越性。实验结果如图 1~图 4 所示。

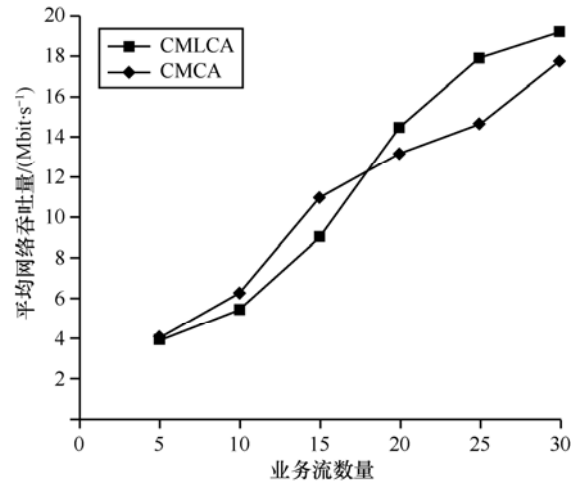


图 1 网络吞吐量随业务流数目的变化情况

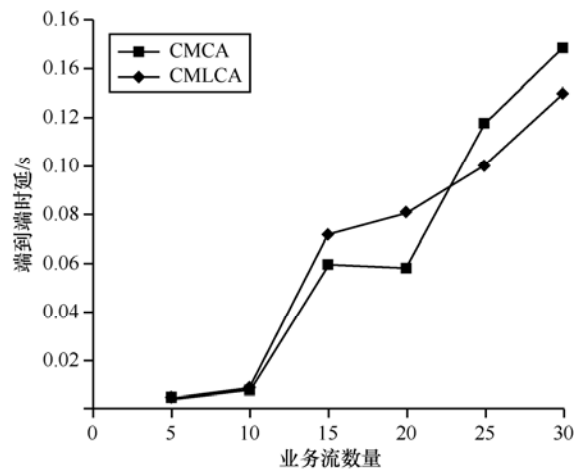


图 2 网络端到端时延随业务流数目的变化情况

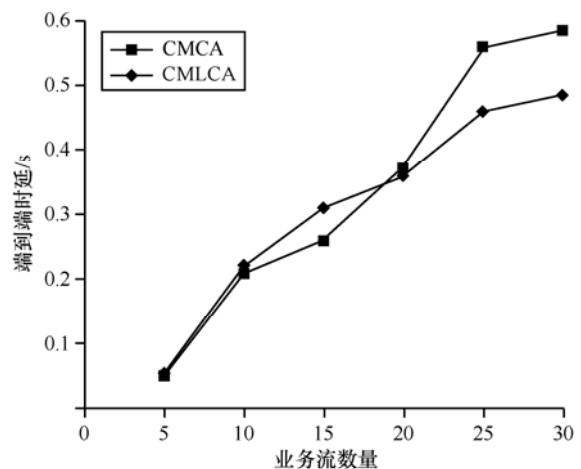


图 3 网络分组丢失率随业务流数目的变化情况

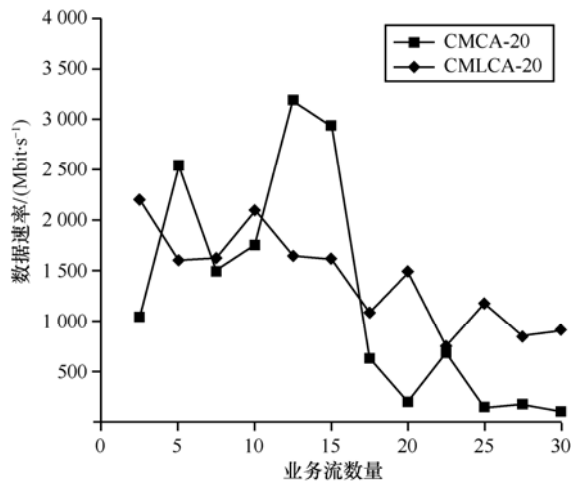


图4 信道负载情况比较

图1给出了CMLCA算法和CMCA算法在不同网络负载情况下所获得的网络吞吐量。从图中可知,当网络业务流数目为5时,2种算法获得的网络吞吐量相差很小。随着业务流数目的增多,CMCA算法在网络负载较轻时获得的网络吞吐量比CMLCA算法的要好,但当业务流数目增加至20及以上时,CMLCA算法却获得更好的网络性能,这是因为CMLCA算法是一种负载均衡的信道分配算法,该算法首先根据链路的负载情况进行分组,对各组的流量负载进行均衡,以缩小各组间负载的差异,最后再根据每组的负载程度进行相应的信道分配。因此,在CMLCA算法中,各信道的负载趋向平均。而CMCA算法在信道分配时并未考虑各信道的利用情况,当网络负载加重时,算法的信道分配不能根据网络业务流量的变化进行相应调整,致使部分信道负载过重,造成网络拥塞,影响网络的传输性能。

图2给出CMLCA算法和CMCA算法在不同网络负载下端到端时延的变化情况。整体来看,2种算法的时延都随着网络负载的增加而增大。在网络负载较轻时,CMCA算法的时延比CMLCA算法要小,网络性能较好。这是因为CMCA算法在分配信道时以最小化网络干扰为目标,因此各信道间的干扰相对较小,网络数据传输速率较高,数据分组的传输时延较低。但当网络负载加重时,CMCA算法不能较好地适应网络业务流量的变化,传输时延迅速增大,网络性能比CMLCA算法要差。

图3显示了CMLCA算法和CMCA算法在不同网络负载下网络分组丢失率的变化情况。从实验结果来看,2种算法的分组丢失率都随着网络负载

的增加而增大。在网络负载较轻时,2种算法的网络分组丢失率都较小。网络业务流数目增多时,CMLCA算法的网络分组丢失率相对较低,网络性能较好。

图4显示了当网络业务流数目为20时2种算法的信道负载情况。从图中可以看出,CMCA算法的信道2、5、6负载较重,而信道8、10、11、12的负载却很轻,这是因为CMCA算法是一种以最小化干扰为目标的信道分配算法,分配信道时链路优先选择干扰较小的信道,从而忽略对各信道的负载进行均衡。因此,当网络负载较重时,CMCA算法中部分信道负载过重而造成网络拥塞,网络性能较差。而CMLCA算法中各信道的负载趋向平均,这是因为CMLCA算法在信道分配时充分考虑了链路和信道的负载情况,从而使网络中各信道的负载比较均衡,不会出现负载过重的信道,因此在网络负载较重时也能获得较好的性能。

5 结束语

为了减少网络数据分组的丢失,从而为业务提供更好的QoS保证,本文综合考虑了无线mesh网络各信道间的负载均衡问题,提出了一种基于最大流的无线mesh网络负载均衡信道分配算法。该算法将信道分配过程分成2个阶段:在第一阶段中对所有链路进行分组,对各组的流量负载进行均衡,缩小各组的负载差异;在第二阶段优先给链路负载率较大的组分配剩余带宽较多的信道,同一组内的所有链路分配同一信道,这样可以避免在本阶段信道分配时由于节点接口数目的约束而引起算法的重复递归迭代,提高了信道分配的效率,防止了“涟漪效应”。实验结果证明,该算法较好地平衡了网络信道负载,在网络业务较重的情况下还能获得较好的网络性能。

参考文献:

- [1] 葛志辉,李陶深,张继成. 无线mesh网络逐层信道分配策略研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2010,35(6):13-17.
GE Z H, LI T S, ZHANG J C. Research on channel assignment algorithm for wireless mesh networks[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2010,35(6):13-17.
- [2] RANIWALA A, GOPALAN K, CHIUH T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2004, 8(2):50-65.

- [3] TANG J, XUE G, ZHANG W. Interference-aware topology control and QoS routing in multi-channel wireless mesh network[A]. Proceedings of ACM MobiHoc'05[C]. Urbana-Champaign, Illinois, USA, 2005. 68-77.
- [4] CHEN Y Y, LIU S C, CHEN C. Channel assignment and routing for multi-channel wireless mesh networks using simulated annealing[A]. Proceedings of IEEE Globecom[C]. San Francisco, California, USA, 2006.1-5.
- [5] RAD H M, WONG V W S. Congestion-aware channel assignment for multi-channel wireless mesh networks[J]. Computer Networks, 2009, 53(14): 2503-2516.
- [6] 毕坤, 顾乃杰, 任开新等. 混合式无线 mesh 网络中信道分配算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(5):812-816.
BI K, GU N J, REN K X, *et al.* Research on channel assignment algorithm in hybrid wireless mesh networks[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2009, 30(5):812-816.
- [7] 葛志辉, 李陶深, 韦亚欢. 一种新的基于最大流的无线 mesh 网络信道分配算法[J]. 电信科学, 2011, 27(12): 53-56.
GE Z H, LI T S, WEI Y H. A new max-flow based channel assignment algorithm for wireless mesh network[J]. Telecommunications Science, 2011, 27(12): 53-56.
- [8] AOUN B, BOUTABA R, KENWARD G. Analysis of capacity improvements in multi-radio wireless mesh networks[A]. Proceedings of Vehicular Technology Conference[C]. Melbourne, Australia, 2006. 543-547.

[9] NS2[EB/OL]. www.isi.edu/nsnam/ns/.

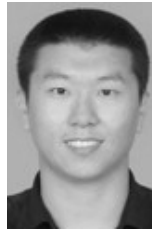
作者简介:



李陶深 (1957-), 男, 广西南宁人, 博士, 广西大学教授, 主要研究方向为无线 mesh 网络、分布式数据库和网络性能优化。



韦亚欢 (1985-), 女, 壮族, 广西宜州人, 硕士, 主要研究方向为无线 mesh 网络。



葛志辉 (1978-), 男, 河北唐山人, 博士, 广西大学副教授, 主要研究方向为无线 mesh 网络和协议性能优化等。