



研究与开发

基于图转换的无线接入点关联优化算法

陶雯¹, 沈艳², 管昕洁², 万夕里²

(1. 江苏第二师范学院数学与信息技术学院, 江苏 南京 210013;

2. 南京工业大学计算机科学与技术学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 无线接入点关联是 Wi-Fi 系统中的一个基础问题。已有的研究主要集中在考虑带宽容量约束条件下的各种 AP 关联问题。这些研究没有从用户的角度考虑带宽需求, 从用户的带宽需求出发, 以最多带宽分配的 AP 关联为优化目标, 考虑混合型网络架构下的 Wi-Fi 系统的无线接入点关联优化问题。与已有研究方法不同, 通过图转换技术, 并将问题转化为流图上的优化问题, 提出基于网络流的优化求解算法, 并从理论上证明算法的最优性。最后, 通过对比实验进一步证明了算法的优越性。

关键词: 无线接入; 图转换; 接入点关联

中图分类号: TP301

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017310

An association optimization algorithm for wireless access points based on graph transformation

TAO Wen¹, SHEN Yan², GUAN Xinjie², WAN Xili²

1. College of Mathematics and Information Technology, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 210013, China

2. College of Computer Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China

Abstract: Wireless access point association problem is one of the fundamental problems for Wi-Fi systems. Existing studies focus on the AP association problems under the bandwidth capacity constrain, without considering bandwidth demand for users. Considering the user bandwidth demands, the access point association problem for a Wi-Fi system under hybrid network architecture was studied, with the objective of maximum bandwidth allocation. Different from existing studies, by utilizing graph transformation techniques, this optimization problem was transformed to a network flow optimization problem on a flow graph. Then, an algorithm was proposed based on the maximum network flow problem. Theoretic proof for the optimality of the algorithm was presented and simulations results further validated the superiority of the proposed algorithm.

Key words: wireless access, graph transformation, AP association

收稿日期: 2017-08-05; 修回日期: 2017-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61602235); 江苏省自然科学基金资助项目 (No.BK20161007)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61602235), The National Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (No.BK20161007)



1 引言

IEEE 802.11 技术（通常称为 Wi-Fi）因其具有高带宽、低成本等优势，随着社会的发展，基于 IEEE 802.11 协议系列的无线局域网已在校园、工厂等各种场景下不断得到部署。智能设备的普及更进一步推动了 Wi-Fi 的普及，并深入人们的生活和工作的各个方面。在企业层面，面向不同应用的 Wi-Fi 应用系统不断被推出。尽管 Wi-Fi 技术有着很多优点，随着其大规模的应用，其本身也面临很多技术上的挑战，如带宽优化、接入点的最优放置等问题。在这些挑战中，如何在给定 Wi-Fi 系统资源的前提下，使得系统能够服务更多用户是实际应用中经常考虑的一个重要问题。对该问题的深入研究，可以进一步提高 Wi-Fi 系统在实际应用的利用效率。

在实际的 Wi-Fi 的应用中，默认情况下，设备用户通过接收信号强度指示（received signal strength indication, RSSI）判断 Wi-Fi 接入点（access point, AP）的信号强度，并选择信号强度最强的 AP 与之关联。这种方法不能合理分配用户到不同的 AP 上，容易造成部分 AP 过载，而其他 AP 关联的用户偏少，从而造成系统资源不能被充分利用，降低了系统整体关联的用户数目。此外，这种方法只是以信号强度来关联用户和 AP，而没有考虑到每个 AP 的容量是有限的，即所能容纳的用户数是一定的。因此，如何在 AP 容量有限的前提下，合理调度分配系统资源，从而提升系统整体可接入用户数量是 AP 关联领域的一个重要问题^[1]。

近年来，随着 Wi-Fi 的不断普及，Wi-Fi 在企业级别也有了广泛的应用。如在机场、校园校区、商场等规模较大的公共区域，Wi-Fi 基本实现全覆盖。在这类型的 Wi-Fi 系统中，多个 AP 通过高速有线网络连接到中央控制节点，这种混合型结构一般被称为半集中式结构^[1]。在这种混合型结构

下，多个 AP 之间可以通过骨干有线网络来分享接入设备相关信息，这使得系统可以及时集中收集当前在各个 AP 信号范围内的用户信息，使得中央控制节点拥有全局视图，为设计 Wi-Fi 资源分配提供有利条件。

本文将研究在这一混合型架构下的 Wi-Fi 中最大带宽分配的 AP 关联问题。已有一些研究^[1-3]探讨了该 AP 关联问题。这些研究主要研究在带宽容量约束条件下，如何寻求带宽分配最多的一种 AP 关联方案。但这些研究并没有考虑到用户的带宽需求，随着移动互联网的发展，为了获得更好的用户网络体验，如上网、打游戏以及看视频等，用户对所分配到的带宽有着一定的要求。基于此，本文考虑从用户带宽需求出发，研究该需求下的最大带宽分配的 AP 关联优化问题。参考文献[1]首先考虑了该问题，研究了单元带宽需求下的最大带宽分配的 AP 关联优化，给出一个贪婪启发式算法来求解该问题，但该算法并不能求得该问题的最优解。已有的关于带宽分配的 AP 关联问题基本都是 NP 难问题，而且主要是应用线性、非线性规划等相关方法来设计启发式算法或者近似算法。与已有研究的方法不同，本文提出用图的优化理论来解决此类问题，并探讨在某些条件下存在最优解的可能性。本文给出了在每个设备需求是单元带宽的假设下，在基于图的最优化网络流理论基础上，发现最大带宽分配的 AP 关联优化存在最优解，理论证明和实验结果也进一步验证了该算法的正确性。

2 相关工作

随着当前接入 Wi-Fi 用户数目大量增长以及多层次结构的 Wi-Fi 系统的部署，提升系统利用效率和接纳更多用户请求的问题越发具有挑战性。为解决此问题，学术界提出了各种场景下，面向不同优化目标的资源调度和分配关联算法。参考文献[1]提出了面向带宽分配的 AP 关联分配

算法。参考文献[2]建模 AP 关联问题, 并考虑负载均衡因素, 通过松弛和取整的方法, 设计了一个具有常数倍逼近度的分配算法。参考文献[4]提出了基于最少负载优先设备关联的启发式算法, 也就是设备优先选择负载最小的 AP 接入。参考文献[5]考虑了 AP 可以再关联的优化问题, 提出了在迁徙约束条件下的面向最大吞吐量的优化算法。参考文献[6]提出了基于可用容量的负载均衡的 AP 关联算法。

其他学者从均衡用户分配的资源思路出发, 提出了多种关联算法。参考文献[3]研究了多种异构客户场景 (IEEE 802.11a/b/g/n) 下, 通过二维马尔可夫模型预测设备的上下行吞吐量, 在此基础上, 以提高 MAC 效率为目标, 考虑平衡带宽和速率, 建模在线 AP 关联问题并提出一种在线 AP 关联方法。参考文献[7]考虑了单个设备可关联多个 AP 的情况, 并提出最优的面向多个 AP 传输速率策略, 并从理论上证明该算法的逼近度为 $4+\epsilon$ 。参考文献[8]提出了度量驱动的 WLAN 设计原则, 并以此为指导优化信道分配、AP 关联和 AP 功率控制等。参考文献[9, 10]研究了在软件定义的 WLAN 框架下的 AP 关联问题, 考虑了帧延迟、数据分组丢失等多种因素, 提出面向服务质量保证的 AP 关联方法。参考文献[11]提出集中式的 AP 关联策略模型, 并应用蚁群算法求解 AP 关联解。

3 网络模型与问题描述

3.1 网络模型与定义

假设在混合型的 Wi-Fi 网络中, 有 n 个 AP 节点 $V=\{AP_1, AP_2, \dots, AP_n\}$, m 个移动设备 $U=\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$, 网络中所有的 AP 通过一个有线的无线骨干网连接。所有 AP 可以通过该有线网络进行通信。每个 $U=\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 的信号范围是有限的, 用 U_i 表示该信号覆盖范围。所有在 U_i 范围内的移动设备表示为 A_i 。网络中每个 AP_i

能接收到在自身信号范围之内内的所有移动设备的关联请求。假设每个请求关联的移动设备 j 对带宽的需求为 r_{ij} 。此外, 假设每个移动设备至少有一个可选的 AP。注意, 在任何时刻, 每个移动设备只能关联一个 AP。

图 1 的场景中有 3 个 AP $\{AP_1, AP_2, AP_3\}$ 和 4 个移动设备 $\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$, 虚线圆圈为 AP 的信号覆盖范围。由图 1 可见, d_2 既被 AP_1 的信号覆盖, 也被 AP_2 的信号覆盖, 因此, d_2 的候选 AP 集是 $\{AP_1, AP_2\}$ 。类似的, d_4 的候选 AP 集是 $\{AP_2, AP_3\}$ 。

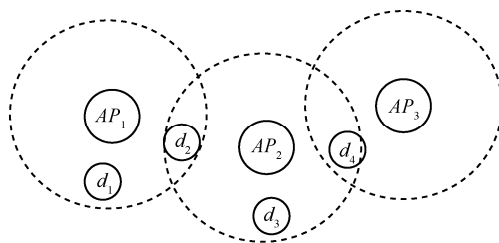


图 1 3 个 AP 和 4 个移动设备

假设 AP_i 的带宽容量为 C_i , 并且任何移动设备只需要 AP 能满足其最小的带宽即可关联该 AP。定义 L_i 为第 i 个 AP 的负载。为了方便, 与已有研究一样^[1], 本文假设每个移动设备只需要候选 AP 满足 1 个单元的带宽要求, 即可关联该 AP。因此, 第 AP_i 的负载 L_i 为该 AP 关联的移动设备的数目, 而每个 AP_i 的容量 C_i 则为该 AP_i 能关联的移动设备最大数目。因此, 在此假设下, 最终所有关联上的设备所获得的总带宽与设备总的连接数等价。

如果设备 d_j 关联到 AP_i , 定义 $a_{ij}=1$, 否则 $a_{ij}=0$ 。此外, 本文也用 $\langle u_j, v_i \rangle$ 配对来表示设备 j 关联到 AP_i 。

3.2 问题描述

定义 1 (最大 AP 关联问题) 给定一个混合型 Wi-Fi 网络, 该网络有 n 个 AP 节点和 m 个移动设备节点。假设每个移动设备候选的 AP 节点是已知的, 最大 AP 关联问题就是求解一种 AP 关联算法使得最终网络中 AP 所关联的设备数目最多。



该问题可以形式化为如下数学式:

$$\max \sum_{i \in [1, n]} L_i = \max \sum_{j \in [1, m]} a_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in [1, m]} a_{ij} \leq C_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i \in [1, n]} a_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, m$$

$$a_{ij} \in \{0, 1\} \quad (3)$$

目标函数中的 $L_i = \sum_{j \in [1, N]} a_{ij}$ 表示第 i 个 AP 的负

载。式 (2) 是容量限制约束条件, 也就是每个 AP 最终的负载必须要小于或等于该 AP 的容量。式 (3) 是每个移动设备连接数目限制, 也就是每个移动设备最多只能关联一个 AP。注意, 一个 AP 可以同时被一个或多个移动设备关联。

定义 2 (二分图 $G(U \cup V, E)$) $G(U \cup V, E)$ 是一个二分图 (二分图实例如图 2 所示), 其中 U 和 V 分别是二分图上左部分和右部分点的集合, E 是 U 和 V 之间的边的集合。对于每一个 AP 节点 AP_i , 在 V 中创建一个节点 i ; 对于每一个移动设备 j , 在 U 中创建一个节点 j ; 若 AP 节点 AP_i 是移动设备 j 的关联候选节点, 则在 E 中添加一条从 i 到 j 的有向边 (i, j) 。

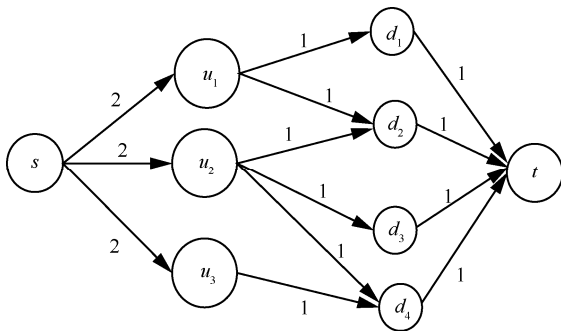


图2 图1对应的流图 G'

定义 2 实际上是将 AP 关联问题映射到对应的二分图 $G(U \cup V, E)$ 上, 是下述图转换和相应算法设计的基础。

定义 3 如果一个 AP 关联方案满足式 (2)、式 (3), 则称该关联方案为最大 AP 关联问题的可行解。

4 算法设计与分析

本节给出求解最大关联问题的最优算法以及相关最优性的证明和分析。该算法的思路是将该 AP 关联问题转化为图上的优化问题, 从而应用图的优化理论来求解最优解。首先将最大 AP 关联问题转化为二分图上的优化问题, 然后给出优化算法来求解该优化问题。

值得注意的是, 本文中的最大 AP 关联问题不能采用经典的二分匹配算法来求解, 因为对于每一个 AP 节点 (即二分图中 U 中的节点) 是可以关联多于一个的移动设备 (即二分图中 V 中的一个节点), 而二分匹配问题中 U 有且仅能与 V 中一个节点匹配。为解决此问题, 本文提出一种图转换方法, 将最大 AP 关联优化问题转化为对应的图优化问题, 从而可以应用网络流优化算法取得最优解。

4.1 基于网络流的 AP 关联算法

首先本文给出如何构造最大 AP 关联问题二分图: 创建一个二分图 $G(U \cup D, E, W)$, 对每个 AP_i 节点和移动设备 d_j , 分别在 U 和 D 中创建一个节点 i 和 j 。如果移动设备 j 在 AP_i 的覆盖范围内, 也就是 AP_i 是移动设备 d_j 的候选节点, 则在 E 中创建一条从 i 到 j 的有向边 (i, j) , 并设置 (i, j) 的权重为 $W(i, j) = 1$ 。

下面给出基于网络流的最大 AP 关联算法。

算法 1 基于网络流的 AP 关联算法

输入: AP 集合 U , 移动设备集合 U , 每个移动设备的候选 AP 集合。

输出: 一组移动设备关联 AP 的解 $\langle a_{ij} \rangle$ 。

步骤 1 根据上述描述, 构造最大 AP 关联问题二分图 $G(U \cup D, E, W)$ 。

步骤 2 在 G 的基础上建立流图 G' (如图 2 所示), 在 $G(U \cup D, E, W)$ 上额外添加一个虚拟源点 S 和终点 T , 对 U 中的每个顶点 i , 连接源点 S 与顶点 i 形成有向边 (S, i) , 设置该边的权重为 C_i ; 对 V 中顶点 j , 连接 j 与终点 T 形成有向边 (j, T) ,

并设置该边的权重为 $W(j,T)=1$ 。

步骤 3 应用经典最大网络流 Push-Relabel 算法^[14,15]在新构造的流图 G' 上, 求解出 G' 上的最大流 f' 。用 $f'(i,j), i \in U \& j \in V$ 表示最大流解 f' 在边 (i,j) 最大流。

步骤 4 如果 $f'(i,j)=1, i \in U \& j \in V$ 则赋值 $a_{ij}=1$, 即将移动设备 d_j 关联到 AP_i 。

4.2 算法分析

引理 1 在图 2 中, 若所求得从源点 S 到终点 T 的最大流经过边 (u_i, d_j) , 则该边对应的最大流必定为 1, 即 $f(u_i, d_j)=1$ 。

证明: 根据网络流整数流性质^[12], 如果网络中所有边的权重 (或者容量) 为整数, 则该网络的最大流一定为整数流。算法 1 中所构造的流图 G' 的边的权重均为整数, 因此最大流经过 (u_i, d_j) 一定是整数。又因为 (u_i, d_j) 边的权重均为 1, 所以 (u_i, d_j) 若有最大流经过, 其最大流必定为 1, 即 $f(u_i, d_j)=1$ 。

引理 2 对于任何 $d_j \in D$ 节点, 若一个从源点 S 到终点 T 的流经过该节点, 则 $\max_{u_i \in U} \sum f(u_i, d_j)=1$ 。

证明: 对于任何 $d_j \in D$ 节点, 因为 (d_j, T) 的权重为 1, 根据网络流平衡性质^[13], 任何流入 d_j 的流的总和一定为 1, 因此引理得证。

定理 1 如果有一个可行性解 Γ 中, 有 k 个移动设备与 AP_i 节点关联, 则对应流图 G' 上存在一个从源点 S 到终点 t 的流, 且该流值为 k 。反之亦成立。

证明: 一个可行解 Γ 中有 k 个移动设备与 AP_i 关联, 则在流图 G' 上可以存在 k 条 (u_i, d_j) 边的流值为 1。因为源点 S 与每个 u_i 相连, 并且每个 d_j 与终点 T 相连, 根据网络流平衡性质^[13], 必定存在从源点 S 到终点 T 的流 f , 且 f 通过这 k 条 (u_i, d_j) 边, 且该流值为 $f(s, t)$ 。又因为可行解 Γ 满足式 (2), 也就是可行解满足每个 AP 的容量约束条件, 而边 (s, u_i) 上的权重则对应 AP 的容量, 因此, 该流

f 一定满足流图 G' 上的权重限制条件。

反之, 对于一个流值为 k 的从源点 S 到终点 T 的流值 $f(s, t)$, 结合引理 1 和引理 2, 可知对于任何 $d_j \in D$ 节点, 只有一条从 $u_i \in D$ 出发的边的流经过 d_j , 且 $f(u_i, d_j)=1$ 。因为 $f(s, t)=k$, 根据流平衡性质, 则必定有 k 条 (u_i, d_j) 边的流值为 1。也就是有 k 条 $f(u_i, d_j)=1$, 对应于 k 个移动设备与 AP 节点关联的方案, 并且该方案满足式 (3)。又因为 (s, u_i) 边的权重对应于 AP 的容量约束, 所以该关联方案满足式 (2), 因此该关联方案是一个有 k 个移动设备被关联的可行解。

定理 2 最大 AP 关联问题可以转化为流图 G' 上的最大网络流问题。

证明: 定理 1 揭示了单个 AP 关联问题的可行解与流图 G' 上的单源单汇流一一对应关系, 并且可行解的值对应于图 G' 的流值。值得注意的是, 最大 AP 关联问题的解是由一系列可行解构成, 且最大带宽 AP 关联问题的设备连接数值是这些可行解相应的设备连接数值之和。从而, 最大 AP 关联问题的解值 (设备连接数目) 对应于流图 G' 上的所有的单源单汇流值之和, 也就是对应于流图 G' 上的从源点 S 出发到终点 T 的网络流。因此, 最大 AP 关联问题解的最大值对应流图 G' 上的最大网络流。

定理 3 最大 AP 关联问题可以在 $O((m+n)^3)$ 时间内求的最优解。

证明: 算法 1 的复杂度是由最大网络流算法主导, 因此网络流算法的复杂度决定了算法 1 的复杂度。如果采用经典的 Push-Relabel 算法^[14,15], 则算法 1 复杂度为 $O(r^3)$, 其中, r 为流图 G' 中节点的个数。因此算法 1 的复杂度为 $O((m+n)^3)$ 。

4.3 示例

本节给出一个示例来演示算法 1。针对图 1 中的部署场景, 假定每个 AP 的容量为 2, 也就是 $C_i=2, (i=1,2,3)$ 。根据算法步骤 1 和步骤 2, 可以得到图 2 中的流图 G' 。在图 2 中, $\{u_1, u_2, u_3\}$ 分别



对应于 3 个 AP, $\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$ 则对应于 4 个移动设备。 G' 中依附在边上的数值对应于边的权重, 其中对每个 $AP_i (i=1,2,3)$, $w(S, i) = C_i = 2$ 。其他边的权重均为 1。

应用最大网络流算法, 可求得该流图 G' 的最大流 $f=4$, 如图 3 所示, 加粗的边为网络最大流经过的边, 依附在边上加粗的数字则表示最大流经过该边的流值, 如边 (s, u_1) 的流的值为 2, 也就是 $f(s, u_1)=1$ 。根据算法 1 的步骤 4, 任何 (u_i, d_j) 边上流的值为 1, 则关联 AP_i 和移动设备 d_j 。因此, 从最大流流经 (u_i, d_j) 边的结果可以得到: AP_1 与移动设备 d_1 和 d_2 关联, AP_2 和移动设备 d_3 关联, AP_3 和移动设备 d_4 关联。

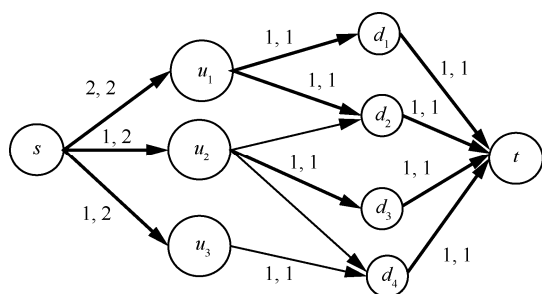


图 3 图 2 对应的流图 G' 的最大网络流

5 实验与分析

5.1 实验参数设置

为进一步验证本文所提算法的性能, 通过实验与参考文献[1]中提出的贪婪算法对比, 通过对 AP 的关联设备数目、AP 关联数目的分布以及 AP 的利用率对比, 对算法性能进行实验分析和评估。

实验中有 n 个 AP 节点, m 个移动设备。每个 AP 节点的容量是 C , 实验中假设每个 AP 节点的带宽容量相同。本实验通过 AP 关联移动设备数目来判断本文所提出的算法的有效性和合理性。

为了更全面地突出本文算法的有效性, 从以下几个方面进行了仿真实验。

(1) 固定 AP 节点的数量为 5, 且每个 AP 节点的带宽容量为 5, 设置不同的移动设备数量, 分

别为 10、15、20, 随机运行 10 次, 比较本文算法与贪婪算法的实验结果。

(2) 固定移动设备数为 10, 每个 AP 节点的带宽容量为 5, 设置不同的 AP 节点数, 分别为 5、6、7, 随机运行 10 次, 将本文提出的算法与贪婪算法进行比较。

(3) 固定 AP 节点数量为 5, 且每个 AP 节点的带宽容量为 5, 改变移动设备的数量, 分别为 5、10、15、20、25、30、35、40、45、50, 比较这两个算法的结果。

(4) 固定 AP 节点数为 6, 设置不同的 AP 节点的带宽容量, 分别为 5、6、7, 随着移动设备逐次增加的情况下 (移动设备数量分别为 5、10、15、20、25、30、35、40、45、50), 比较本文提出的算法与贪婪算法的实验结果。

(5) 比较两算法在 3 种不同的 AP 节点数和移动设备数的条件下, AP 节点与移动设备连接分布情况。

(6) 在 AP 节点数为 5, 容量为 5 的条件下, 随着移动设备数量逐次增加, 对两个算法中 AP 节点的利用率进行了比较。

5.2 实验结果

根据要求设置参数, 进行仿真实验。在实验中将本文的优化算法与已有的贪婪算法进行比较。针对本文求最大 AP 联结数的问题, 使用贪婪算法将其分成每个 AP 节点尽可能多地连接移动设备的子问题。在给定的一个部署场景中, 将每个 AP 节点与移动设备连接的数量按降序排列, 在确保每个移动设备只连接一个 AP 节点的前提下, 按之前排列的顺序依次留下原部署场景中的 AP 节点与移动设备的连接状态, 最后计算得到 AP 联结数。

本文首先设置 AP 节点的数量为 5, 每个 AP 节点的容量为 5。然后, 设置不同的移动设备数量, 分别运行基于网络流的 AP 关联算法和贪婪算法。运行 10 次, 并且将每次这两个算法生成的 AP 关联设备的数目进行比较。图 4 给出了当移动设备数量为 10、

15、20 时的比较结果,可以看出,使用基于网络流 AP 关联算法得到的 AP 关联数普遍高于贪婪算法。

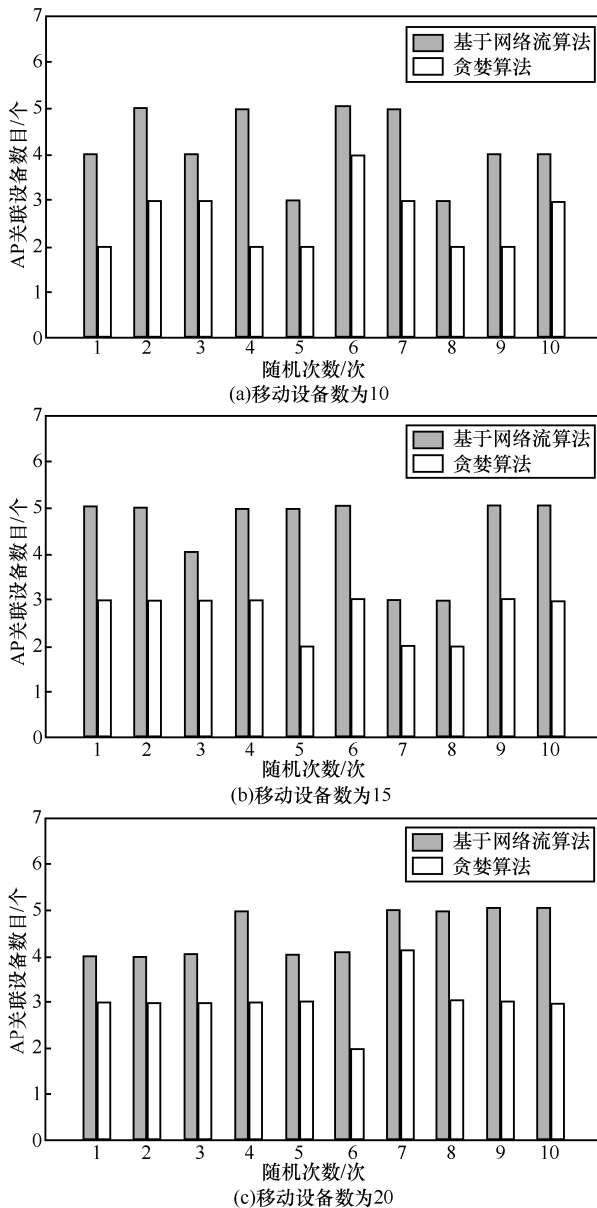


图4 AP 节点数为 5, 不同移动设备数量下运行 10 次的 AP 关联数

接下来,设置移动设备数量为 10, 每一个 AP 节点的容量为 5, 对不同数量的 AP 节点分别运行基于网络流 AP 关联算法和贪婪算法, 每一组实验运行 10 次, 对两个算法生成的 AP 关联设备的数目进行比较。图 5 给出了 AP 节点数为 5、6、7 时的比较结果。从图 5 可以看出, 基于网络流 AP

关联算法生成的 AP 关联设备的数目总是大于贪婪算法的, 且大多数时候是远大于贪婪算法的。这个结果与本文算法结论一致, 有效验证了本文算法的性能高于贪婪算法性能。

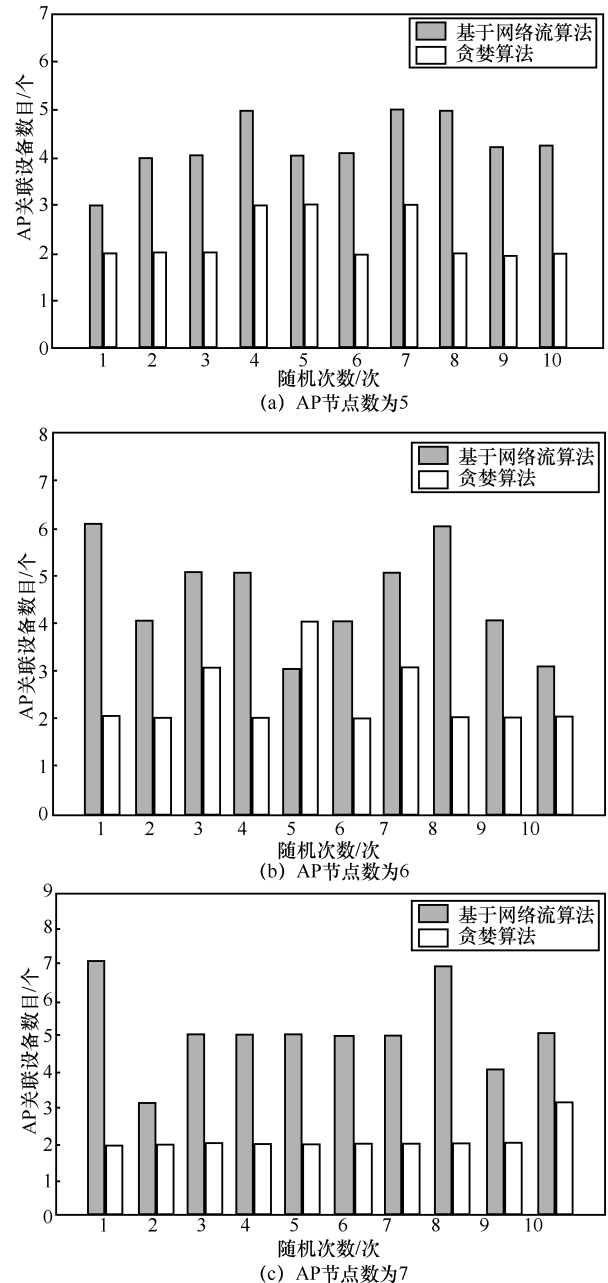


图5 移动设备数为 10、AP 节点数不同时运行 10 次的 AP 关联数

为了更进一步验证本文算法的有效性, 还进行了如下实验, 设置 AP 节点数为 5, 且每个 AP 节点的容量为 5, 移动设备数量依次为 5、



10、15、20、25、30、35、40、45、50，分别观察两种算法运行下生成的 AP 关联设备的数目，结果如图 6 所示。可以看到，在相同的 AP 数量和移动设备数量下，基于网络流 AP 关联算法得到的 AP 关联数始终大于贪婪算法得到的 AP 关联数，如此进一步验证了所提算法更为有效性。

另外，还改变 AP 节点的容量值进行两个算法的对比实验。实验中设置 AP 节点的数量为 6。然后设置不同的 AP 节点容量，分别运行基于网络流 AP 关联算法和贪婪算法，在移动设备数量逐次增加的情况下比较两种算法生成的 AP 关联设备的数目。图 7 给出了当 AP 节点容量为 5、6、7 时的比较结果。可以看到，在 AP 节点数为 6，且移动设备数量相同的时候，基于网络流 AP 关联算法得到的 AP 联结数大多数时候大于贪婪算法得到的 AP 联结数。另外还可以发现，在同一场景部署下，当该环境中的 AP 节点容量增大时，本文所提出的算法的性能明显优于贪婪算法。

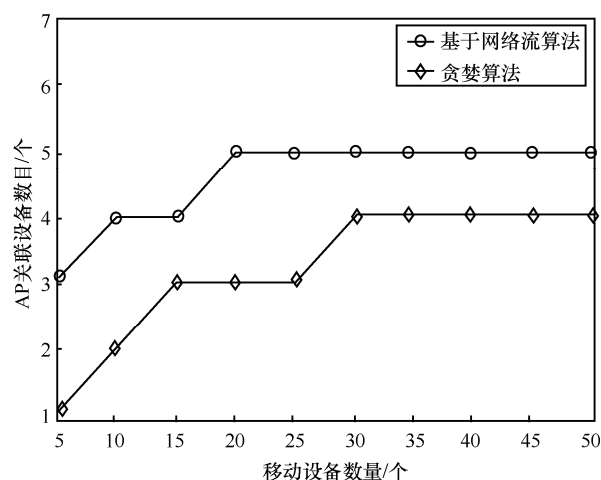


图 6 AP 节点数为 5，随着移动设备数量增加生成的 AP 关联数

接下来，分别运行基于网络流 AP 关联算法和贪婪算法，比较 3 种不同的 AP 节点数和移动设备数的条件下 AP 节点与移动设备连接分布情况。图 8 给出了 AP 节点数为 5，且每个 AP 节点的容量为 5，移动设备数为 10 的情况下，

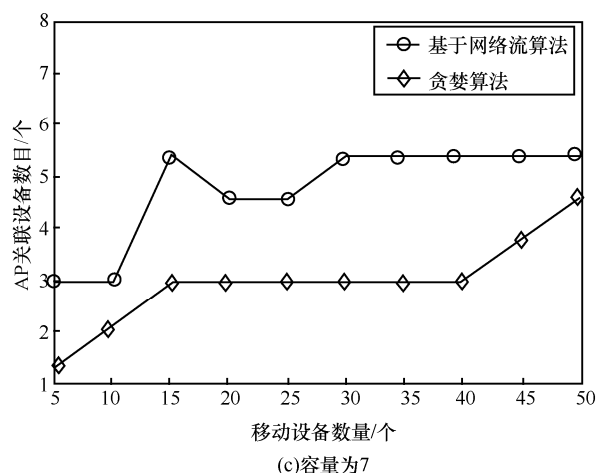
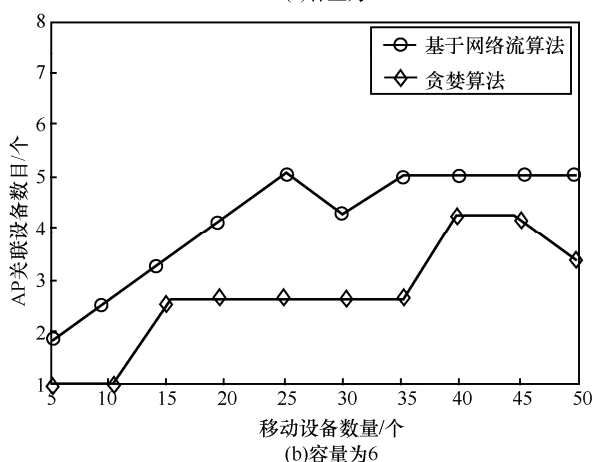
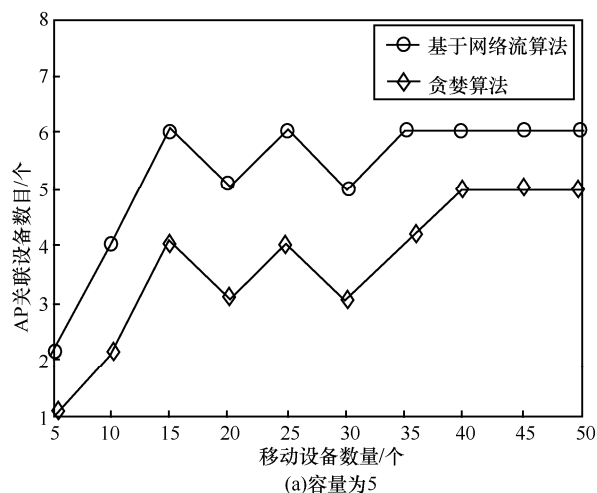


图 7 AP 节点数量为 6 时，不同容量下随着移动设备数量增加生成的 AP 关联数

AP 连接数的分布情况。从图 8 中可以看出，在基于网络流 AP 关联算法中每个 AP 节点都连接着相应数量的移动设备，而贪婪算法下第 3 个 AP 节点、第 4 个 AP 节点和第 5 个 AP 节点都

没有与移动设备相连接。所以很明显地得出本文提出的算法更为有效。另外,本文还分别进行了 AP 节点数为 6,且每个 AP 节点的容量为 5,移动设备数为 15 和 AP 节点数为 7,且每个 AP 节点的容量为 5,移动设备数为 20 的实验。结果分别显示在图 9 和图 10 中。结果与上述结论保持一致。

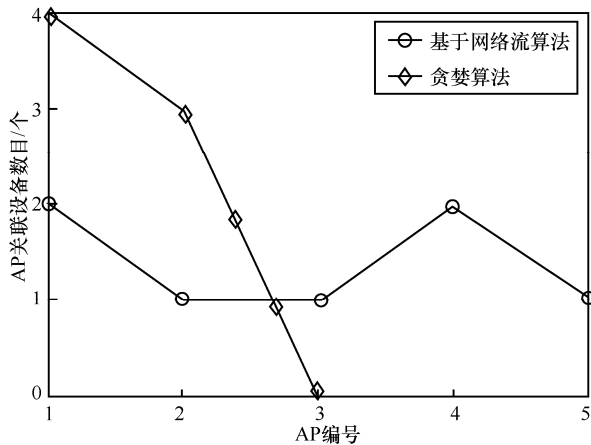


图 8 AP 节点数为 5, 移动设备数为 10 的 AP 连接数分布

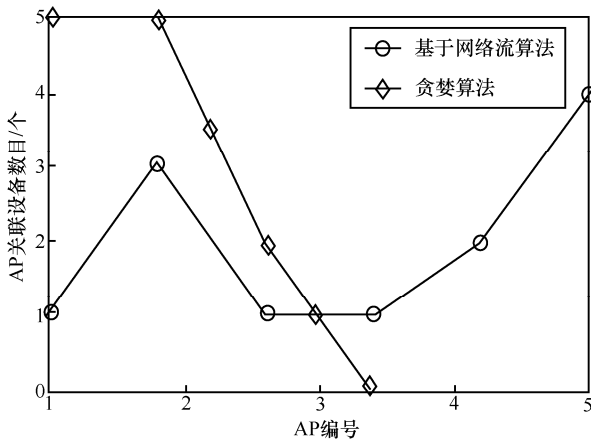


图 9 AP 节点数为 6, 移动设备数为 15 的 AP 连接数分布

此外,本文还对两个算法中 AP 节点的利用率进行了比较。图 11 给出了 AP 节点为 5,且每个 AP 节点的容量为 5,移动设备数量逐量递增的条件下两算法中 AP 节点的利用率情况。可以看出,基于网络流的 AP 关联算法下所得到的 AP 利用率一直高于贪婪算法,而且大部分情况下,AP 利用率为 100%。由此可以看出,本文提出的算法在 AP 利用情况上比贪婪算法更为高效。

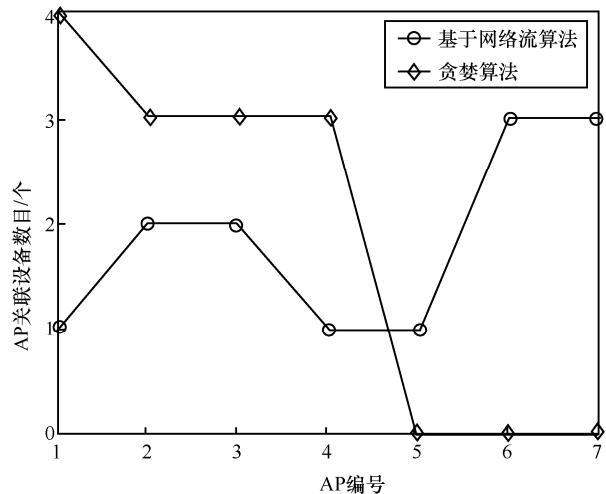


图 10 AP 节点数为 7, 移动设备数为 20 的 AP 连接数分布

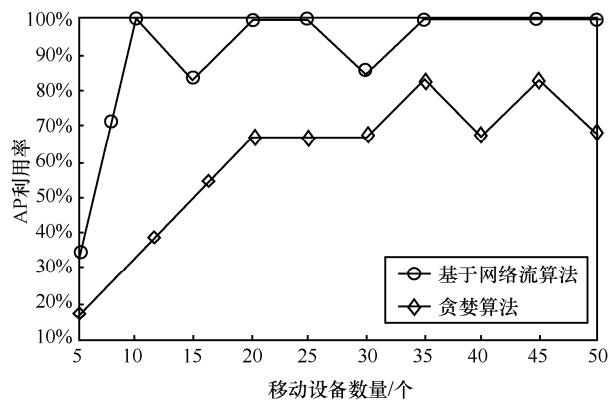


图 11 AP 节点数量为 5, 容量为 5 时随着移动设备数量增加生成的 AP 利用率

6 结束语

本文提出了在混合型架构下的一种面向最大连接数的 AP 关联算法。与已有 AP 关联方法不同,本文应用图优化方法来设计 AP 关联算法,提出图转换技术,设计流图,将该 AP 关联优化问题转化为流图上网络流优化问题,并从理论上证明了两个问题的等价性。在此基础上,应用网络流算法,提出基于网络流算法的最优 AP 关联算法。通过仿真实验,验证了该算法的有效性。

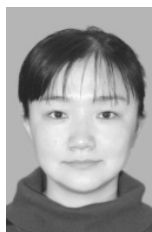
参考文献:

- [1] DANDAPAT S K, MITRA B, CHOUDHURY R R, et al. Smart association control in wireless mobile environment using max-flow[J]. IEEE Transactions on Network and Service Man-



- agement, 2012, 9(1): 73-86.
- [2] BEJERANO S J Y, HAN S J, LI L E. Fairness and load balancing in wireless LAN using association control[M]. New Jersey: IEEE Press, 2007: 560-573.
- [3] GONG D, YANG Y. On-line AP association algorithms for 802.11n WLANs with heterogeneous clients [J]. IEEE Transactions on Computers, 2014, 63(11): 2772-2786.
- [4] GONG H, KIM J. Dynamic load balancing through association control of mobile users in Wi-Fi networks[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(2): 342-348.
- [5] WONG W, THAKUR A, CHAN S H G. An approximation algorithm for AP association under user migration cost constraint[C]//The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, April 10-15, 2016, San Francisco, USA. New Jersey: IEEE Press, 2016: 56-62.
- [6] MURTY R, PADHYE J, CHANDRA R, et al. Designing high performance enterprise Wi-Fi networks[C]//The 5th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation, Alaska, USA, 2008: 342-349.
- [7] ABUSUBAIH M, WOLISZ A. An optimal station association policy for multi-rate IEEE 802.11 wireless Lans [C]//The 10th ACM Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems, October 22-26, 2007, Chania, Crete Island, Greece. New York: ACM Press, 2007: 34-40.
- [8] BROUSTIS I, PAPAGIANNAKI K, KRISHNAMURTHY S, et al. Measurement-driven guidelines for 802.11 WLAN design[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(3): 722-735.
- [9] SOOD K, LIU S, YU S, et al. Dynamic access point association using software defined networking[C]//2015 International Telecommunication Networks and Applications Conference, Nov 18-20, 2015, Sydney, Australia. New Jersey: IEEE Press, 2015: 230-238.
- [10] CHEN J, LIU B, ZHOU H, et al. QoS-driven efficient client association in high-density software defined WLAN [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, PP(99): 1-2.
- [11] 李克, 王换招, 张鹏, 等. 一种用户需求感知的无线接入点关联策略[J]. 软件学报, 2015, 26(2): 100-110.
- LI K, WANG H Z, ZHANG P, et al. User-demand-aware wireless access point association strategy[J]. Journal of Software, 2015, 26(2): 100-110.
- [12] PAPADIMITRIOU C H, STEIGLITZ K. Combinatorial optimization: algorithms and complexity[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1998.
- [13] CORMEN T H, LEISERSON C E, RIVEST R L, et al. Introduction to algorithms: 3rd edition[M]. Cambridge: MIT Press, 2009: 60-73.
- [14] WAN X, WU J, SHEN X. Maximal lifetime scheduling for roadside sensor networks with survivability k[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(11): 5300-5313.
- [15] CHERKASSKY B V, GOLDBERG A V. On implementing push-relabel method for the maximum flow problem[J]. Integer Programming and Combinatorial Optimization, 1995, 35(10): 157-163.

[作者简介]



陶雯 (1979-), 女, 江苏第二师范学院数学与信息技术学院讲师、CCF 会员, 主要研究方向为无线网络协议。

沈艳 (1984-), 女, 南京工业大学计算机科学与技术学院硕士生, 主要研究方向为网络优化。

管昕洁 (1984-), 女, 博士, 南京工业大学计算机科学与技术学院讲师, 主要研究方向为云计算和软件定义网络。

万夕里 (1982-), 男, 博士, 南京工业大学计算机科学与技术学院讲师, 主要研究方向为网络优化和算法设计。