

一种用户需求感知的无线接入点关联策略^{*}

李克, 王换招, 张鹏, 胡成臣

(西安交通大学 计算机科学与技术系, 陕西 西安 710049)

通讯作者: 王换招, E-mail: hzhwang@mail.xjtu.edu.cn

摘要: 在无线局域网中,接入点(access point,简称 AP)的稠密部署使得 AP 的关联策略成为一个重要的研究问题。目前,用户与 AP 的关联仅依据 AP 的信号强度,然而,这种方法未能考虑到网络中 AP 的异构性,以及不同用户对资源(例如带宽、安全性、时延等)的不同需求,并且分布式的 AP 关联会造成网络中 AP 负载的不均衡。针对以上问题,基于软件定义网络(software defined network,简称 SDN)技术提出一种集中式的 AP 关联策略模型。该模型同时考虑了网络管理员和用户的目标,对网络负载均衡和用户资源满足度同时进行优化。采用蚁群算法对模型进行求解,并通过仿真实验对算法进行验证。实验结果表明,针对随机生成的数据集,用户资源满足度可由 54.5%分别提升至 86.8%(重负载时)和 94.1%(轻负载时),并且管理员目标(负载均衡)得到了明显的改善。

关键词: 接入点关联;软件定义网络;用户需求感知;优化;蚁群算法

中文引用格式: 李克,王换招,张鹏,胡成臣.一种用户需求感知的无线接入点关联策略.软件学报,2015,26(Suppl.(2)):100-110.
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/15020.htm>

英文引用格式: Li K, Wang HZ, Zhang P, Hu CC. User-Demand-Aware wireless access point association strategy. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015,26(Suppl.(2)):100-110 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15020.htm>

User-Demand-Aware Wireless Access Point Association Strategy

LI Ke, WANG Huan-Zhao, ZHANG Peng, HU Cheng-Chen

(Department of Computer Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The dense deployment of wireless access points (APs) makes AP association an important problem. Currently, AP association is solely based on the signal levels of APs. However, this approach fails to consider the heterogeneous nature of APs, and the variety of user demands (bandwidth, security, delay, etc). In addition, distributed AP association cannot achieve network-level load balance. To address the issue, this paper proposes a centralized AP association model based on the software defined network (SDN). This model considers the objective of network administrator and wireless clients simultaneously, and can optimize the load balance of APs as well as satisfactory of clients. Ant colony algorithm is used to solve the model, and simulation is performed to validate the algorithm. Results show that user satisfactory factor as defined in our model increases from 54.5% to 86.8% under heavy load, and to 94.1% under light load. In addition, the load balance of APs also improves remarkably.

Key words: access point association; software defined network; user-demand aware; optimization; ant colony algorithm

随着无线技术的发展,WLAN 在日常生活中的应用越来越广泛,如应用在家庭、办公室以及诸如机场、咖啡馆等公共场所。如今,为了使无线用户能够获得更好的网络性能,接入点(access point,简称 AP)的部署越来越稠密,每个无线用户都能检测到多个 AP 可以与其建立连接。因此,AP 的关联策略成为一个关键的问题。

在 802.11 协议中,用户与 AP 的关联仅仅依据 AP 的信号强度。当用户接收到各个 AP 返回的 Scan Response 消息或各个 AP 定期发送的 Beacon 消息时,比较它们的信号强度,并选择与信号强度最大的 AP 建立连接。然而,

* 基金项目: 国家自然科学基金(61272459, 61170245, 61221063, 61402357); 国家高技术研究发展计划(863)(2013AA013501); 工信部重大专项(2013ZX03002003-004); 陕西省工业攻关计划(2013K06-38); 中央高校基本科研业务费

收稿时间: 2014-05-02; 定稿时间: 2014-08-22

这种机制忽略了影响通信的其他因素,往往会造成 AP 负载的不均衡^[1]。例如,当某一用户检测到信号强度最强的 AP 并发出连接请求时,该 AP 可能已经与很多用户建立了连接,如果该用户再与这个 AP 建立连接,很可能造成 AP 整体吞吐量的下降以及时延的增加。不仅如此,这种传统的 AP 选择方法也没有考虑到用户对资源的需求。当前,WLAN 中 AP 的种类不同,配置多种多样,所能提供的服务也有所差异,因此,忽略全网性能和用户资源需求而仅仅依据信号强度所做出的选择,并不是最佳方案。

本文特地对某学校校园无线网的部署情况做了一个简要的调查,共检测到 AP 2 014 个,SSID 981 个。各个 AP 使用的认证和加密的类型见表 1。

Table 1 Authentication and encryption of AP

表 1 AP 的认证和加密情况

Authentication		Encryption	
Open	570	None	513
WPA-Personal	122	WEP	56
WPA2-Personal	828	TKIP	178
WPA2-Enterprise	494	CCMP	1 267

这些 AP 中既有学校统一部署的 AP,也有学生或老师自己部署的 AP。其中,学校部署的两个网络见表 2。

Table 2 XJTU-WLAN and xjtu1x

表 2 XJTU-WLAN 和 xjtu1x

	XJTU-WALN		xjtu1x	
AP 数量	396		494	
协议类型	802.11g	38	802.11g	45
	802.11n	358	802.11n	449
加密类型	None		TKIP	143
			CCMP	351

在 XJTU_WLAN 和 xjtu1x 两个网络中,由于 AP 设备的新旧不一,网络存在明显异构性,使用 802.11g 协议的 AP 只能支持最高 54Mbps 的传输速率,而支持 802.11n 协议的 AP 传输速率可达 300Mbps,最高可达 600Mbps。根据传输速率以及安全级别的不同,用户可以提出自己的需求。有些用户需要较高的传输速率,必须使用支持 802.11n 协议的 AP 才能满足其需求,而有些 AP 对数据的安全性要求较高,需要使用安全级别较高的 AP,因此,仅仅依靠接收到的信号强度选择出来的 AP 很难满足这些需求。

为了避免用户选择 AP 的局限性,有些文章(如 Dyson^[2]、Odin^[3])利用软件定义网络(SDN)的思想,提出由网络管理员通过 Controller 来管理 AP 的关联问题,此时,AP 的关联策略由管理员制定,如在 Odin 中,Controller 拥有全网视图,用户在接入时,Controller 通过执行负载均衡策略,选择一个负载相对较轻的 AP 与用户建立连接,这样就避免了某一个或几个 AP 过载现象的出现。然而,这些决策是由 Controller 单方面做出的(Controller 根据全网视图控制用户与 AP 的连接,根据全网视图来控制用户在不同 AP 间的切换等等),忽略了用户的需求。当用户需要较高的传输速率时,如果 Controller 根据全网状态分配了仅支持 802.11g 协议的 AP 与其连接,用户需求就无法得到满足。

前人在解决 AP 的关联问题时往往从全网的性能入手,目标是使网络利用率最大化,却没有考虑到不同用户对不同资源的需求。Akl 等人^[4]的主要目标是在 AP 的覆盖范围和可提供的带宽容量之间做平衡;Virgil 等人^[5]在 AP 的关联问题上通过测试链路的性能来选择性能最好的 AP 建立连接,主要考虑的是带宽资源;Chen 等人^[6]侧重于 AP 的负载均衡,通过观察帧的延时情况来估计相应 AP 的负载大小,选择与负载较小的 AP 建立连接,从而提高网络利用率;Maneesha 等人^[7]提出一种动态负载均衡公平算法来解决可能造成的 AP 过载问题;HRFA 等人^[8]主要是从 AP 的负载均衡和无线资源的有效利用两个方面来考虑 AP 的关联问题;Wan 等人^[9]综合考虑各个 AP 可用的带宽以及新用户连接后会对其其他与该 AP 连接的用户造成的影响来选择 AP。然而,当将用户需求考虑进来后,就会出现一些新的问题,比如,由于无线资源的限制,有时候不可能所有用户的需求都得到满足;当用户在某些方面的需求得到满足时,可能会使某一个或几个 AP 负载过重,从而造成全网性能的降低。

因此,本文提出一种集中式的 AP 关联策略模型。该模型利用前人在解决 AP 选择局限性问题时所用到的

SDN 技术,并在此基础上综合考虑 Controller 对全网的控制以及用户的资源需求,从而不仅防止诸如 AP 过载等类似问题的出现,而且避免了由于 Controller 对全网的控制而造成用户需求无法满足的情况.只有将网络管理员和用户的目标综合考虑,最后所做出的决策才是合理的.因此,在解决该问题时,就需要在管理员策略和用户需求之间做优化,使最终结果在最大限度满足管理员策略的同时,也最大限度地满足用户对资源的需求.这样,就产生了两个优化目标,一是管理员策略的满足程度,二是用户对资源需求的满足程度.最终的优化结果就是使这两个目标函数最大化.

这种情况下的优化问题可以归结为一个指派问题.虽然到目前为止,还很少见到有人使用这种方法求解 AP 的选择的问题,但其他领域有一些类似的求解指派问题的研究工作,其成果可以被借鉴.例如,在无线网络中如何为各个 interface 分配流量使得在满足数据流需求的前提下,实现付费以及 interface 的能耗最小化^[10];在云计算场景中,如何将不同的 VM 分配给相应的 server,使得在满足 VM 资源需求的同时,server 上的能耗最低^[11];在 content multihoming 中,用户可以和多个内容分发网络(content delivery network,简称 CDN)连接,通过使用怎样的优化算法选择出一个 CDN 使得用户在支付较少的费用同时得到较好的性能^[12];在 P2P 场景中,通过 application 与管理员的交互,如何选择一个 peer,使得在两者之间链路资源利用率最大化的同时,不会给全网的性能带来负面影响^[13].基于以上对优化问题的研究,本文将所提出的 AP 关联策略模型化并求解.本文第 1 节具体描述 AP 关联策略模型.第 2 节将该模型归结为背包问题,并提出改进的蚁群算法求解.第 3 节通过仿真实验验证算法的有效性以及优势.最后对全文进行总结并探讨未来的工作.

1 问题描述

本节具体描述 AP 关联策略模型.在上文中,通过对某校校园内无线 AP 部署情况的调查,可以得到 AP 异构性的事实.因此,当用户对不同的资源有不同的需求时,需要选择一个合适的 AP 来与该用户建立连接,从而最大限度地满足用户的资源需求,而不是仅仅依靠信号强度的大小来做出抉择.Odin,Dyson 在解决用户选择 AP 的局限性问题时采用集中控制的方法,我们使用 SDN 技术,将控制平面从物理设备中剥离出来.每个 AP 都会定期地或触发式地将自己状态信息(各个 AP 覆盖范围内的客户端信息、AP 所接收到的各个客户端的信号强度以及各个 AP 的负载情况和相关的配置信息)发往 Controller.Controller 根据搜集到的网络状态信息形成全网视图.Controller 中不同的 application 根据这些网络状态信息执行各自的功能,从而实现不同的网络服务.当网络管理员需要增加新的网络服务时,只需编写相关的 application 并部署在 Controller 中即可.

现有的 AC/AP 也采用集中控制的方式,然而该系统是生产商专有的,使用非开源平台,且 CAPWAP 协议的推广也不顺利,造成来自不同生产商的设备之间的不兼容问题.因此,本文在 SDN 技术的基础上,综合考虑用户的资源需求和管理员对全网的控制策略,选择一个最佳的 AP.参考图 1 所示的场景,AP1 为安全级别较高的 AP,且与 Client 1 和 Client 2 建立了连接,而 AP2 为安全级别较低的 AP,空载.现在 Client 3 需要加入到这个无线网络中,当管理员不知道用户对资源的需求时,如 Odin,Dyson,Controller 就会按照管理员的策略选择相应的 AP 与用户连接,毫无疑问,此时,并不能保证选择的这个 AP 能够满足用户的资源需求,因此,本文将用户的资源需求考虑进来,然而,在有些情况下,用户的资源需求会和管理员的策略产生冲突.如图 1 所示,当 Client 3 需要较高的安全性时,我们应该把他连接到 AP1 上.然而,这样就会造成 AP1 负载过重的情况,与网络管理员的负载均衡策略相矛盾.如果将 Client 3 按照管理员的策略连接到了 AP2 上,则会与用户对资源的需求相矛盾.为了缓和这个矛盾,本文提出了一种优化思想.

首先,用户对网络中的多种资源都有需求,而不同的用户对不同资源的侧重有所不同,因此,每个用户为自己所需求的不同资源设置不同的权值,以鉴别这些资源对他的重要程度.然后,根据用户的需求,选择合适的 AP 与其连接,最大化用户的资源需求满足度.

为了方便表达,用户的资源需求以向量的形式表示, $D_i=(d_{i1},d_{i2},\dots,d_{il})$,表示用户 i 对网络中 l 种资源的需求量.用户对不同资源的权值表示为 $P_i=(p_{i1},p_{i2},\dots,p_{il})$,各个权值相加之和为 1.假设在无线网络中,有 m 个用户和 n 个 AP,每个 AP 都有自己的资源向量,并把这些资源分配给与它连接的用户.由于不同的资源有不同的表达形式,

本文中现在只考虑两种资源:带宽和安全性,则用户的资源需求向量表示为 $D_i=(d_{i1},d_{i2})$,资源对应的权值表示为 $P_i=(p_{i1},p_{i2})$,其中, d_{i1} 代表带宽需求值, d_{i2} 代表安全性需求值,相应地, p_{i1} 和 p_{i2} 分别代表用户为带宽需求和安全性需求所设定的权值.一般情况下,用户都是贪婪的,都想得到更多的资源,然而,无线网络中的资源是有限的,为了限制用户这种贪婪的请求,特别引入了计费功能,每个用户在发送资源需求信息的同时,将自己的预算信息 B_i 也一并发送,管理员根据用户的预算信息计算出相应的资源分配值,从而抑制用户对资源无限制的贪婪需求.

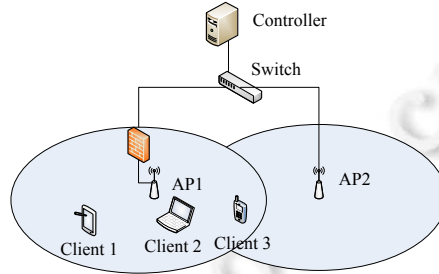


Fig.1 Wireless network scenario

图1 无线网络场景

根据上述描述,可以得出一个关于资源分配的数学模型,目标函数为最大化用户资源需求的满足度,即最小化管理员的资源分配与用户的资源需求之间的差值,也就是最小化用户资源需求的不满足度.因此,可以得到用户端的目标函数:

$$\min \sum_i \left(p_{i1} \cdot \max \left(0, \frac{d_{i1} - \sum_j I_{ij} \cdot \lambda_{ij}}{d_{i1}} \right) + p_{i2} \cdot \max \left(0, \frac{d_{i2} - \sum_j I_{ij} \cdot s_{ij}}{d_{i2}} \right) \right)$$

在上述表达式中, I 为一个 $m \times n$ 矩阵,表示用户与 AP 之间的连接情况,当 $I_{ij}=1$ 时,表示用户 i 与 AP j 连接,当 $I_{ij}=0$ 时,表示用户 i 与 AP j 未连接. λ 也是一个 $m \times n$ 矩阵,其中每个元素 λ_{ij} 表示 AP j 为用户 i 分配的带宽值. s_{ij} 表示 AP j 为用户 i 分配的安全属性值.目前,本文针对安全属性只考虑对数据加密和未加密两种情况.当管理员为用户分配的资源大于等于他所请求的资源时,用户的不满足度为 0.

对于管理员这端,本文暂且指定管理员的策略为负载均衡.有的负载均衡是通过与 AP 连接的用户数量来表示的,我们认为不太严谨,不能正确反映出 AP 负载的情况,本文使用 AP 的带宽利用率作为判断负载大小的标准.因此,管理员这一端的目标函数为

$$\min \max_{j \in \{1, \dots, n\}} \left(\sum_i I_{ij} \cdot \lambda_{ij} \right) / t_j,$$

其中, t_j 表示 AP j 的总带宽.

针对以上两个目标函数,有以下的约束条件:

- (1) $p_{i1} + p_{i2} = 1, \forall i \in \{1, \dots, m\}$.
- (2) $\sum_i \lambda_{ij} \leq t_j, \forall j \in \{1, \dots, n\}$.
- (3) $k \cdot s_{ij} \cdot \sum_j I_{ij} \cdot \lambda_{ij} \leq B_i, \forall i \in \{1, \dots, m\}$.
- (4) $\sum_j I_{ij} = 1, \forall i \in \{1, \dots, m\}$.
- (5) $\sum_j I_{ij} \cdot r_{ij} = 1, \forall i \in \{1, \dots, m\}$.

条件(1)表示用户对各个资源的权值和为 1;条件(2)表示每个 AP 分配给与其连接的用户的带宽之和小于自己的总带宽;在条件(3)中, B_i 表示用户 i 的预算,由于 AP 的安全属性分为加密和非加密两种,因此不同安全属性的 AP 对单位带宽的定价不同,设单位带宽的定价与 AP 的安全属性值成正比,因此,条件(3)表示每个用户的实际

费用小于预算;条件(4)表示每个用户只能和一个 AP 连接;条件(5)表示与用户建立连接的 AP 属于能够与该用户建立连接的 AP 的集合,其具体思想如下:

设 R 为一个 $m \times n$ 矩阵, m 代表 m 个用户, n 代表 n 个 AP, 当用户 i 可以和 AP j 建立连接时, 则 R 中的元素 $r_{ij}=1$, 由于在稠密部署网络中, 每个用户都可以检测到多个可以建立连接的 AP, 所以, R 中每一行会有多个值为 1 的元素. 而矩阵 I 中每一行只有一个值为 1 的元素, 因此, 条件(5)中所体现的思想是, 当 $I_{ij}=1$ 时, $r_{ij}=1$, 即当用户 i 与 AP j 建立连接时, AP j 为用户 i 检测到的可以与其建立连接的众多 AP 中的一个.

至此, 本文对 AP 关联策略模型已经描述完毕, 综合考虑了网络管理员和用户的目标, 对网络负载均衡和用户资源需求满足度同时进行优化, 下一节将对该问题进行具体的求解.

2 蚁群算法求解

优化问题求解的一般方法是转换成凸优化问题, 到目前为止还没有得出可以用凸优化求解的方案. 然而, 解决问题的方法是多种多样的. 当把每个 AP 看作一个背包, 每个用户看作一件物品时, 该模型就可以转化为背包问题求解. 对于两个优化目标, 可以将管理员的负载均衡目标作为用户资源需求满足度的约束条件, 从而, 将多目标问题转变为单目标问题求解. 在该背包问题中, 用户的资源需求为物品的重量, 每个 AP 的资源总量为一个背包的容量, 然而, 并不是所有的物品都能完全装入到背包中, 因为 AP 为用户分配的资源与用户所需求的资源之间可能会有差值, 因此, 每个物品的价值定义为用户资源需求的满足度. 此外, 与传统背包问题不同的是, 各个背包之间会涉及到负载均衡的问题. 当往背包中放置物品时, 并不是要把物品先放到一个背包, 等该背包装满后再放入下一个背包, 而是将这些物品均匀地放在这些背包中.

本文采用蚁群算法^[14]求解这个背包问题. 在使用蚁群算法求解时, 往往会涉及到两个重要的参数: 信息素和期望度. 根据所求解的问题不同, 参数的设置也不尽相同. 在本文的优化问题中, 由于涉及到用户资源满足度问题, 因此, 优先分派对资源请求较多的用户, 尤其是带宽资源, 这样一来, 当无线网络中资源有限时, 资源需求较多的用户首先得到满足, 而资源需求较低的用户在得不到完全满足时, 其满足度也不会很低. 对于负载均衡的问题, 解决方法如下, 首先, 将 AP 按带宽使用率和安全属性值升序排序, 然后, 优先选择带宽使用率较小的 AP 与用户建立连接.

根据以上思想, 可以确定这两个参数的具体表达式.

期望度:

$$\begin{cases} \eta_{ij} = p_{i1} \cdot \frac{l_i}{q_j} + p_{i2} \cdot (s_j - d_{i2})^* \\ l_i = \frac{B_i}{k \cdot s_j}, q_j = \max_{i \in \text{Cand}_j} \{l_i\} \end{cases}$$

其中, l_i 表示对于某一个 AP j , 用户 i 根据其预算所能获得的带宽分配值, p_{i1}, p_{i2} 分别为用户 i 对带宽资源和安全属性的权值, Cand_j 代表能够和 AP j 建立连接的用户的集合, 因此, q_j 表示当与 AP j 连接时, Cand_j 中用户根据预算信息所能得到的最大带宽需求值, l_i/q_j 主要是做归一化.

$$f = (a - b)^* = \begin{cases} 0, & a < b \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

由 f 可知, $(s_j - d_{i2})^*$ 表示当 AP j 的安全属性满足用户需求时, 值为 1; 当不满足时, 时值为 0. η_{ij} 表示用户 i 与 AP j 建立连接的期望度, 该期望度本着负载均衡和最大化用户资源需求满足度的原则建立.

在信息素方面, 主要有两个操作: 蒸发和积累. 所有路径上的信息素都会随时间的推移而慢慢蒸发, 当发现一条最优路径时, 该路径上的信息素会随着蚂蚁数量的增多而慢慢累积.

信息素:

$$\tau_{ij} = \left[(1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}^{\text{best}} \right]_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}}$$

其中, $0 \leq \rho \leq 1$, 代表信息素的蒸发速率; $\Delta\tau_{ij}^{best}$ 表示当前选出的最优路径上信息素的累积增量, 使用该最优状态时的目标函数值 $f(I_{best}, \lambda_{best})$ 来表示:

$$\Delta\tau_{ij}^{best} = \begin{cases} 1/f(I_{best}, \lambda_{best}), & \text{if } I_{ij} = 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

根据信息素和期望度两个参数就可以计算出蚂蚁选择某条路径的概率, 应用到本文所提到的场景中, 也就是某个 AP 选择与某个用户建立连接的概率. 概率的值表示如下:

$$p_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{\forall i \in Cand_j} \tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta}}, \quad 0 < p_i \leq 1; \tau_{ij}, \eta_{ij} > 0; \alpha, \beta > 0.$$

其中, α 和 β 用来决定两个参数中哪一个会对解的生成影响更大; $Cand_j$ 表示可以与 AP j 建立连接的用户集合.

通过上述对蚁群算法中各个参数的描述, 可以得到解决该背包问题的具体算法, 如算法 1 所示. 在该算法中用到了以下一些变量: num_{iter} 代表迭代的次数, num_{sol} 代表蚂蚁的数量. I_{best} 和 λ_{best} 分别代表当前最优的连接矩阵和带宽分配矩阵. I 和 λ 分别表示程序在执行过程中所得到的当前的连接矩阵和带宽分配矩阵. f 表示在某资源分配状态下的目标函数值, f_{best} 表示当前所得到的目标函数的最优值.

算法 1. 关于 AP 选择的蚁群算法.

输入: 用户集合 U , AP 集合 A .

输出: 当前最优解时的目标函数值 f_{best} , 连接矩阵 I_{best} 和带宽分配矩阵 λ_{best} .

1. $\tau_{ij} = \tau_{max}$; //信息素初始化
2. **for** $iter=0$ **until** num_{iter} **do**
3. $I_{best} \leftarrow 0$; $\lambda_{best} \leftarrow 0$; $f_{best} = inf$;
4. **for** $i=0$ **until** num_{sol} **do**
5. $I \leftarrow 0$; $\lambda \leftarrow 0$; $V = U$;
6. **while** $V \neq NULL$ **do**
7. $AscSort(A)$; //为 AP 排序
8. **for** $j=1$ **until** n **do**
9. $Cand = \{u \in V | P_{u,j} \geq P_{threshold}\}$; //构建备选集合
10. **if** $Cand \neq NULL$ **then**
11. $u =$ 依概率在 $Cand$ 中取一个元素;
12. $I_{u,j} = 1$;
13. **if** $r_j > bd_{u,j}$ **then** $\lambda_{u,j} = bd_{u,j}$;
14. **else** $\lambda_{u,j} = r_j$;
15. $r_j = r_j - \lambda_{u,j}$; $s_{u,j} = s_j$; $V = V - \{u\}$;
16. **if** $f(I, \lambda) < f_{best}$ **or** $f_{best} = inf$ **then**
17. $I_{best} \leftarrow I$; $\lambda_{best} \leftarrow \lambda$; $f_{best} = f(I_{best}, \lambda_{best})$;
18. **for** $i=1$ **until** m **do** //信息素更新
19. **for** $j=1$ **until** n **do**
20. $\tau_{ij} = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}$;
21. **if** $I_{i,j} = 1$ **then** $\tau_{ij} = \tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}$;
22. **if** $\tau_{ij} < \tau_{min}$ **then** $\tau_{ij} = \tau_{min}$;
23. **if** $\tau_{ij} > \tau_{max}$ **then** $\tau_{ij} = \tau_{max}$;

在该算法中, 首先初始化信息素的值, 从第 3 行开始整个蚁群选择的执行过程, 这个过程迭代 num_{iter} 次, 从第 5 行开始, 一只蚂蚁就已经被创建, 在随后的过程中(6~17 行)每只蚂蚁都会创建一个解, 并将当前的最优解保存在 f_{best} , I_{best} 和 λ_{best} 中. 在求解过程中, 首先按照带宽使用率和安全属性升序的顺序为 AP 排序, 针对每一个 AP 选

择出可以与其建立连接的用户的集合 $Cand$, 当 $Cand$ 非空时, 则根据轮盘选择机制从集合中选择一个用户 u 与这个 AP 建立连接, 并将连接矩阵中相应的元素 $I_{u,j}$ 置为 1. 在为用户 u 分配带宽时, 根据用户 u 的预算和 AP j 的安全属性, 得出该用户可以请求的最大带宽 $bd_{u,j}$, 并与 AP j 的剩余带宽 r_j 做对比, 从两者中选择出较小的那个值作为 AP j 为用户 u 分配的带宽值, 并将该值写入带宽分配矩阵 λ 中. 为了确保用户 u 只能连接到一个 AP, 在 u 与 AP j 建立连接后将 u 从集合 V 中删除. 当一个 AP 和一个用户建立连接后, 就接着考察下一个 AP, 并重复以上的过程, 当把所有的 AP 考察过之后, 再按照此时的带宽利用率和安全属性重新对 AP 排序, 然后按顺序依次为各个 AP 选择用户建立连接, 直到所有的用户都连接到 AP 上为止, 此时, 我们就可以得到用户与 AP 的连接矩阵 I 和带宽分配矩阵 λ , 以及在当前的资源分配状态中目标函数 f 的值. 将 f 值与之前最优目标函数值 f_{best} 对比, 得出当前最优目标函数值以及最优资源分配状态. 本轮迭代过程完毕后, 当前的最优解保存在 f_{best} , f_{best} 和 λ_{best} 中, 然后更新各个解路径中的信息素浓度:

首先, 设定信息素蒸发的速度值 ρ , 所有路径上的信息素都会随着时间的推移而蒸发掉; 其次, 当某一条用户到 AP 的连接路径属于当前最优的连接中的一部分时, 这条路径的信息素就会累积, 表明以后选择该路径的可能性会增大; 而不属于最优连接的其他路径上的信息素则不做任何改变; 最后, 确保各个路径上信息素浓度不要超过所设定的范围.

在本算法中, AP 排序使用快速排序, 其时间复杂度为 $O(n \log n)$, 当用户均匀分布在各 AP 周围时, 除去迭代次数和蚁群数量后, 剩余算法的时间复杂度为 $O((m/n)(n \log n + mn))$, 即 $O(m \log n + m^2)$. 将迭代次数和蚁群数量算在内后, 整个蚁群优化算法的时间复杂度为 $O(N_1 N_2 (m \log n + m^2))$, 其中, $N_1 = num_{iter}$, $N_2 = num_{sol}$. 该算法时间复杂度比较大, 对该算法的改进也是本文的后续工作的内容.

3 实验分析

本节主要针对算法的有效性进行分析, 使用蚁群算法前后各个 AP 的负载情况以及用户的资源需求满足度之间必然会有差异, 通过对比这些差异来证明我们的这种优化思想所具有的意义.

3.1 实验设置

本小节分为两部分来叙述, 首先, 针对蚁群算法中的参数设置做一些说明; 然后, 讨论具体的实验场景以及实验过程中需要确定的参数, 如信号强度阈值.

本实验理想的实验场景是 SDN 环境, 其中, 一台 PC 机运行 floodlight 作为 Controller, 数台 AP 作为 WLAN 的接入点连接到外网, 则本文所提出的用户需求感知的 AP 关联策略就可以通过编写 application 部署在 Controller 中实现. 然而, 目前该环境正在建设之中, 本实验暂且将所用到的蚁群算法部署在 matlab 上实现. 蚁群算法中有一些参数值需要设置, 如信息素的最大值与最小值、 α 和 β 值、信息素的蒸发速度、蚁群的数量以及迭代的次数. 选择不同的参数值会产生不同的结果, 为了得到较优的结果, 本文参照了前人在蚁群算法参数优化方面所做的研究^[15], 选取了 3 组参数, 见表 3.

Table 3 Parameter values of ant colony algorithm

表 3 蚁群算法参数值

	组 1	组 2	组 3
τ_{min}	0.2	0.3	0.3
τ_{max}	1	0.9	1
α	1	1	1
β	3	5	10
IterNum	10	20	30
AntNum	8	10	12
ρ	0.2	0.3	0.4

该实验主要从两个方面考察算法的有效性, 一方面是用户的资源需求满足度, 另一方面是各个 AP 的负载情况.

在用户资源需求满足度方面, 针对表中的每组参数值进行多组实验来计算每组参数值下的平均用户资源

需求满足度,并把这些满足度与使用蚁群优化算法之前做对比,观察该算法在这方面的优势.在用户数据方面,用户需要设定对带宽和安全属性的需求值以及这两种资源的权值、用户的预算信息和用户接收到的各个 AP 的信号强度.用户接收到 AP 的信号强度的大小与两者之间的距离有直接关系,接收到的信号强度的表达式如下所示^[16]:

$$RSS = P_T - L - 10n \log(d) + f(\mu, \sigma),$$

其中, P_T 表示节点的发送功率; L 为一个恒定的能量消耗; n 表示路径衰落指数,其值一般在 2~4 之间; d 表示两个节点之间的距离; $f(\mu, \sigma)$ 表示阴影衰落,其中, μ 和 σ 的值视具体环境而定,一般 μ 取值 0, σ 值在 6dB~12dB 之间.

用户与 AP 之间信号强度也直接影响到用户所体验到的网络性能,在 AP 稠密部署的环境中,为了使用户获得较好的性能,本文使用较高的信号强度的阈值,假定每个 AP 的发送功率都相同,根据接收到的信号强度与距离之间的公式,可以将信号强度的阈值转化为距离的阈值,在此,我们暂且将该距离阈值 $dis_{\text{threshold}}$ 设定为 20m. 这个阈值作用在蚁群算法中,用于在建立连接时构建备选集合.

在使用蚁群优化算法时,用户与 AP 的关联过程由管理员端来控制,当某用户发出连接请求时,管理员首先根据用户的资源需求,使用蚁群优化算法选择一个合适的 AP,然后使这个 AP 与用户建立连接.当不使用蚁群优化算法时,用户仅仅根据接收到的各个 AP 的信号强度的大小来选择相应的 AP 建立连接.

至于负载均衡方面,主要依据管理员关于负载均衡的目标函数值,通过对比使用优化算法前后的目标函数值来比较负载均衡的情况.在使用蚁群优化算法时,针对 3 组参数分别进行多次实验,然后求其平均数;在不使用蚁群优化算法时,也进行多次实验后求平均数.在此,每个 AP 的负载大小使用该 AP 的带宽利用率表示.在初始状态时,各个 AP 的总带宽设置相同的值.

本实验主要分为两组进行,一组是在网络负载较轻时观察使用优化算法前后两者的差异,另一组是在网络负载较重时比较两者的不同.其中,轻负载时,设定每个用户对带宽的需求占 AP 总带宽的 7.5%~15%,重负载时占 25%~50%.该带宽需求值在这个范围内以均匀分布的方式随机生成.实验场景分为 3 个大小不同的区域(20m×20m,50m×50m,80m×80m),分别部署数量不同的节点($m=21, n=9; m=80, n=30; m=200, n=80$, m 代表用户数量, n 代表 AP 数量),每个节点的位置都以均匀分布的方式随机生成,用坐标(x, y)表示,在使用蚁群优化算法时,通过使用坐标计算 AP 与客户端之间的距离就可以确定相应的备选集合.

3.2 结果对比

根据第 5.1 节对实验设置的描述,在 matlab 中运行该实验,当网络规模较小时,完成 m 个用户到 n 个 AP 的连接所需时间平均为 0.372s.在用户资源满足度和负载均衡方面可以得到以下的实验结果:

当网络负载较轻时,在用户资源需求满足度方面,最终结果如图 2 所示.

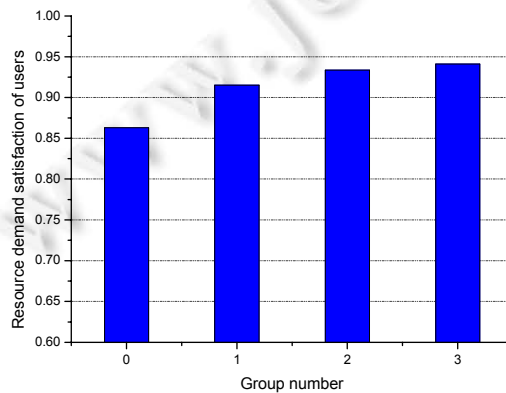


Fig.2 Resource demand satisfaction of users in light loaded network

图 2 网络轻载时用户资源需求满足度

在图 2 中,组 0 代表未使用优化算法之前的用户资源需求满足度的平均值,组 1、组 2 和组 3 表示根据给定的 3 组不同的参数值,使用蚁群优化算法处理后所得到的用户资源需求满足度的平均值.组 1 的用户资源需求满足度为 91.52%,组 2 为 93.37%,组 3 为 94.1%,组 0 为 86.3%.由图 2 可看出,使用优化算法前后,用户资源需求满足度相差不是很大,主要原因是网络轻载,而用户的资源需求只有两种——带宽和安全性,毫无疑问,在此情况下,带宽资源是能够满足的,不满足的只有安全性.然而,不同用户对安全性的侧重也有不同,当安全性不满足的用户对安全性不太看重时,就会导致用户资源需求满足度降低较少.当资源种类增加时,使用优化算法后的优势将更明显.

关于 AP 负载情况的比较,如图 3 所示.同样,组 0 为未使用优化算法之前所得到的负载,与使用了优化算法后的组 1、组 2 和组 3 相比,组 0 存在着严重的负载不均衡现象.

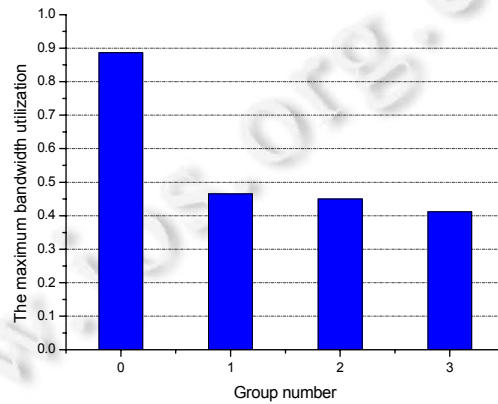


Fig.3 Objective function values of administrator in light loaded network

图 3 网络轻载时管理员端目标函数值

当网络负载较重时,用户资源需求满足度的情况如图 4 所示.与网络轻载时相比,组 0(未使用优化算法前)的用户资源需求满足度出现了大幅度的下滑,用户资源满足度仅仅为 54.5%,而使用优化算法后,组 1、组 2 和组 3 的用户资源满足度分别为 84.4%,85.8%,86.8%.此时网络负载较重,在带宽方面根本不可能满足所有的用户,然而使用优化算法后仍然维持在 85%左右,与之前的 54.5%相比,优势十分明显.当然,在重载情况下,使用优化算法前后,网络中负载最大的 AP 其负载值都是基本相同的,带宽利用率都会等于 1.

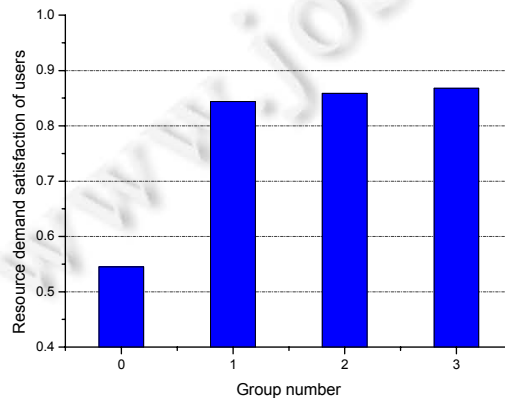


Fig.4 Resource demand satisfaction of users in overloaded network

图 4 网络重载时用户需求满足度

综上所述,本文所提出的 AP 关联策略主要有以下优势:当网络中负载较轻时,不仅能够负载均衡方面取

得很大的提升,而且将用户对资源需求的满足度提高至 94.1%,最大限度地满足了用户的资源需求;而当网络负载较重时,与传统 AP 关联策略相比,极大地提升了用户资源需求的满足度.当网络资源充足时,本文提出的 AP 关联策略可能不会存在很大的优势,然而,当网络资源有限时,该策略就会带来质的飞跃.

4 结束语

本文提出了一种基于用户感知的 AP 关联策略.该策略同时考虑了网络管理员和用户的目标,针对网络负载均衡和用户资源需求满足度同时进行优化.对于该优化问题,首先,将其模型化,使用 2 个目标函数和 5 个约束条件,以数学表达式的形式将该问题完整地描述出来;其次,使用蚁群算法求解这个模型,由于原来有两个目标函数,在使用蚁群算法求解时,将管理员的目标函数作为约束条件,以用户资源需求满足度作为优化目标;最后,通过实验结果表明,本文所提出的 AP 关联策略模型以及实现该模型的优化算法不仅极大地提高了用户资源需求的满足程度,使其高达 94.1%,而且在负载均衡方面也得到了很理想的结果,尤其是当网络资源有限时,其优势会大为增加.

然而,本文的算法和实验中也存在着一些不完善的地方,有一些因素并没有考虑进去,比如,距离的大小对用户所获得的带宽的影响.由于本文中的实验是在 matlab 中进行的,只是对一些随机数据进行处理,比较理想化,因此,后续的工作还需要在真实的场景中实现该算法,并对实验结果进行进一步的研究.本文只是将用户的资源需求考虑进来,提出了一种用户需求感知的 AP 关联策略模型,并简单地将这个模型付诸实现,其中存在的一些问题还有待于我们进一步研究.

References:

- [1] Schwab D, Bunt R. Characterising the use of a campus wireless network. In: Proc. of the 23rd Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM). 2004. 862–870.
- [2] Murty R, Padhye J, Wolman A, Welsh M. Dyson: An architecture for extensible wireless LANs. In: Proc. of the 2010 USENIX Conf. on USENIX Annual Technical Conf. 2010. 15.
- [3] Suresh L, Schulz-Zander J, Merz R, Feldmann A, Vazao T. Towards programmable enterprise WLANS with Odin. In: Proc. of the 1st Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks (HotSDN 2012). 2012. 49–54.
- [4] Akl R, Park S. Optimal access point selection and traffic allocation in IEEE 802.11 networks. In: Proc. of the 9th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2005): Communication and Network Systems, Technologies and Applications, 2005. 75–79.
- [5] Nicholson AJ, Chawathe Y, Chen MY, Noble BD, Wetherall D. Improved access point selection. In: Proc. of the 4th Int'l Conf. on Mobile Systems, Applications and Services. 2006. 19–22.
- [6] Chen JC, Chen TC, Zhang T, van den Berg E. Effective AP selection and load balancing in IEEE 802.11 wireless LANs. In: Proc. of the 49th IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM). 2006. 1–6.
- [7] Ramesh MV, Nisha MS. Design of optimization algorithm for WLAN AP selection during emergency situations. In: Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Communication Software and Networks (ICCSN). 2011. 340–344.
- [8] Takeuchi S, Yasuda Y. Access point selection strategy in IEEE 802.11e WLAN networks toward load balancing. IEICE Trans. on Communications, 2006, J89-B:431–442.
- [9] Wan X, Wang XM, Heo U, Choi J. A new AP-selection strategy for high density IEEE 802.11 WLANs. In: Proc. of the Int'l Conf. on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery. 2010. 52–58.
- [10] Zafeiris VE, Giakoumakis EA. Optimized traffic flow assignment in multi-homed multi-radio mobile hosts. Computer Networks, 2011, 55:1114–1131.
- [11] Amarante SRM, Cardoso AR, Roberto FM, Jr. Celestino J. Using the multiple knapsack problem to model the problem of virtual machine allocation in cloud computing. In: Proc. of IEEE the 16th Int'l Conf. on Computational Science and Engineering. 2013. 476–483.

- [12] Liu HQH, Wang Y, Yang YR, Wang H, Tian C. Optimizing cost and performance for content multihoming. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2012 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (SIGCOMM 2012). 2012. 371–382.
- [13] Xie HY, Yang YR. P4P: Provider portal for applications. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2008 Conf. on Data communication (SIGCOMM 2008). 2008. 351–362.
- [14] Dorigo M, Caro GD, Gambardella LM. Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life*, 1999,5(2):137–172.
- [15] Stütze T, López-Ibáñez M, Pellegrini P, Maur M. Parameter adaption in ant colony optimization. In: *Autonomous Search*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 191–215.
- [16] Zahran AH, Liang B, Saleh A. Signal threshold adaptation for vertical handoff in heterogeneous wireless network. *Mobile Networks and Applications*, 2006,11:625–640.



李克(1989—),男,河北保定人,硕士,主要研究领域为无线网络,软件定义网络.



张鹏(1986—),男,博士,讲师,CCF 专业会员,主要研究领域为计算机网络.



王换招(1963—),女,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究领域为无线网络,软件定义网络.



胡成臣(1981—),男,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为计算机网络.