Journal of Computer Applications
计算机应用, 2020, 40(9): 2706 - 2711
ISSN 1001-9081
CODEN JYIIDU
2020-09-10
http://www.joca.cn

文章编号:1001-9081(2020)09-2706-06
DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2020010023

# 软件定义无线局域网的切换接入机制

王明芬*
(福建师范大学协和学院 信息技术系,福州 350117)
(*通信作者电子邮箱605342295@qq.com)

**摘　要**:软件定义无线局域网(WLAN)是管理无线网络的一个趋势。针对无线访问接入点(AP)部署密集环境中频繁切换、接入失败等问题,提出了基于惩罚因子的全局关联记忆保留的接入控制的方法。首先,扩展OpenFlow协议;其次,利用扩展数据报文通过AP向控制器报告网络的质量、负载、吞吐量以及利用率等指标;接着,引入变异系数法确定网络指标的系数,然后利用这些指标参数构建AP接入权值;最后,引入全局惩罚因子记录网络中发生频繁来回切换的情况,根据全局记忆保留的惩罚因子修正AP接入权值和发射功率。通过与信号最强接入法和负载均衡接入法的实验对比表明,终端站点(STA)在复杂网络环境中移动时,该方法能有效地降低切换的"乒乓效应",减少网络的切换次数和切换时延并提高网络切换成功率。与传统信号最强接入法相比,所提方法的切换请求次数减少了21.7%,增强了网络接入性能的稳定性。

**关键词**:软件定义无线网络;惩罚因子;切换;接入权值;OpenFlow协议
**中图分类号**:TP393.01　　**文献标志码**:A

## Handover access scheme in software-defined wireless local area network

WANG Mingfen*
(*Department of Information Technology, Concord University College Fujian Normal University, Fuzhou Fujian* 350117, *China*)

**Abstract:** Software-defined Wireless Local Area Network (WLAN) is a trend for managing wireless networks. Aiming at the problems of frequent handover and access failure in AP(Access Point)-intensive environment, an access control method based on global association memory retention of penalty factors was proposed. First, OpenFlow protocol was extended. Second, the extended data messages were used to report network quality, load, throughput, and utilization indicators to the controller through AP. Then, the network index parameters determined by introducing variation coefficient method were used to construct AP access weights. Finally, a global penalty factor was introduced to record frequent back-and-forth handovers in the network, and AP access weights and transmitting powers were modified based on the penalty factor retained by the global memory. Experimental comparison with the strongest signal access method and load balancing access method shows that when the STAtion (STA) moves in a complex network environment, the proposed method can effectively reduce the "ping-pong effect" of the handover, and reduce the number of network handovers and the handover delay, so as to improve the success rate of network handover. Compared with the traditional strongest signal access method, the proposed method has the number of handover requests reduced by 21.7%, which enhances the stability of network access performance.

**Key words:** Software Defined Wireless Network (SDWN); penalty factor; handover; access weight; OpenFlow protocol

## 0　引言

传统的无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)中采用的无线接入控制器(Access Point Controller, AC)+无线访问接入点(Access Point, AP)的组网方式,采用无线接入点的控制和配置协议(Control And Provisioning of Wireless Access Points protocol specification, CAPWAP)来支持AC对众多无线接入点AP进行管理,但因为不同厂商设备的技术私有性,所以无线网络的设备管理并不具有统一标准,这给网络的后期维护和未来扩展都带来困难。软件定义网络(Software Defined Network, SDN)架构将网络控制面和数据转发面分开,控制面南向提供开放的网络协议控制基础设备,北向提供应用程序编程接口(Application Programming Interface, API)用于定义网络功能模块,SDN实现了开放、软硬分离、通用化平台的网络[1],目前在数据中心得到广泛应用。SDN核心思想同样可以应用到无线网络接入管控,并提出了软件定义无线网络(Software Defined Wireless Network, SDWN)的一种解决方案[2-3]。

在传统的接入机制中,终端站(STAtion, STA)在漫游的过程中会选择信号最强AP接入,而不关心网络的其他状态。这种切换接入往往容易导来回频繁切换的"乒乓效应"、切换延时、切换吞吐率降低等问题,也可能导致在AP下关联STA负载比较重的区域,小区边缘的STA可能由于信道质量原因而掉线。因此切换接入策略是一个比较重要的研究方向,但是目前研究的切换算法多数是基于传统无线网络结构,在软件定义WLAN中的接入策略研究目前还比较少。

国外,Nahida等[4]在基于SDN的基础上提出了WLAN的

**收稿日期**:2020-01-14;**修回日期**:2020-03-31;**录用日期**:2020-04-05。
**基金项目**:福建省教育厅项目(JT180823);福建省重点项目(2017H0011);福建省级教改项目(FBJG20180130)。
**作者简介**:王明芬(1981—),女,福建福清人,讲师,硕士,主要研究方向:软件定义网络、机器学习。

AP负载均衡切换算法,SDN控制器获取各AP的负载状态信息,从而选择负载最小的AP为接入点;但是该方案仅凭AP侧的吞吐量来对接入点性能优劣进行判断,这不能全面地反映网络接入点的整体性能,特别是对于复杂场景下的WLAN而言,接入AP的选择未必最优。Dely等[5]提出基于OpenFlow协议的Mesh网的逻辑控制通道,设计代理模块收集AP侧的网络吞吐量选出STA应该接入的AP,减少切换时吞吐量的降低,但并未考虑复杂场景下的切换"乒乓效应"。

国内,赵国锋等[6]以Odin为基础构建SDWN切换系统,通过代理模块收集AP侧的负载和STA接收信号强度,计算AP接入权值并择优接入,减少网络的频繁切换,但其并未考虑AP部署密集的环境中的其他的网络参数的影响。Wang等[7]提出LiveSec的有线和无线网络综合安全管理架构,在无线部分该架构将WLAN的交换机按细粒度的交互式策略分为接入层和核心层。控制器在核心层通过OpenFlow协议对网络中所有的交换机进行负载均衡管理,主要根据接收和处理的包的数量来判断负载,但是未考虑移动终侧的网络信号质量水平。开彩红等[8]提出虚拟无线访问接入点(Virtual Access Point, VAP)云的概念,在SDWN中将VAP、控制器和虚拟交换机(Open Virtual Switch, OVS)集成在一台计算机中来实现系统的核心功能整合,可以减少切换的时延,但并没有涉及到切换策略。

本文在SDWN架构基础上提出了基于惩罚因子的全局关联记忆保留的接入控制的方法。首先扩展OpenFlow协议的报文消息,关于AP和STA的相关数据报文封装在Packet-IN和Packet-OUT报文消息的data字段中[9-10];其次控制器根据报文收集网络的质量、负载、吞吐量以及利用率等指标构建AP的接入权值;接着引入变异系数法确定网络指标的系数;最后根据网络短时间内来回切换发生的"乒乓效应"提出惩罚因子,根据网络的惩罚因子调整AP的接入权值和发射功率。网络设计的惩罚因子具有记忆关联特性,即一定的时间阶段只能初始化一次,后面的惩罚代价只会不断增大,接入权值会不断减小,直到终端再也不选择它为切换目标。

通过实验表明,在STA漫游在AP密集部署的复杂网络环境中,能有效地降低切换次数和减弱"乒乓效应",并通过对比实验统计表明,在切换成功率和切换时延等整体网络性能上有了较好的提升。基于惩罚因子的全局关联记忆保留的接入控制的方法减少了网络不必要的切换动荡,增强了网络接入性能的稳定性。

## 1　SDWN架构

SDWN架构采用基于SDN的三层模型,利用应用面、控制面与数据面分离的技术构建WLAN。如图1所示。

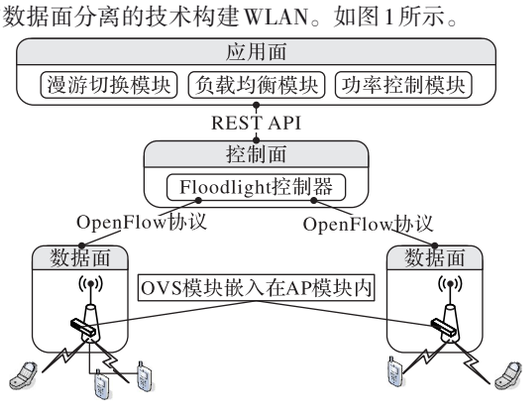



图1　SDWN架构

Fig. 1　Architecture of SDWN

本系统SDWN架构的特点主要包括以下几个方面:

1)使用了主流的Floodlight控制器来管控AP。由于OVS不支持无线保护访问(Wi-Fi Protected Access, WPA)模式,因此把OVS安装在AP上,从而使AP不仅支持WPA或WPA2加密而且支持OpenFlow协议。

2)扩展认证服务Hostapd功能,不仅使得STA可以通过认证接入到到AP上,而且可以通过OpenFlow协议传输AP参数及STA的参数到控制器。Hostapd上可以设置需要的扩展AP参数,比如数据包传输速率、允许最大STA数、发射功率区间、错误率等;也可以收集STA的信息,比如STA的MAC地址、IP地址、信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)等。

### 1.1　OpenFlow协议扩展

AP与控制器之间通过隧道连接建立通信。隧道是利用Open Flow交换机的转发功能和Open Flow协议中的Packet-In和Packet-Out消息来建立的。本文扩展了OpenFlow协议的消息报文,关于AP和STA的相关数据报文封装在Packet-IN和Packet-OUT的data字段中。OpenFlow消息作为AP控制与管理协议(AP Control And Management Protocol, ACAMP)[9-10]的载体。OpenFlow1.3协议消息的报文结构如图2所示。

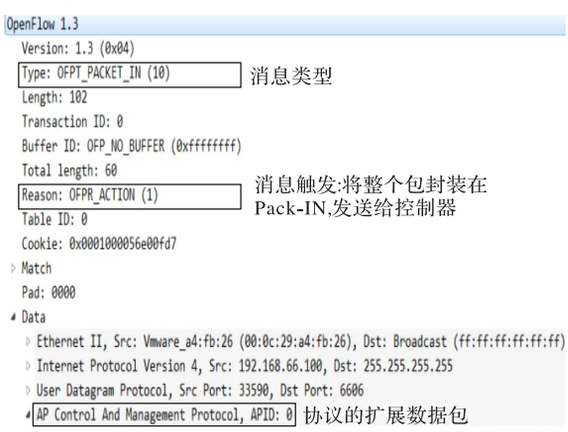



图2　Packet-IN报文的结构

Fig. 2　Structure of Packet-IN message

在本文用到的AP的扩展数据和STA的扩展数据以及其他一些参考数据等都在Message Elements消息报文中可以自定义设置和扩展。这个字段长度可选,ACAMP的报文格式如图3所示,对网络策略有用的参数在Elements字段里面。

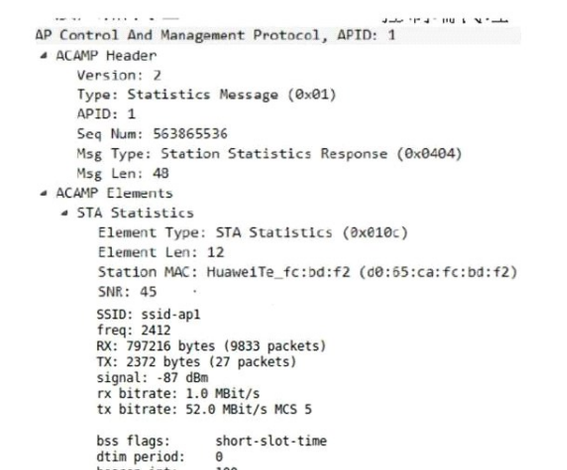



图3　ACAMP报文的结构

Fig. 3　Structure of ACAMP message

### 1.2 系统消息匹配

OpenFlow1.3 协议有很多新的特性和消息，流表项如图 4[11]所示。简单介绍一下比较重要的几个表项 Match Fields 匹配域又叫作包头域，包括入端口和数据包头等。Counters 进行数据包更新统计、流量统计和差错统计等。Instructions 指令集可以是一个 Action 集，修改指令或者按流表处理。

| Match Fields | Proirity | Counters | Instructions | Timeouts | Cookie |
|---|---|---|---|---|---|

图 4 OpenFlow1.3 协议的流表项

Fig. 4 Flow table entries of OpenFlow1.3 protocol

OpenFlow 交换机的流表匹配都是从 0 编号开始匹配。如果数据包的包头解析与第一个流表项 Match Fields 匹配，则数据包按流表项的指令集 Instructions 执行，这些 Instructions 指令可以指导数据包的传递到另外一个表号比自己大的流表，也可以按自己的流表执行 Action 指令。如果都没有匹配到，则可以执行报告控制器或者丢弃指令[12]，如图 5 所示。

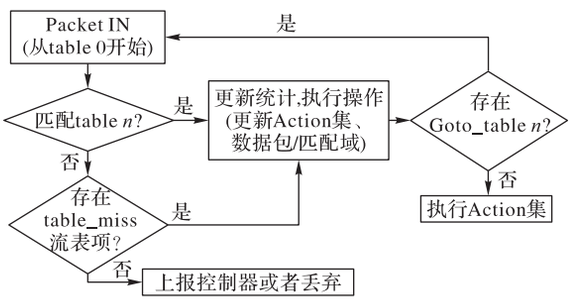



图 5 消息匹配过程

Fig. 5 Message matching process

## 2 接入控制

无线最大的作用是摆脱了有线的束缚，而网络支持无缝自主切换才是真正实现了移动改变生活。SDWN 架构采用统一的集中控制器管理 AP，由控制中心统一管理协调管理配置 AP 和 STA 的参数，这个网络架构符合网络协调管理的要求。本文将研究 SDWN 架构下的切换接入控制技术，减少网络切换时延和减弱“乒乓效应”。

### 2.1 系统参数分析

SDWN 的网络架构可以获得更多用户设定的参数来决策网络行为，其中比较重要的是：AP 的发射功率、信道利用率和负载 STA 数目，STA 的接收信号强度指示（Received Signal Strength Indication，RSSI），STA 的接收信号的信噪比（SNR），STA 的吞吐率等。

$STA_i$ 从 $AP_j$ 接收的 $SNR_{ij}$ 可以表示为：

$$SNR_{ij} = \frac{G_{i,j}P_{AP_j}}{N_0 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{n}(G_{i,k}P_{AP_k})} \tag{1}$$

其中：$P_{AP_j}$ 表示 $AP_j$ 的发射功率，$G_{i,j}$ 表示 $STA_i$ 从 $AP_j$ 获得的信道增益，$N_0$ 表示背景噪声功率。

根据文献 IEEE 802.11 标准 $AP_j$ 的信道利用率 $B_j$ 可以定义成 $T$ 时间内信道的有效传输时长，表示为：

$$B_j = \sum_{STA} t_{i,j} \Big/ T = \sum_{STA} \frac{pa_{i,j}}{ra_{i,j}} \Big/ T \tag{2}$$

其中：$pa_{i,j}$ 表示 $STA_i$ 和 $AP_j$ 之间的传输数据包，$ra_{i,j}$ 表示传输比特速率，这个计算中统计了小区内所有的 STA 的有效传输时长。信道利用率 $B_j$ 可以分为上行利用率和下行利用率，分别对应的是上下行的数据包传输。由于 STA 的发射功率较小，网络一般是上行受限，因此取信道上行利用率。OpenFlow1.3 的流表中的 Counters 表项可以提取数据包传输错误率 $E_i$。

### 2.2 接入策略

本文根据上述的参数，设计出权值和全局惩罚因子融合的接入策略。终端 $STA_i$ 移动中把检测到信号强度大于阈值的 AP 按从大到小排序 $AP_{list}=\{AP_1, AP_2, \cdots, AP_m\}$，然后对 $AP_{list}$ 里每个 AP 计算 $STA_i$ 的归一化接收信号：

$$RS_n = SNR_{i,n} \Big/ \sum_{STA \in AP_n} SNR \tag{3}$$

在软件定义 WLAN 中，控制器获得以上 3 个网络参数。如果每个参数差异越大，这样的参数在接入权值指标里越重要。因此本文引入了变异系数法来确定参数系数 $k$。

变异系数法是直接利用各项指标所包含的信息，通过计算得到指标的权重，是一种客观赋权的方法。各项参数的变异系数公式如下：

$$V_i = \sigma_i \Big/ \overline{\chi}_i;\ i = 1, 2, \cdots, n \tag{4}$$

其中：$V_i$ 是第 $i$ 项参数的变异系数，$\sigma_i$ 为第 $i$ 项参数的标准差，$\overline{\chi}_i$ 第 $i$ 项参数的均值。

按照式（4）计算每个 $AP_n$ 覆盖范围内 STA 的信道利用率 $B_n$、传输错误率 $E_n$、接收信号 $RS_n$ 的变异系数，然后计算出系数值如下：

$$k_i = v_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} v_i \tag{5}$$

$STA_i$ 的接入 $AP_n$ 概率为：

$$C_{i,n} = \left(RS_n \times k_1 + (1 - E_n) \times k_2 + (1 - B_n) \times k_3\right) \Big/ N_n \tag{6}$$

其中：$N_n$ 为 AP 已负载的 STA 数，$B_n$ 为信道利用率，$E_n$ 为传输错误率，$RS_n$ 为接收信号的归一化参数。

漫游过程中 $STA_i$ 可接入的 AP 集合按 $C_{i,n}$ 值从大到小排序，$STA_i$ 根据 $AP_{list}$ 范围内的 $C_{i,n}$ 的最大值选择对应的 AP 接入，表示为：

$$C_n = \max_{n \in list}(C_{i,n}) \tag{7}$$

### 2.3 全局惩罚因子算法

在 WLAN 中，频繁来回切换称为“乒乓效应”，特别容易引起网络的动荡，导致用户感知非常差。为了解决这样的网络问题，本文在上述接入控制策略的基础上引入了惩罚因子 $pu$。在多 AP 重叠区域，短时间内当要即将切换的目标 AP 和最近切换过的 AP 相同时，多加一个惩罚值降低切换的权重值。

假设原来的接入值为 $C1$，则新的接入值 $C2$ 如下：

$$C2 = C1 - pu \times (t/T) \tag{8}$$

$C2$ 相当于是 $C1$ 的一个滞后值，时间 $T$ 取值是一个 Beacon 的帧间隔周期，默认值为 100 ms。滞后时间 $t$ 的取值在文中初始值为 2 ms。STA 在切换时如果目标是最近历史重选小区则降低该 AP 接入权值和发射功率。

$pu$ 初始值为 1，如果发生来回切换则增加惩罚因子值，即 $pu=pu+1$，同时记录网络中每个 AP 的惩罚因子的关联记忆 $pu_{list}=\{pu_{AP_1}, pu_{AP_2}, \cdots, pu_{AP_n}\}$，在下一次网络“乒乓效应”中不会初始化 $pu$ 值，系统继续加大惩罚。当 AP 的惩罚因子 $pu$ 大于 3 时则上报控制器减小该 AP 的发射功率，然后重新初始化其 $pu$ 为 1。

在 AP 部署密集中，STA 接入控制算法伪代码如下：

算法 1 接入控制算法。

输入：控制器收集到扩展报文携带的网络参数；

输出:接入成功与否。

初始化:$AP_{list}=\{AP_0\}$,全局惩罚因子$pu_{list}=\{1,1,\cdots,1\}$,每个 AP 最大 STA 负载数 $Load=20$,最近两次切换接入的 AP 号 $Handover=[0,0]$

if $SNR_n$ 切换>切换阈值 then 更新 $AP_{list}$

while $AP_{list}\neq$NULL do

for each $AP_n$ in $AP_{list}$ do

$$SNR_n = G_n P_{AP_n} \Big/ \left( N_0 + \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq n}}^{list} (G_{i,k} P_{AP_k}) \right)$$

$$RS_n = SNR_{i,n} \Big/ \sum_{j=1}^{STA_j \in AP_n} SNR_{j,n}$$

$$B_n = \sum_{j=1}^{STA_j \in AP_n} (pa_{j,n}/ra_{j,n})/T$$

计算 AP 下每个参数的变异系数 $k_i$

$C_n=(RS_n\times k_1+(1-E_n)\times k_2+(1-B_n)\times k_3)/N_n$

end for

STA 根据 $AP_{list}$ 内 $C_n$ 的最大值选择对应的 $AP_n$,记录近两次切换 AP 号 $Handover=[n_1,n_2]$

if $AP_n$ 的 $Load<20$ then

if 切换接入 AP 号 $n\neq[n_1,n_2]$ 切换成功

else 更新保存惩罚因子 $pu_{list}$

if $AP_n$ 的 $pu>3$ then

上报控制器调整 $AP_n$ 发射功率,初始化 $pu$

end if

end if

else 从 $AP_{list}$ 删除超载 AP

end while

if $AP_{list}$=NULL 切换失败

算法首先把终端 STA 能接收到的信号大于切换阈值的 AP 按强度大小顺序更新到 AP 列表中,如果要接入的 AP 已经超载则从列表里删除。然后依次计算列表中每个 AP 的接入权值,选择权值最大的 AP 接入,并记录准备接入的 AP 号。如果发现即将进入切换的 AP 与近两次切换的 AP 一样时,则增加惩罚因子重新计算接入权值。判断该 AP 的全局惩罚次数是否超过 2 次,超过则上报控制器调整该 AP 的发射功率,缩小覆盖范围以减小干扰。最后如果终端 STA 可切换的 AP 列表为空,则切换失败。

## 3　实验结果与分析

### 3.1　实验环境

Mininet-wifi 是 Mininet 的扩展版本,是一个轻量级软件定义网络和测试平台。它是 SDN 系统中的一种基于进程虚拟化平台,支持 OpenFlow、OVS 等各种协议,也可以模拟一个完整的网络,主机、链接和交换机在同一台计算机上模拟有助于互动开发、测试和演示,尤其是那些使用 OpenFlow 和 SDN 技术,该平台支持代码迁移到真实的环境中[13]。

Mininet-wifi 内部操作接口如图 6 所示。nl80211 是新的 802.11 netlink 接口公共头文件,它配合 cfg80211 用来实现无线扩展功能。iw 是一款基于 nl80211 的新型无线设备 CLI 配置实用程序;wpa_supplicant 适用于各种异构操作系统的 WPA 请求,支持 WPA 和 WPA2 密码认证;hostapd 是用于 AP 和认证服务器的守护进程。

控制器与 Mininet-wifi 的网络采用 TCP 协议连接。网络控制器采用具有全局的网络视图的 Floodlight 控制器,首先通过南向 OpenFlow 协议从 AP 中获取网络状态信息和 STA 信息;其次它根据收集的信息设计各种网络管理操作,比如漫游切换、负载均衡等功能模块;最后再通过控制器的南向协议指导终端操作。Floodlight Provider 是核心模块。控制器首先启动 Floodlight Provider,然后其他模块通过向 Floodlight Provider 注册成为一个服务,即可以处理事件[14]。

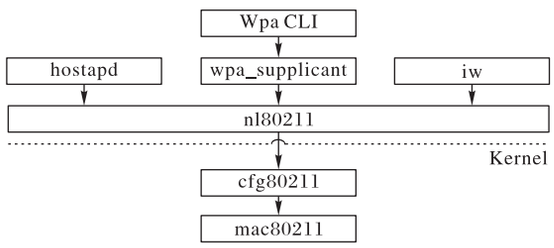



图 6　Mininet-wifi 接口

Fig. 6　Interface of Mininet-wifi

### 3.2　构建网络

SDWN 首先通过 net. addController()添加控制器,设置为 TCP 协议,端口为 6653。接着通过 net. addAccessPoint(),设置 AP 的基本参数,包括 AP 的 ID 号、服务集标识(Service Set Identifier, SSID)、信道号 Chanel、认证模式为 WPA2 等。然后调用 net. addStation()增加终端信息。最后 AP. start()函数确定 AP 和控制器的连接间用 net. addLink()实现设备的关联。网络拓扑如图 7 所示。

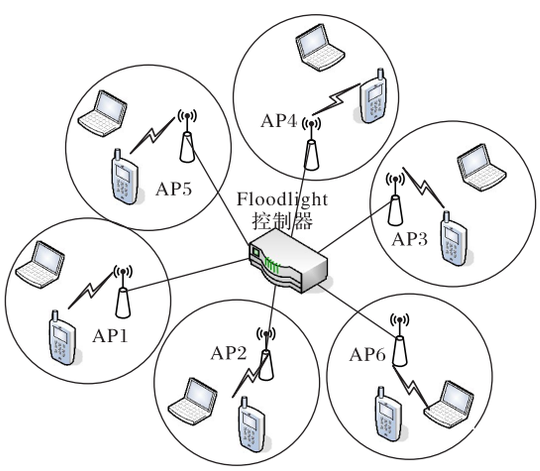



图 7　网络拓扑图

Fig. 7　Topology of network

图 7 所示的网络拓扑中有 6 个 AP 相邻部署,每个 AP 下都已关联了相应的 STA,由 Floodlight 控制器统一下发接入控制策略。对应的网络视图在 Mininet-wifi 中的仿真图如图 8 所示,每条连线代表目前每个 AP 下已关联的 STA 数。

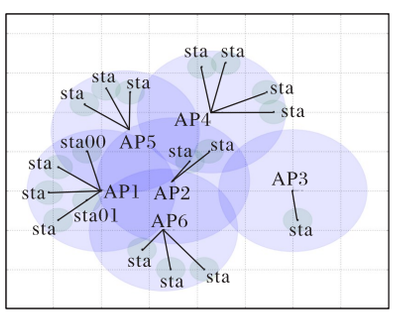
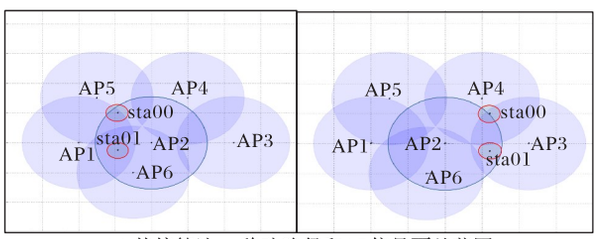



图 8　网络拓扑仿真图

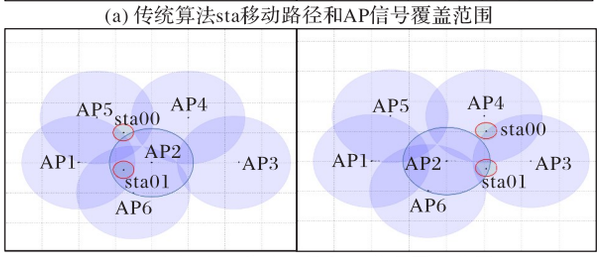
Fig. 8　Simulation diagram of network topology

### 3.3 移动切换效果

网络中有6个AP相邻部署，由Floodlight控制器统一下发接入控制策略。sta00和sta01从AP1移动到AP3的路径如图9所示，为了简洁显示，仿真中不显示已关联但未移动的STA。sta00和sta01在网络初始阶段都是和AP1关联。sta00移动过程中依次经过了AP6和AP2的覆盖区域，最后和AP3关联。sta01移动过程中依次经过了AP5、AP2和AP4的覆盖区域，最后和AP3关联。STA经过的路径主要是在多小区重叠的AP部署密集区域。这些区域信号重叠复杂，是网络中最容易发生切换、掉话、接入失败的区域。




(a) 传统算法sta移动路径和AP信号覆盖范围




(b) 本文算法sta移动路径和AP信号覆盖范围

图9 STA移动路径图和信号覆盖对比

Fig. 9 Comparison of STA moving path and signal coverage

传统网络采用信号最强接入算法，sta01在图9(a)的网络环境中移动过的切换轨迹如图10所示。从图10可以看出，sta01的切换记录是5次，且在AP2、AP4和AP5信号重叠区域处，sta00先是从AP2切换到AP4，然后又从AP4切换回AP2，网络发生来回切换的“乒乓效应”情况明显，这是因为AP2处的位置干扰到了周围的AP。

AP5->AP2->AP4->AP2->AP3

```
mininet-wifi> py sta00.params['associatedTo']
[<OVSAP ap5: lo:127.0.0.1,ap5-wlan1:None pid=2438> ]
mininet-wifi> py sta00.params['associatedTo']
[<OVSAP ap2: lo:127.0.0.1,ap2-wlan1:None pid=2420> ]
mininet-wifi> py sta00.params['associatedTo']
[<OVSAP ap4: lo:127.0.0.1,ap4-wlan1:None pid=2431> ]
mininet-wifi> py sta00.params['associatedTo']
[<OVSAP ap2: lo:127.0.0.1,ap2-wlan1:None pid=2420> ]
mininet-wifi> py sta00.params['associatedTo']
[<OVSAP ap3: lo:127.0.0.1,ap3-wlan1:None pid=2424> ]
mininet-wifi>
```

图10 传统信号最强接入算法切换轨迹

Fig. 10 Handover track of traditional signal strongest access algorithm

采用本文的接入算法后，sta00在图9(b)的网络环境中切换轨迹如图11所示。在发生“乒乓切换”后，系统的惩罚因子发挥作用，控制器动态调整了AP2的信号覆盖范围，接入控制方法后的切换次数是3，STA切换关联的AP数明显减少且消除了来回切换的“乒乓效应”。

AP5->AP4->AP3

```
mininet-wifi> py sta00.params['associatedTo']
[<OVSAP ap5: lo:127.0.0.1,ap5-wlan1:None pid=2438> ]
mininet-wifi> py sta00.params['associatedTo']
[<OVSAP ap4: lo:127.0.0.1,ap4-wlan1:None pid=2431> ]
mininet-wifi> py sta00.params['associatedTo']
[<OVSAP ap3: lo:127.0.0.1,ap3-wlan1:None pid=2424> ]
mininet-wifi>
```

图11 本文算法切换轨迹

Fig. 11 Handover track of the algorithm in this paper

### 3.4 系统性能比较

系统设置sta01从AP1移动到AP3，本文使用iperf工具来统计切换时TCP下行吞吐率，通过ping命令来统计切换时网络时延。

本文算法和传统信号最强接入算法[15]、传统负载均衡算法[16]以及文献[6]采用负载感知的切换算法的网络时延对比结果如图12所示。

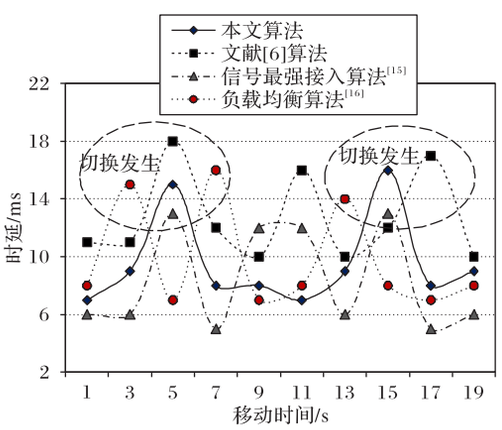



图12 切换时延对比

Fig. 12 Comparison of handover delay

如图12所示，sta01在移动过程中，发生切换时不同的算法发生的网络时延不同。传统负载均衡接入算法触发了3次切换引起的时延，因为在$t$=3 s处，即终端sta01刚进入AP1与AP6的重叠区域时便执行切换，原因是对于终端而言AP6的负载小，接着在$t$=7 s处接入AP2，随后在$t$=13 s接入AP3，均是因为在AP负载较轻而优先接入。文献[6]算法是基于负载感知的AP权值计算方法，在AP部署密集区域的环境中并没有很明显地减少切换次数，且由于采用代理模块的开销，网络时延较高。而本文的切换次数是2，因为控制器根据惩罚因子调整了AP2的发射功率，让终端在切换过程中没有接入到AP2而是接入到AP6，最后接入到AP3。

本文的系统架构将OVS的功能集成到AP中，让AP具有更大的权限，而不需要另外再加一层接入交换机。由于控制器直接控制AP，使得网络扁平化，因此STA切换时延较小。同时因为惩罚因子的作用，本文算法在系统中的切换次数也减少了。

为了进一步分析网络的切换性能，系统随机设置一些终端在图8所示的网络中随意移动。统计网络切换优化前后的切换请求次数，优化前指的是传统信号最强接入算法和传统负载均衡算法，优化后指的是增加惩罚因子的本文算法。网络性能统计比较如图13所示。从图13可以看出：在切换频繁的复杂区域，本文算法的切换请求次数优于比较的算法；但是在普通切换区域，本文算法的请求次数并发挥出很大的优势。这是因

为惩罚因子只针对复杂频繁切换区域才有作用。

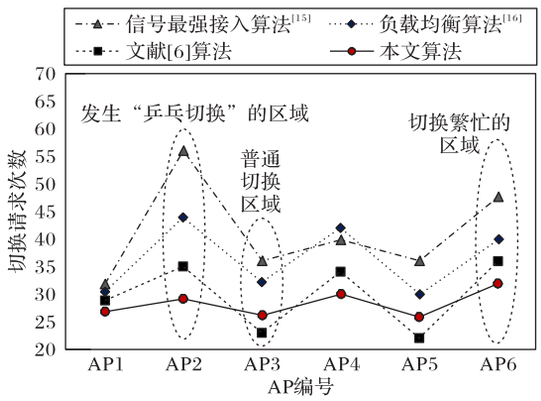



图 13　切换次数统计比较

Fig. 13　Statistics and comparison of handover times

在 WLAN 中,用户既希望切换的次数少,切换的时延短,同时又希望接入的成功率高。在本文的系统环境中,统计不同算法的网络性能,比较结果如表 1 所示。

**表 1　不同切换接入算法的网络性能比较**

Tab. 1　Network performance comparison of different handover access algorithms

| 算法名称 | 切换次数 | 切换成功率/% | 平均切换时延/ms |
|---|---|---|---|
| 信号最强接入算法 | 235 | 89. 26 | 8. 91 |
| 负载均衡接入算法 | 210 | 90. 33 | 10. 45 |
| 文献[6]算法 | 197 | 94. 12 | 12. 71 |
| 本文算法 | 184 | 93. 52 | 9. 69 |

如表 1 所示,与传统的信号最强接入法相比,本文算法的切换请求次数减少了 21. 7%;与传统的负载均衡接入法相比,本文算法的切换次数减少了 12. 3%;与文献[6]算法相比,本文算法的切换次数减少了 6. 6%。另外从表 1 的统计信息可以看出传统的信号最强接入平均切换时延最小,但是这种简单粗暴的方法也导致了切换次数多且成功率不高的问题。由于本文系统采用扁平化的网络结构和基于惩罚因子的接入权值算法,在切换时延和切换次数上效果较优。

## 4　结语

WLAN 和移动互联网形成一个互补的趋势共同发展。针对传统 WLAN 组网中遇到的网络部署和升级困难、异产商设备不兼容、设备参数无法统一利用开发等问题,本文梳理了软件定义无线网络的主流架构,利用南向 OpenFlow 协议的可扩展性定义了系统需要的参数,同时引入变异系数确定不同参数的权重,接着计算 AP 接入控制权值。提出了在 SDWM 架构下,基于全局惩罚因子的接入权值策略。通过实验表明,系统可以有效地减弱 AP 部署密集环境下的频繁切换的“乒乓效应”,减少切换时延和网络切换发生次数。

**参考文献** (References)


[1] 左青云,陈鸣,赵广松,等. 基于 OpenFlow 的 SDN 技术研究[J]. 软件学报, 2013, 24(5): 1078-1097. (ZUO Q Y, CHEN M, ZHAO G S, et al. Research on OpenFlow-based SDN technologies [J]. Journal of Software, 2013, 24(5): 1078-1097.)

[2] HU F, HAO Q, BAO K. A survey on software-defined network and OpenFlow: from concept to implementation [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2014, 16(4): 2181-2206.

[3] SOOD K, YU S, XIANG Y. Software-defined wireless networking opportunities and challenges for Internet of things: a review [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(4): 453-463.

[4] NAHIDA K, YIN C, HU Y, et al. Handover based on AP load in software defined Wi-Fi systems[J]. Journal of Communications and Networks, 2017, 19(6):596-604.

[5] DELY P, KASSLER A, BAYER N. OpenFlow for wireless mesh networks[C]// Proceedings of the 20th International Conference on Computer Communications and Networks. Piscataway: IEEE, 2011: 1-6.

[6] 赵国锋,黎军,王新恒,等. 基于 SDN 的 WLAN 负载感知切换方案实现[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(5):180-184. (ZHAO G F, LI J, WANG X H, et al. Implementation of WLAN load aware handover method based on SDN [J]. Application Research of Computers, 2019, 36(5): 1454-1458.)

[7] WANG K, QI Y, YANG B, et al. LiveSec: towards effective security management in large-scale production networks [C]// Proceedings of the 32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Piscataway: IEEE, 2012: 451-460.

[8] 开彩红,胡欣岳. WLAN 中基于 OpenFlow 的无缝切换机制设计与实现[J]. 电子学报, 2018, 46(2):410-417. (KAI C H, HU X Y. Design and implementation of an OpenFlow-based seamless handover scheme in WLANs[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(2):410-417.)

[9] 闫湘灵. 基于 SDN 的 WLAN 接入控制技术研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2017:21-29. (YAN X L. Research and design of WLAN access control technology based on SDN [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017: 21-29.)

[10] 吴九龙. 基于软件定义网络的 WLAN 组网研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2016:19-30. (WU J L. Research and design of WLAN based on SDN[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016:19-30.)

[11] XIA W, WEN Y, FOH C H, et al. A survey on software-defined networking [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015, 17(1): 27-51.

[12] ROWSHANRAD S, NAMVARASL S, ABDI V, et al. A survey on SDN, the future of networking [J]. Journal of Advanced Computer Science and Technology, 2014, 3(2): 232-248.

[13] FONTES R R, AFZAL S, BRITO S H B, et a1. Mininet-WiFi: Emulating software-defined wireless networks[C]// Proceedings of the 11th International Conference on Network and Service Management. Piscataway: IEEE, 2015:384-389.

[14] LEI T, WEN X, LU Z, et al. SWN: an SDN base framework for carrier grade Wi-Fi networks[J]. China Communications, 2016, 13(3): 12-26.

[15] HAN Y, YANG K. An adaptive mobility manager for software-defined enterprise WLANs [C]// Proceedings of the 8th International Conference on Ubiquitous and Future Networks. Piscataway: IEEE, 2016:888-893.

[16] ZHAO D, ZHU M, XU M. SDWLAN: a flexible architecture of enterprise WLAN for client-unaware fast AP handoff [C]// Proceedings of the 5th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies. Piscataway: IEEE, 2014:1-6.


This work is partially supported by the Program of Fujian Educational Department (JT180823), the Major Project of Fujian Province (2017H0011), the Teaching Reform Project of Fujian Province (FBJG20180130).

**WANG Mingfen**, born in 1981, M. S., lecturer. Her research interests include software defined network, machine learning.