

# 软件定义无线网络中双网络通道互备无线接入点切换方案

彭大川 杨喜敏 唐菀 张潇 范垒

中南民族大学计算机科学学院 武汉 430074

(2018120270@scuec.edu.cn)

**摘要** 软件定义无线网络(Software Defined Wireless Network,SDWN)中,终端在无线接入点(Access Point,AP)切换时容易造成网络中断以及待切换无线接入点选择不当等问题,从而导致实时应用服务质量下降。为了解决这一问题,文中提出了一种基于双网络通道互备的AP切换方案。该方案首先利用双网络通道互备机制在链路层实现先连后断的软切换,并进一步利用SDWN中网络地址映射机制实现网络层的无缝切换。依据基于综合评价法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution,TOPSIS)的思想,设计实现了高性能AP选择算法。该算法中根据待切换AP的信号强度、负载、传输带宽和当前连接数构造待评价对象,并依据待评价对象与理想对象的接近程度进行待切换AP选择。通过NS-3网络模拟器仿真实验表明:相较于基于RSSI的切换方案,所提方案中实时应用的传输时延降低了85.29%,丢包率降低了14.11%,吞吐量提升了8.94%。提出的双网络通道切换方案能够明显改善单网络通道切换方案因AP切换造成的网络中断问题,更好地保障实时应用的服务质量。

**关键词:**软件定义无线网络;双网络通道;无线接入点切换;软切换;TOPSIS

**中图法分类号** TP393.0;TN929.5

## Dual-NIC Mutual Backup Scheme for Access Point Handoff in Software Defined Wireless Networks

PENG Da-chuan, YANG Xi-min, TANG Wan, ZHANG Xiao and FAN Lei

Department of Computer Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China

**Abstract** In the software defined wireless network (SDWN), mobile terminal are likely to cause network interruption and improper selection of awaiting switched wireless access point (AP) during the handoff process, which may result in a significant decrease in real-time application service quality. In order to address this issue, this paper proposes an AP handoff scheme based on dual network interface controller (NIC) mutual backup. This scheme uses the dual-NIC mutual backup mechanism to realize the soft handoff at link layer. The mobile terminal can associate with the new AP first and then disassociate from the old AP. Further, the network address translation (NAT) mechanism is adopted in SDWN to realize seamless handoff at network layer. Inspired by the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS), the proposed AP selection algorithm constructs the candidate object to be evaluated according to the signal strength, load, transmission bandwidth and the current connections numbers of candidate APs. The AP selection are made based on the calculated closeness between the object to be evaluated and the ideal object. Finally, the experiments are conducted on NS-3. The results show that compared with the RSSI based handoff scheme, the transmission delay and the packet loss rate of the proposed scheme are reduced by 85.29% and 14.11% respectively, and the throughput is increased by 8.94%. The proposed dual-NIC mutual backup handoff scheme can significantly improve the problem of network interruption caused by AP handoff in the single-NIC handoff scheme, and better guarantee the service quality of real-time applications.

**Keywords** Software defined wireless networks, dual-NIC, Access point handoff, Soft handoff, TOPSIS

### 1 引言

智慧城市作为城市未来的发展趋势,将新建大量的无线接入点(Access Point,AP)为各行各业提供诸如移动无线视频监控、移动视频会议和应急移动通信等实时性应用服务<sup>[1]</sup>。现有的无线网络技术中,移动终端(Mobile Terminal,MT)通过接入AP使用相关应用服务,单个AP的覆盖范围有限,

MT在移动过程中会产生不可避免的AP切换。MT在AP切换过程中产生的网络中断会导致实时性应用服务不可用,降低实时性应用服务的服务质量(Quality of Service, QoS)。

AP切换过程可分为链路层切换、网络层切换以及应用层切换3个阶段。其中,网络层切换的主要任务是完成因AP切换导致MT的IP信息变更。软件定义无线网络(Software Defined Wireless Network,SDWN)由于其控制和转发分离的

基金项目:国家自然科学基金项目(61902437)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61902437).

通信作者:杨喜敏(yangximin@scuec.edu.cn)

特性,在网络层切换管理中具有管理成本低、流量操作便捷等优势,给传统的 AP 间切换问题提供了新的解决思路,也因此成为 5G 移动网络管理的候选方案之一<sup>[2]</sup>。但 SDWN 只是针对网络层切换提供了新的方案,MT 在进行链路层切换时依然会产生链路中断,进而导致网络中断影响实时性应用的用户体验。因此 SDWN 技术必须结合链路层无缝切换机制才能避免切换过程中产生网络中断<sup>[3]</sup>。

AP 切换的另一个重要方面就是待切换 AP 选择。MT 在进行 AP 切换时,不仅要求切换过程中实时性应用的 QoS 受到尽可能小的影响,还要求待切换 AP 尽可能拥有最优性能。传统切换方案中单纯基于信号强度 (Received Signal Strength Indication, RSSI) 进行待切换 AP 选择可能会导致 MT 切换到 RSSI 最强但整体性能较差的 AP 上。因为 RSSI 只是反映 AP 性能的单一指标,缺乏对带宽、负载以及当前连接数等因素对于待切换 AP 选择的考虑<sup>[4]</sup>。

总之,SDWN 中单网络通道 MT 在 AP 切换时容易造成网络中断以及待切 AP 选择不当等问题,从而导致实时性应用服务质量下降。为了解决这一问题,本文提出一种基于双网络通道互备的解决方案,MT 在切换时能够实现“先连后断”的软切换,确保实时性应用服务不中断。同时利用基于 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) 的 AP 选择算法综合考虑 RSSI、负载、带宽和当前连接数来选择最合适的 AP 进行切换。实验结果表明该方案能够很好地避免因 AP 切换造成的网络中断,且能够选择出综合性能较好的 AP 进行切换,以保证实时性应用的 QoS。

## 2 相关工作

整个 AP 切换过程需要经历网络层切换(负责 IP 地址及路由路径的更改)、链路层切换(负责通信信道的切换)和应用层切换(负责多媒体会话的更改)3 个切换阶段,每个切换阶段都会造成实时性应用服务的中断,其中网络层和链路层切换所产生的服务中断约占总中断时间的 80% 以上<sup>[5]</sup>,因此减少 AP 切换所造成的实时性应用服务中断的关键是网络层和链路层切换方案的优化和改进。

### 2.1 网络层切换

网络层切换的主要任务完成 MT 因 AP 切换导致的网络信息变更和路由路径的更新。针对这一问题,代理移动 IPv6 通过代理机制,将切换前 AP 和切换后 AP 进行绑定,使 MT 在切换时不需要进行 IP 更新,便可继续享受原实时性应用提供的服务<sup>[6-7]</sup>。该类方案避免了 MT 直接参与转交地址配置,有效减少了切换时延,且不需要对 MT 进行硬件上的改动。但代理移动 IPv6 在移动性管理的过程中需要大量信令去维护整个网络路由,这会给网络带来一定负担,另一方面代理移动 IPv6 所产生的三角路由问题也会增加网络资源的消耗。

### 2.2 基于 SDWN 的网络层切换

相较于移动 IPv6 移动性管理方案,SDWN 方案只需要控制器修改相应流表规则即可实现 MT 移动性管理,在管理成本方面有明显优势<sup>[8]</sup>。关于 AP 切换,SDWN 中的一种解决思路是为每个 MT 生成对应虚拟 AP,使 AP 的切换过程变为

虚拟 AP 的迁移过程,减少了切换过程中信令资源的消耗<sup>[9]</sup>。但该类方案虚拟 AP 的迁移全由 SDN 控制器完成,会过多消耗控制器的计算资源,使控制器负担进一步加重<sup>[10]</sup>。另一种解决思路是利用基于 SDWN 的网络地址转换(Network Address Translation, NAT)机制<sup>[11]</sup>,为每个 MT 生成对应虚拟 IP 并与真实 IP 进行 NAT。在 MT 真实 IP 发生变化时,SDN 控制器通过修改流表规则重新将虚拟 IP 与真实 IP 进行绑定,因此无论真实 IP 如何变化,应用服务都能通过虚拟 IP 将数据包传送至 MT,保证了网络会话的连续性。该方案利用了 SDWN 的灵活性,避免了网络层切换所造成的网络中断,但链路层切换导致的网络中断依然存在。

### 2.3 链路层切换

链路层切换阶段具体分为 3 个步骤:AP 扫描、AP 重关联以及身份验证,其中 AP 扫描所耗时间最长。主动扫描<sup>[12-13]</sup>通过主动在各信道发送 probe 报文并等待 AP 响应来获取可连接 AP 信息,节约了 AP 扫描所需时间,减少了链路层切换时延。但该类方案依旧无法避免因 AP 扫描切换导致的链路中断。文献<sup>[14]</sup>提出利用低功耗蓝牙通道进行 AP 扫描,使 MT 可以在与 AP 保持关联的情况下进行 AP 扫描,避免了链路中断。这类方案为后续研究如何减少身份验证和重关联时延提供了一个新的思路。

### 2.4 基于多属性的待切换 AP 选择

不仅 AP 切换过程中导致的网络中断会降低实时性应用的用户体验,待切换 AP 的选择不当同样也会影响实时性应用的用户体验。待切换 AP 选择是一个典型的多属性决策问题。文献<sup>[15]</sup>提出一种基于多臂赌博机模型的 AP 选择算法,将其 AP 选择问题看作一种多臂赌博问题,通过 AP 网络性能的优劣确定奖励高低,将选取最优 AP 问题转化为获取最高奖励问题。该方法能够保证整体网络性能达到最佳,但是由于多臂赌博模型计算过程耗时过长,导致 MT 切换时间增加,影响了切换性能和用户体验。此外,文献<sup>[1]</sup>根据各 AP 所处的基本服务集(Basic Service Sets, BSS)的归一化吞吐量选择适当 AP。该方案提升了整体网络的公平性,且将 AP 选择过程放在了 SDN 控制器上,减轻了 MT 的能耗和开销,加快了 AP 选择过程,但在移动性较强的网络中该方案的效果往往差强人意。

## 3 基于双网络通道互备的切换

针对切换时产生网络中断和待切换 AP 选择不当等问题,本文提出基于双网络通道互备的切换方案。本文方案中 MT 配备了双网络通道,用于正常进行通信的网络通道称为主通道,用于辅助切换的网络通道称为副通道,且副通道仅在切换时被激活。方案整体切换流程如图 1 所示,其中包含切换触发、AP 选择及双通道切换等 3 个模块。当 MT 主通道 SINR 低于 S1 后,副通道被激活并向各信道广播 probe 报文进行 AP 扫描,AP 收到 probe 报文后会进行响应,MT 根据 AP 响应信息将 AP 的 SSID(Service Set Identifier)、RSSI 值插入可连接 AP 列表。一旦主通道 SINR 低于 S2,切换触发,SDN 控制器调用 AP 选择算法模块进行 AP 评价,评价完成后双通道切换模块启动,保证切换过程中实时性应用服务的用户体验。各模块将在后续小节具体阐述。

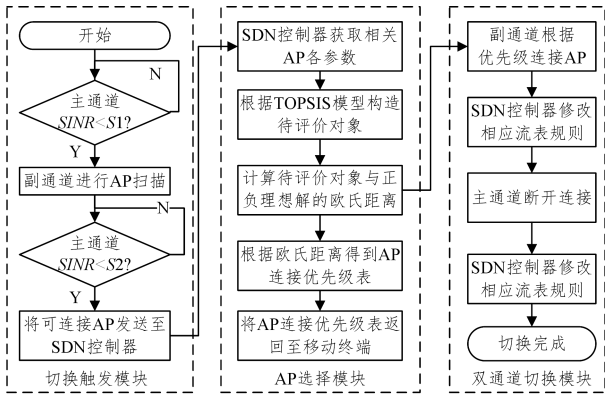


图1 双通道互备 AP 切换流程图

Fig. 1 Dual-NIC mutual backup AP Handoff flowchart

### 3.1 切换触发

切换触发模块的主要任务是判决 MT 是否需要切换。信号与干扰噪声比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) 直接反映 AP 对 MT 的传输性能,因此切换触发模块主要通过检测主网络通道的 SINR 来决定切换是否触发。实验测试了 SINR 值对不同传输速率的网络流量的影响,由图 2 可以发现当 SINR 值小于 3 (中国移动终端测试规范中定义的极差点) 后,各速率的网络流量都先后出现了吞吐量下降的拐点,这说明当 AP 与 MT 间的  $SINR < 3$  时,MT 需要进行 AP 的切换以保证实时性应用的传输速率。因此,本方案选取  $SINR = 3$  作为阈值  $S_1$ ,即主通道 SINR 值低于  $S_1$  时,MT 开始进行主动扫描获取可切换 AP 为切换做准备。

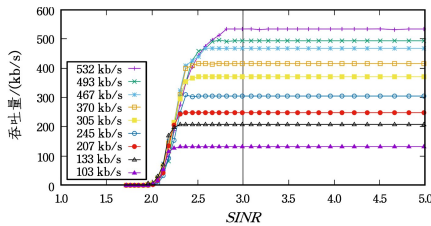


图2 吞吐量随 SINR 变化图

Fig. 2 Throughput varies with SINR

单阈值机制可能会导致 MT 产生 ping-pong 切换,影响 MT 的正常通信,双阈值机制一定程度上能够避免这一情况。当主通道 SINR 低于  $S_1$  时仅进行 AP 扫描,一旦 SINR 低于  $S_2$  时才触发切换。图 3 给出了 SINR 值随移动距离衰减的情况,SINR 由 3 衰减到 2.82 至少需要移动 2m;人步行速度约为 1m/s,在步行情况下 SINR 由 3 衰减到 2.82 需要约 2s;而扫描一个信道的的时间约为 100ms,常用的无线信道为 13 个,即 AP 扫描总时间约为 1.3s。选取  $SINR = 2.82$  作为阈值  $S_2$ ,既可以保证 AP 扫描阶段的顺利完成又能够为切换提供一个缓冲时间,使得 MT 不会在 AP 之间产生 ping-pong 切换。

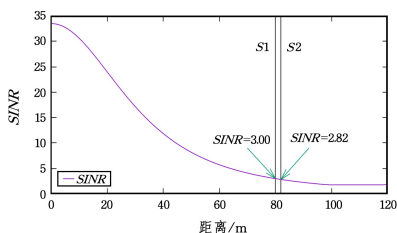


图3 SINR 随 MT 与 AP 间距变化图

Fig. 3 SINR varies with distance between MT and AP

### 3.2 基于 TOPSIS 的 AP 选择

AP 选择模块的主要任务是让 MT 在触发切换时,对候选 AP 进行综合性能评价,指导 MT 进行切换。本方案基于 TOPSIS 算法,综合考虑了 AP 的当前负载、当前连接数、可用带宽和 RSSI 四个直接影响 AP 性能的参数<sup>[4]</sup>,进行待切换 AP 评价。AP 选择模块运行在 SDN 控制器所在主机,其运行过程如图 4 所示,当 MT 进入切换状态后,会将预切换阶段扫描到的所有可连接 AP 的 SSID 及其 RSSI 发送至 SDN 控制器,控制器根据 SSID 获取对应 AP 的负载、当前连接数及可用带宽,并将这些信息整理到待切换 AP 列表作为 AP 选择算法的输入参数,计算出 AP 连接优先级列表并返回给 MT 指导切换。

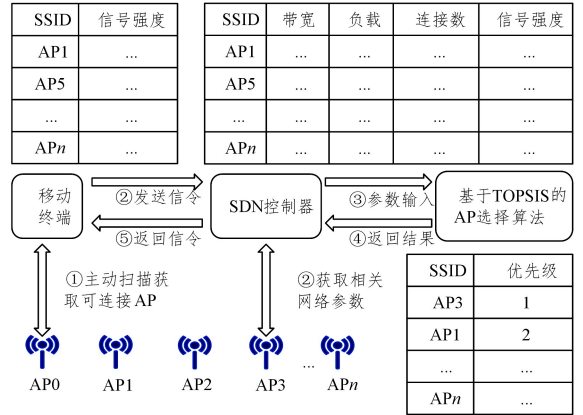


图4 基于 TOPSIS 的 AP 选择模块

Fig. 4 TOPSIS based AP selection module

#### 3.2.1 原始数据矩阵的归一化

由于各网络参数在维数上存在差异,需要对它们进行归一化处理。原始数据矩阵  $x_i = [x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{im}] (i \in [1, m])$  由  $m$  个 AP 的  $n$  个网络参数组成。通过式 (1),得到归一化矩阵  $y_i = [y_{i1}, \dots, y_{ij}, \dots, y_{im}] (i \in [1, m])$ 。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (1)$$

#### 3.2.2 构造加权归一化矩阵

由于各参数对于 AP 性能的影响程度是不一样的,因此需要对归一化矩阵进行加权得到加权归一化矩阵。加权归一化矩阵  $v_i = [v_{i1}, \dots, v_{ij}, \dots, v_{im}] (i \in [1, m])$  由归一化矩阵  $y_i$  和指标权重矩阵  $v_j$  相乘得到。指标权重计算采用熵值法,指标权重阵  $v_j$  通过式 (1) 计算得到,其中  $s_j$  表示归一化矩阵  $y_i$  第  $j$  列的标准差。

$$\bar{\omega}_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^n \sigma_j} \quad (2)$$

#### 3.2.3 计算正负理想解

正理想解  $A^*$  表示抽象出的网络性能最优的虚拟 AP,负理想解  $A^-$  表示抽象出的网络性能最差的 AP。正理想解  $A^* = [v_1^*, \dots, v_j^*, \dots, v_n^*]$ ,由加权归一阵中各列的最大值组成,负理想解  $A^- = [v_1^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-]$  则由各列中加权归一阵中各列的最小值组成的。

#### 3.2.4 AP 评价

各待评价 AP 的优劣通过综合考量它们与正负理想解之间的欧氏距离来评价。式 (3) 和式 (4) 分别用于计算待评价

AP 与正、负理想解之间的欧氏距离  $S^+$  和  $S^-$ 。

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (3)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (4)$$

然后,根据得到的  $S^+$  和  $S^-$  通过式(5)计算出待评价 AP 的评价值  $C_i$ 。在本方案中,评价值  $C_i$  越接近 1 表明待评价 AP 在性能上越优,反之越接近 0 表明性能上越劣。

$$C_i = S_i^- / (S_i^- + S_i^+) \quad (5)$$

### 3.3 双网络通道切换机制

双网络通道切换机制的主要任务就是保证链路和网络不中断的情况下完成 AP 间的切换(软切换)。切换过程如图 5 所示,其中网络五元组指源 IP 地址、源端口、目的 IP 地址、目的端口以及协议号。当 MT 未触发切换时,主通道进行通信,OpenFlow 交换机中流表如图 5 中流表 1 所示。OpenFlow 交换机根据流表中的匹配域匹配对应数据包,并根据流表中的指令将数据包通过主通道转发至 MT。MT 触发切换后,副通道先完成对待切换 AP 的连接,然后 SDN 控制器修改 OpenFlow 交换机中的流表(如图 5 中流表 2 所示),增加一个指令项将原数据包的目的 IP 和目的 MAC 地址修改为副通道对应的地址,并通过副通道转发至 MT,此时原流量由原来的一份变为两份分别从主副通道传输至 MT。当副通道连接稳定后,SDN 控制器修改流表(如图 5 中流表 3 所示),仅仅保留将数据包转发至副通道的指令项,至此切换完成,原主通道进入休眠状态,主副通道互换身份。

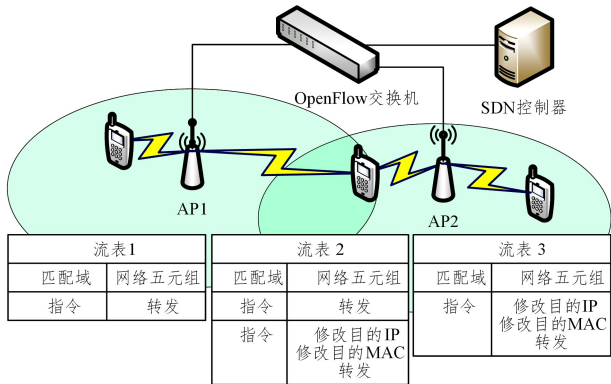


图 5 双网络通道互备切换示意图

Fig. 5 Diagram of Dual-NIC handoff

## 4 实验平台

为验证本方案的可行性,在网络模拟器 NS-3 上搭建了基于 SDN 的移动网络实验平台<sup>[16]</sup>。实验平台的网络拓扑如图 6 所示,其中 SDN 控制器为 OpenDayLight 0.6.4 版本,基于 TOPSIS 的 AP 选择算法运行在 SDN 控制器所在的主机上,通过北向接口与 SDN 控制器进行交互。仿真区域大小为  $80\text{m} \times 160\text{m}$ ,并设置 6 个 AP 用于模拟多 AP 共同覆盖的商业区域。区域内分布 26 个非移动性终端,模拟笔记本电脑等移动性较弱的终端设备。6 个双网络通道 MT 分散在不同的起始位置,并根据不同路径在仿真区域内移动,移动速度为  $1\text{m/s}$ ,UDP 服务器向各 MT 持续发送 UDP 流量,仿真时间为  $1000\text{s}$ 。

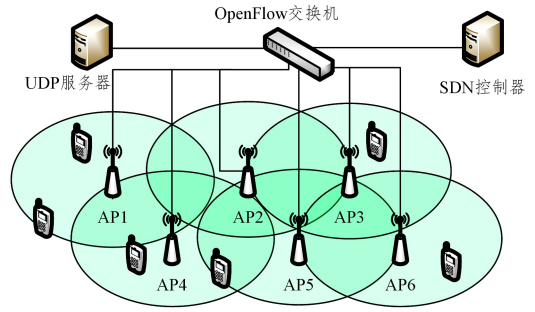


图 6 实验平台拓扑

Fig. 6 Network topology of testbed

切换性能方面的评价指标<sup>[6,15]</sup>主要有:总切换次数、产生网络中断的切换次数、扫描次数、扫描产生的数据包数量以及切换时产生的重复包数量。产生网络中断的切换是指没有成功避免网络中断的切换次数。扫描次数即 MT 触发 AP 扫描的次数,扫描时产生的数据包数量即是 AP 扫描时发送的 probe 报文数量,通过扫描次数和扫描时产生的数据包数量来评判扫描对整体网络的影响。由于本方案中 MT 在 AP 间切换时会出现短暂的双网络通道并行收包的情况,所以需要考虑切换过程中产生的重复包对整体网络的影响。

此外,本文选择各 MT 的平均吞吐量、平均传输时延、平均延时抖动和平均丢包率等 4 个最常用的 QoS 指标<sup>[17]</sup>,来评价本方案对实时性应用服务的影响。

## 5 仿真结果分析

### 5.1 仿真参数设置

AP 仿真参数设置如表 1 所列,其中终端关联数为非移动性终端的关联数,网络负载为非移动性终端通过 AP 访问 Internet 所产生的负载。为了避免 AP 间产生干扰,各 AP 分别设置不同信道,各 AP 的传输带宽均设置为  $20\text{MHz}$ 。

表 1 AP 网络参数

Table 1 Network parameter values for APs

AP	关联数	负载/( $\text{MB} \cdot \text{s}^{-1}$ )	信道	坐标/( $x, y$ )
AP1	3	1	1	(0,0)
AP2	4	1.5	3	(80,0)
AP3	7	6.5	5	(160,0)
AP4	6	8.5	7	(0,-80)
AP5	5	7	9	(80,-80)
AP6	3	2	11	(160,-80)

UDP 服务器发包间隔为  $5\text{ms}$ ,每个 UDP 数据包的总大小为  $1264$  字节,即理想情况下每个 MT 的吞吐量应为  $246.86\text{KB/s}$ 。

### 5.2 结果分析

本节将分析单双通道 MT 在切换过程中的性能表现,并对比双通道 MT 在分别基于 TOPSIS 和基于 RSSI 两种切换方案的切换性能优劣和对 QoS 的影响。

图 7 给出了基于 TOPSIS 方案的单双通道 MT 在 AP 切换过程中的收包量变化情况,其中  $S_1$  和  $S_2$  分别为扫描触发(阈值  $S_1$ )和切换触发(阈值  $S_2$ )时间点。可以发现双通道 MT 在切换触发后收包量会出现凸起,造成这一情况的主要原因是主副通道在切换过程中有一段短暂的并行收包时间(双通道 MT 在切换过程中,副通道会先连接上待切换 AP 并在能够成功接收数据包后才断开主通道的连接)。而单通道 MT 由于必须先断开当前 AP 的连接然后再去连接新 AP,所以会

有一段短暂网络中断时间(收包量为 0)。

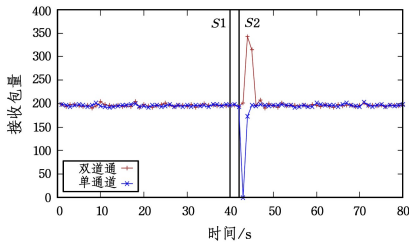


图 7 基于 TOPSIS 的单双通道 MT 切换详情

Fig. 7 Handoff of single and Dual-NIC under TOPSIS based scheme

基于 RSSI 方案的单双通道 MT 在 AP 切过程中的收包量变化在图 8 中给出,双通道 MT 在切换触发后同样有一个收包量的小凸起,但相较于图 7 中的双通道方案而言凸起并不明显。原因主要有两个,一是由于切换后的 AP 性能较差,使得 MT 的收包量大幅下降,从而导致切换过程中收包量凸起不明显。其次是基于 RSSI 的方案选择了 RSSI 较强但综合性能较差的 AP,导致 MT 完成 AP 关联所需的时间变长,进而导致副通道不能在主通道通信质量大幅下降前及时完成新 AP 的连接。

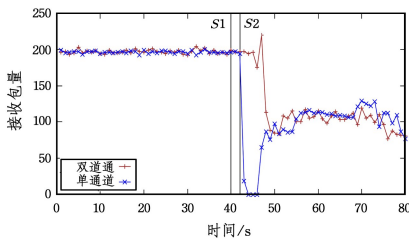


图 8 基于 RSSI 方案的单双通道 MT 切换

Fig. 8 Handoff of single and Dual-NIC under RSSI based scheme

图 8 中单通道 MT 在切换触发后同样出现了收包量为 0 的情况,且时间要长于基于 TOPSIS 的单通道切换方案,这同样是因为选择出的 AP 综合性能较差,导致 MT 关联 AP 时间增长。无论是基于 TOPSIS 还是基于 RSSI 的切换方案,相较于单通道而言,双通道一定程度地避免了因 AP 切换产生的网络中断。

基于 TOPSIS 和基于 RSSI 的 AP 选择算法的双通道 MT 切换性能进行对比如表 2 所列。基于 TOPSIS 的方案总切换次数大于基于 RSSI 的方案,原因是基于 RSSI 的方案会使 MT 切换到 RSSI 较高的 AP 上,而切换判决指标 SINR 和 RSSI 呈正相关,所以就导致基于 RSSI 的方案更不易触发切换。但是在基于 RSSI 的方案中,有 4 次切换出现了网络中断,高于基于 TOPSIS 的切换方案。原因是基于 RSSI 的方案选择了性能较差的 AP,进而导致副通道连接 AP 时间过长造成切换过程中网络中断。

表 2 切换性能对比

Table 2 Handoff performance comparison

性能指标	基于 RSSI	基于 TOPSIS
总切换次数	31	37
链路中断次数	4	1
扫描次数	40	44
扫描包量	16962	19306
重复包量	7760	10898

在扫描次数方面,两个方案的扫描次数都大于切换次数,导致这一结果的原因是 MT 在移动过程中出现了 SINR 值在阈值 S1 和 S2 之间徘徊的情况。在这种情况下,双阈值机制做出的决策是只扫描但不切换,而单阈值机制会直接判定切换。所以,双阈值机制在一定程度上减少了不必要的切换,且主动扫描产生的一个 probe 报文的长度只有 47 字节,一个扫描周期长约 2~4s,产生约 430 个的 probe 报文,基本不会对网络造成影响。基于 RSSI 的切换方案在 31 次切换过程中共产生 7760 个重复包,而平均一次切换产生 250.32 个重复包,而基于 TOPSIS 的切换方案在 37 次切换过程中共产生 10898 个重复包,平均一次切换产生 294.54 个重复包,且切换产生的重复包的数量会随着切换过程中主副通道衔接的优化逐渐降低。

表 3 列出了基于 TOPSIS 方案和基于 RSSI 方案的双通道 MT 在 QoS 方面的性能对比。在平均吞吐量、平均传输时延以及平均丢包率 3 个指标上,基于 TOPSIS 的切换方案明显优于基于 RSSI 的切换方案。原因是基于 RSSI 的切换方案没有对待切换 AP 进行综合性评价,因此可能会切换到性能较差的 AP 上,进而导致实时性应用的 QoS 受影响较大。基于 TOPSIS 的切换方案的时延抖动略高于基于 RSSI 的切换方案,原因是它产生的切换次数更多。两个方案的时延抖动都比较小,对实时性应用服务的 QoS 影响不大。整体而言,基于 TOPSIS 的切换方案能更好地保障实时性应用服务的 QoS。

表 3 QoS 性能对比

Table 3 QoS performance comparison

性能指标	基于 RSSI	基于 TOPSIS
平均吞吐量/(KB/s)	221.79	241.62
平均传输时延/s	0.8139	0.1197
平均时延抖动/s	0.0223	0.0244
平均丢包率/%	20.50	6.39

**结束语** 本方案采用双网络通道的切换机制并结合了基于 TOPSIS 的 AP 选择算法,改善了软件定义无线网络中因单网络通道切换机制导致的 MT 在 AP 切换过程中网络中断的问题。利用双阈值机制在一定程度上减少了不必要的切换次数,节约了因不必要切换所造成的资源消耗。结合基于 TOPSIS 的 AP 选择算法,综合考虑了 AP 的当前负载、传输带宽、当前连接数和 RSSI 对待切换 AP 进行评价,相较于基于 RSSI 的切换方案更能保障实时性应用的 QoS。

参 考 文 献

[1] PENG M, HE G, WANG L, et al. AP Selection Scheme Based on Achievable Throughputs in SDN-enabled WLANs[J]. IEEE Access, 2018, 7(12): 4763-4772.

[2] SUE K M, KAMOLPHIWONG S, KAMOLPHIWONG T, et al. SDN Based Fast Handover over IP Mobility[C] // 2019 23rd International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC), 2019: 345-350.

[3] YAO D, SU X, LIU B, et al. A Mobile Handover Mechanism Based on Fuzzy Logic and MPTCP Protocol under SDN Architecture \* [C] // 2018 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2018: 141-146.

- [5] SAP C, NW A, SDA B, et al. Securing future decentralised industrial IoT infrastructures: Challenges and free open source solutions [J]. *Future generations computer systems; FGCS*, 2019, 93:596-608.
- [6] ZHANG H Q, JIANG H, ZENG X H, et al. Research on the Serial Port Control System Based on Websocket [J]. *Software Engineering*, 2019, 22(6):22-25.
- [7] WU R B. Design and Implementation of Ethernet Serial Server based on ARM9 [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.
- [8] CAI J, WANG M. Design and Implementation of Serial Server Module Based on CPCI Bus [J]. *Comput. & Network*, 2013, 39(19):54-57.
- [9] ZHANG W, SHI F. Design and Implementation of Home Remote Monitoring System Based on Embedded Gateway [C] // 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology (ICET). Chengdu, China, 2019:504-508.
- [10] WANG T H, HE Y L. Design and Implementation of UART Server Based on Linux [J]. *Electronic Sci. & Tech.*, 2017, 30(6):105-108.
- [11] GEIDER J. Sinema-Remote-Connect-Plattform steuert Fernzugriffsrechte: Zugriffsrechte in eigener Hand [J]. *Industrie Anzeiger*, 2017, 139(16):52-53.
- [12] XU J. A Cloud Desktop Control System Based On Android Platform [D]. School of Computer Science and Engineering, 2017.
- [13] LUO L. Research on Quality Control Technology of Data Transmission of P2P in Near Field Communication [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [14] YUAN G, GUO J, HOU Z F. Cross NAT to establish TCP connections in the study of wood [C] // CACIS. 2008:531-535.
- [15] MAATA R L R, CORDOVA R, SUDRAMURTHY B, et al. Design and Implementation of Client-Server Based Application Using Socket Programming in a Distributed Computing Environment [C] // 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICIC). Coimbatore, 2017:1-4.



**YU Xin-yi**, born in 1979, Ph. D. His main research interests include robot control and planning.

(上接第 431 页)

- [4] YU H W, ZHANG B. A Hybrid MADM Algorithm Based on Attribute Weight and Utility Value for Heterogeneous Network Selection [J]. *Journal of Network & Systems Management*, 2019, 27(7):756-783.
- [5] ZHAO W, XIE J. IMeX: Intergateway Cross-Layer Handoffs in Internet-Based Infrastructure Wireless Mesh Networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(10):1585-1600.
- [6] GAO T, DEN X, WANG Y, et al. PAAS: PMIPv6 Access Authentication Scheme based on Identity-based Signature in VANETs [J]. *IEEE Access*, 2018, 6(6):37480-37492.
- [7] KANG B, PARK C, CHOO H. A Location Aware Fast PMIPv6 for Low Latency Wireless Sensor Networks [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(20):9456-9467.
- [8] FARSHIN A, SHARIFIAN S. A Chaotic Grey Wolf Controller Allocator for Software Defined Mobile Network (SDMN) for 5th Generation of Cloud-based Cellular Systems (5G) [J]. *Computer Communications*, 2017, 108(8):94-109.
- [9] VIEIRA J L, PASSOS D. An SDN-based Access Point Virtualization Solution for Multichannel IEEE 802.11 Networks [C] // 2019 10th International Conference on Networks of the Future (NoF). Rome, Italy, 2019:122-125.
- [10] TANG W, FENG W, YANG X, et al. A Survey on the Optimization of OpenFlow Flowtable Space in Software Defined Networking [J]. *Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2019, 38(3):459-465.
- [11] BOJOVIC P D, BOJOVIC Z, BAJIC D, et al. IP Session Continuity in Heterogeneous Mobile Networks Using Software Defined Networking [J]. *Journal of Communications and Networks*, 2017, 19(6):563-568.
- [12] CHUNG J, PARK J, KIM C K, et al. C-SCAN: Wi-Fi Scan Offloading via Collocated Low-Power Radios [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, PP(2):1142-1155.
- [13] JUN J, HE L, GU Y, et al. Low-Overhead WiFi Fingerprinting [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, 17(3):590-603.
- [14] ZHAO Z M, FENG J. Research on Handoff Technologies for IEEE 802.11 Wireless LANs [J]. *Computer Technology and Development*, 2018, 28(10):1-7.
- [14] HAN J, KIM J, JOO C, et al. SplitScan: Sharing Wi-Fi Scan Information through Bluetooth Low Energy [C] // 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall). Honolulu, HI, USA, 2019:1-5.
- [15] YANG B, WANG X, QIAN Z. A Multi-Armed Bandit Model-Based Vertical Handoff Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(10):2116-2119.
- [16] KHAN F, PORTMANN M, BACKHAUL, QoS, and Channel-aware Load balancing Optimization in SDN-based LTE Networks [C] // 2017 11th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS). Gold Coast, QLD, 2018.
- [17] ZHAO Z, FENG J. Network-level Green Energy-saving Mechanism for Backbone Networks [J]. *Journal of Software*, 2020, 31(9):2926-2943.



**PENG Da-chuan**, born in 1996, post-graduate. His main research interests include software defined networking and wireless network.



**YANG Xi-min**, born in 1972, associate professor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include software defined networking and network security.