

园区 WiFi 网下软定义移动通信的设计与实现*

吴君青, 陈鸣, 胡超, 张国敏



(解放军理工大学 指挥信息系统学院, 江苏 南京 210007)

通讯作者: 吴君青, E-mail: 109766530@qq.com

摘要: 当前 WiFi 园区网络存在移动通信范围有限、主机地址配置受限等问题。软定义移动组网的已有研究大多集中于实现无线接入点的可编程性, 在实际部署中需要使用专用的接入点设施。以单跳有设施网络为研究目标, 提出了一种园区 WiFi 网下软定义移动通信方案, 为移动主机访问本地资源提供免配置接入和移动通信支持。其中, 网络设施选择 OpenFlow 网络, 普通接入点直接连接 OpenFlow 交换机, 控制器负责分发包含接入位置的流表项, 为移动主机提供基于名称的路由转发, 并主动调整通信流的返回路径。目前已经完成系统原型开发, 进行了移动通信实验, 测量和分析了不同配置下的网络可用带宽和切换时延。实验结果表明, 该组网模式可以实现主机的移动通信, 主机网络配置和 OpenFlow 交换机性能对切换时延影响较小。

关键词: 软件定义网络; WiFi; OpenFlow; 移动通信; 切换时延

中文引用格式: 吴君青, 陈鸣, 胡超, 张国敏. 园区 WiFi 网下软定义移动通信的设计与实现. 软件学报, 2016, 27(Suppl. (2)): 35-42. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16016.htm>

英文引用格式: Wu JQ, Chen M, Hu C, Zhang GM. Design and implementation of software defined mobile communication for campus WiFi networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016, 27(Suppl. (2)): 35-42 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16016.htm>

Design and Implementation of Software Defined Mobile Communication for Campus WiFi Networks

WU Jun-Qing, CHEN Ming, HU Chao, ZHANG Guo-Min

(School of Command Information System, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Some problems exist in current WiFi campus networks, such as limited range of mobile communication, limited host network configuration. Many approaches have been proposed to introduce programmability in wireless networks, and all these systems require special software or hardware in the access point, which raises the issues of practicality. Aiming at single-hop infrastructured network, a solution of software defined mobile communication is proposed for campus WiFi networks, in which mobile hosts can access with free configuration and communicate in high mobility. In this architecture, OpenFlow network is chosen as network infrastructure and commercial access points connect to OpenFlow switch directly. The controller is responsible for downloading flow items containing mobile location, providing mobiles with name-based routing and adjusting reverse path actively for all traffic. A prototype has been implemented and experiments are carried out about mobile communication, in which the performance is measured and analyzed under different configurations. Experimental results show that mobile hosts can achieve mobile communication and the handover delay is not influenced by network configuration for mobile hosts and performance of OpenFlow switch.

Key words: software-defined network; WiFi; OpenFlow; mobile communication; handover delay

随着 WiFi 通信技术的发展和普及, 越来越多的企业园区通过 WiFi 接入点 (access point, 简称 AP) 为访客

* 基金项目: 国家自然科学基金(61379149); 江苏省自然科学基金(BK20140070)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61379149); Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (BK20140070)

收稿时间: 2015-05-31; 采用时间: 2016-01-05

提供本地资源的无线接入^[1].WiFi 技术覆盖范围有限,需要依靠相关设施提供网络层的端到端连接控制.其中,当主机在整个园区网内漫游时,如何保持当前会话不中断是一个技术难题.TCP/IP 架构下保持会话连接需要两个条件:通信主机保持原有的网络配置;切换 AP 后实现正确的分组转发.当前普遍采用单跳有设施的无线局域网架构,通过二层交换机连接多个接入点.每个 AP 配置 DHCP 服务为移动主机自动分配 IP 地址.该方案虽然简化了移动主机的接入流程,但是只支持有限度的移动通信.主机的移动范围局限在单个 AP 覆盖范围内.如果所关联的 AP 发生改变,移动主机必须使用新的 IP 地址,从而中断以 IP 地址和端口号为标识的 TCP 会话.

上述组网方案局限于 TCP/IP 协议框架,该协议的服务对象是需要网络互联的固定主机.其中,主机 IP 地址承担了寻址和标识的双重身份,不适合移动通信的组网要求.因此,基于 WiFi 接入网络的实际特点,设计一种支持移动通信的无线网络架构是一个值得研究的目标.软件定义组网(software-defined networking,简称 SDN)是一种新的组网方式,支持以流为粒度的分组转发控制^[2].OpenFlow 协议是 SDN 的通信标准之一,可以按照多种分组首部定义流信息^[3].

本文的目标是针对园区的无线局域网,基于 SDN 设计网络架构,为移动主机提供免配置接入和移动通信支持.首先研究主机在免配置的前提下能够互联互通的机理;其次研究主机在移动时如何保证连接不中断的技术;最后建立原型系统来验证该组网方案.本文第 1 节概述相关研究.第 2 节提出一种基于 OpenFlow 的 WiFi 组网方法.第 3 节研究其中的一些关键技术.第 4 节建立原型系统,对关键技术进行实验验证.最后总结全文并指出下一步的工作.

1 相关工作总结

WiFi 工作在非许可无线频谱,具有低成本和高速率等特点.Ganapati 等人提出了基于 WiFi 技术实现无线城市的理念,并分析了相关投资模式^[4].Chen 等人分析了用户验证问题,提出了 WiFi 和 WiMax 混合组网模式下的无缝移动方案^[5].Pang 等人提出了一种 WiFi 接入点的协作式选择方法,以 WiFi-Reports 格式提供 AP 的连接数和性能信息,从而使移动主机有更优的选择^[6].上述研究中均基于 TCP/IP 协议组网,WiFi 负责以无线方式实现最后一跳的数据链路层接入.移动主机需要重新配置接入网络的 IP 地址等参数,但是不能使用归属 IP 地址,只能在单个接入点的覆盖范围内实现移动通信.

SDN 将交换机功能分离为控制平面和转发平面,由控制器提供集中式的逻辑控制.OpenFlow 是 SDN 定义的南向接口,目前已在有线网络领域得到了应用.与此同时,将 SDN 用于无线组网也有不少研究.其中,Bansal 等人提出了 OpenRadio,使用可编程内容寻址存储器设计了接入点 AP,从而提供了可编程支持^[7].Gudipati 等人针对无线访问网络(radio access network,简称 RAN)中频谱资源的分配问题提出了 SoftRAN,将某个区域内的多个基站统一虚拟为一个大型 AP,由控制器在多个基站之间统一分配频谱资源,从而优化频谱资源的使用效率^[8].Schulz-Zander 等人提出了轻型虚拟接入点(light virtual access point,简称 LVAP),并基于 LVAP 设计了软定义架构 Odin^[9,10].其基本思路是通过 LVAP 实例记录移动主机和 AP 的关联信息,控制器负责统一调度和分配 LVAP.该方案没有修改 802.11 的通信协议,支持兼容已有的业务终端.上述研究集中在 AP 层的链路接入控制方面,目标是将 AP 功能分解为控制平面和数据平面,并提供无线网络下的南向接口.其问题是需要 AP 上开发专门模块,不兼容已有的普通 AP.此外,控制器需要同时协调上述接口和 OpenFlow,才能实现免配置接入和移动通信.

OpenFlow 虽然不能匹配 WiFi 数据帧,但是在网络层提供了以流为粒度的转发控制.对于单跳有设施的网络架构,只要通过相关字段定义流,基于现有的 OpenFlow 机制可以实现基于名称的路由,并感知端主机的移动.只要移动主机能够主动切换接入点,连接到普通 AP 的 OpenFlow 网络中即可为移动主机提供免配置接入和移动通信.

2 系统设计机制

2.1 系统组成

本文所提出的 WiFi 网络称为 FC-WiFi(WiFi network with configuration free),其组网方案描述如下:

- (1) 网络设施选择 OpenFlow 网络.部署数台彼此相连的 OpenFlow 交换机组成有线网络,部署控制器控制 OpenFlow 交换机.
- (2) 网络接入选择 WiFi 技术.根据所需覆盖的通信范围,快速部署一定数量的无线接入点 AP;每个 AP 直接连接交换机端口,为移动主机提供无线接入.
- (3) 部署服务器.相关服务器直接与 OpenFlow 交换机相连.

图 1 给出了一个 FC-WiFi 的部署示例,其中包括控制器 C 、OpenFlow 交换机 OFS_n 、接入点 AP_{ij} 和服务器 S 以及移动主机 MH_k ,其中 $i,j,k,n=1,2,\dots$

- 控制器 C :提供符合 OpenFlow 规范的功能,维护配置信息表(包括移动主机、服务器的 MAC 地址、连接端口等信息),维护网络拓扑和计算通信路由等.
- OpenFlow 交换机 OFS :根据流表转发分组,将未匹配分组转发至控制器.
- 接入点 AP :提供 WiFi 接入,配置 SSID 和加密方式实现接入控制.
- 移动主机 MH :运行基于 Socket 的网络应用,维持在归属网络中的网络配置.当主机移动在不同 AP 之间切换时,可基于信号强度自动关联合适的 AP 或由人工方式关联某个 AP .
- 服务器 S :具有众所周知的 IP 地址和基于 Socket 的公共服务,与 OpenFlow 交换机直接连接.

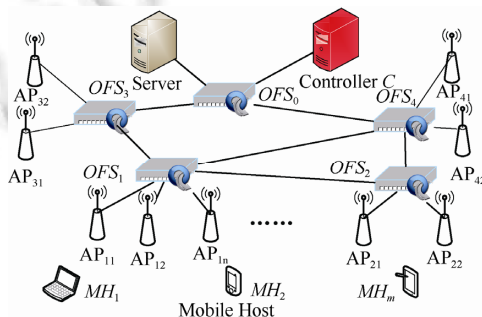


Fig.1 Illustration of components in FC-WiFi

图 1 FC-WiFi 组成示例

当移动主机 MH_1 与服务器 S 建立会话时,其转发路径将受到控制器 C 的控制.当 MH_1 关联 AP_{11} 并接入网络后, MH_1 与服务器的连接请求报文到达 OpenFlow 交换机 OFS_1 . OFS_1 无法将其与流表项匹配,就向控制器转发该请求报文.若控制器鉴别 MH_1 身份后,用配置信息表记录它的当前接入位置(如经 OFS_1 的端口 1);控制器计算 MH_1 到达 S 的路由后,向交换机 OFS_1 和 OFS_3 下发流表.此时, MH_1 与 S 能够建立应用连接并进行通信.

2.2 FC-WiFi 的工作原理

为了保持主机通信不中断,FC-WiFi 需要实时感知主机移动,并为通信双方建立正确的通信路径.在整个切换过程中,主机之间的会话标识符必须保持不变.下面首先介绍基于名称的选路机理.然后介绍主机移动的切换机理.

2.2.1 基于名称的选路机理

为了进行深入讨论,进行下列定义.

定义 1(应用连接 App_i). 移动主机 MH 与服务器 S 之间应用 i 的连接,可标记为

$$App_i := \{IP_{MH}, Port_{MH}, IP_S, Port_S\} \tag{1}$$

其中,IP 表示主机或服务器的 IP 地址,Port 表示主机或服务器的运行应用程序端口号.一个基于 Socket 开发的应用程序,保持连接不中断的前提是这 4 元组不改变.

定义 2(应用流 $flow_i$). 一组具有相同首部属性的分组集合,代表属于应用 i 的分组序列.

基于 OpenFlow 协议规范,交换机可以按照公式(2)标记移动主机 MH 发送到服务器 S 的应用流.

$$flow := \{InPort, MAC_{MH}, MAC_S, IP_{MH}, Port_{MH}, IP_S, Port_S\} \quad (2)$$

其中, $InPort$ 表示主机在交换机的输入接口, MAC 表示主机或服务器的 MAC 地址.这两个元组与应用连接 i 无关,其他元组含义同式(1).

定义 3(接入位置 loc). 主机接入当前网络的交换机以及接口序号,可标记为

$$loc_i := \{Dpid, Inport\} \quad (3)$$

其中, $Dpid$ 表示主机所连接 OpenFlow 交换机的唯一标识符, $InPort$ 含义同上.

定义 4(路径 $Path$). 由移动主机 MH_1 与服务器 S 之间路由确定的通路,可标记为

$$path := \{(InPort_i, Dpid_i, OutPort_i), \dots, (InPort_k, Dpid_k, OutPort_k)\} \quad (4)$$

路径由一组包含交换机的元组序列所标识,每个元组中包含交换机以及对应的输入接口和输出接口.其中, $OutPort_i$ 表示第 i 个 OpenFlow 交换机的输出端口, $Dpid$ 和 $Inport$ 含义同上.路径 $Path$ 可以由控制器内部路由模块 $l2_multi$ 基于通信双方的 MAC 地址确定.该模块维持了所有主机的 MAC 地址和接入位置的映射表,并提供了基于主机位置确定路径的路由算法.

对比式(1)和式(2),对 FC-WiFi 中两台端主机而言,其上可以运行多个不同的应用程序.由于端主机可以由其 MAC 地址所代表,由定义 3 和 4 可知,此时这两个端主机之间的路径也是确定的.因此,如果使用 MAC 地址代表主机名字,上述路径决策过程可称为基于名字的路由选择算法.并且这种基于名字的路由算法是 OpenFlow 网络本身具有的特征,即由控制器根据名字确定而无需端主机的 IP 地址参与.因此,无论移动主机原来属于哪个归属网络,建立应用连接的过程都无需改变其主机配置,即移动主机入网可以是免配置的.

2.2.2 主机移动的切换机理

当主机在 FC-WiFi 中移动时,为保持通信不中断,主机必须从一个渐远 AP 切换到另一个渐近 AP.IP 网络中的主机会话使用 socket 实现,其标识符基于 IP 地址和端口号定义.如果主机改变了 IP 地址,操作系统会自动终止当前的会话连接.此外,每当建立 TCP 连接,通信终端会设置连接活动定时器.如果在定时器到期之前没有分组返回,通信终端会默认当前连接已失效并主动终止.因此,移动主机保持 TCP 连接不中断的前提是:不改变通信双方的 IP 地址;在定时器到期之前调整通信路径.

本系统采用方案如下:(1) 在流定义中包含接入端口和 IP 地址等信息;(2) 控制器主动设置返回流的流表项.首先,实时感知主机的移动接入.通信主机一旦发生移动,必然改变所连接的接入位置.令 $flow_{MH}$ 表示交换机中移动主机 MH 发往服务器 S 的流标识, $flow_S$ 表示 S 发往 MH 的流标识,其定义分别如式(5)和式(6)所示.假设某个时刻 MH 发生了移动,则 $flow_{MH}$ 的值将会改变.基于 OpenFlow 协议,控制器将收到交换机提交的新流分组,从而实时感知客户端的移动事件.因此,只要在流定义中包含输入接口($InPort$)信息,控制器即可实时感知移动切换事件,同时应用连接的标识符可以保持不变.

$$flow_{MH} := \{InPort_{MH}, IP_{MH}, Port_{MH}, IP_S, Port_S\} \quad (5)$$

$$flow_S := \{InPort_S, IP_S, Port_S, IP_{MH}, Port_{MH}\} \quad (6)$$

其次,主动调整通信路径.TCP 通信为双向通信,移动后的服务器流需要正确返回.如果服务器的位置保持不变,则返回流的标识值不会变化,因此,控制器需要主动调整服务器流的返回路径.控制器在感知到移动事件过程中,可以获得移动主机的当前位置以及接收方相关信息,并调用 $l2_multi$ 模块计算出如式(4)所示的通信路径.对于返回路径,可以直接使用如(7)所示的逆向路径.因此,一旦发生移动切换,控制器就可以实时调整通信路径.最终,经短暂停顿后,应用流中的后继分组仍能持续通信.

$$path := \{(OutPort_k, Dpid_k, InPort_k), \dots, (OutPort_i, Dpid_i, InPort_i)\} \quad (7)$$

3 系统实现

根据第 2 节设计的体系结构,我们设计实现了 FC-WiFi 原型系统.下面重点讨论其中涉及的关键技术.

3.1 IP 分组处理流程

控制器必须正确处理 IP 分组,制定正确的转发路径并下发相关流表项.IP 分组处理流程如图 2 所示,其中, MAC_{DST} 表示 IP 分组包含的目标 MAC, IP_{DST} 表示目标 IP, MAC_{NEW} 代表按照 IP_{DST} 查询而得的 MAC 信息.整个处理流程如下.

- 主机分类,如代码第 1 行和第 2 行.基于目标 IP 地址,控制器查询得到 MAC 记录(MAC_{NEW}).如果 $MAC_{DST}==MAC_{NEW}$,则通信双方属于同一个 IP 子网,否则属于不同的 IP 子网.
- 同一子网处理,如代码第 3 行和第 4 行.对于同一个 IP 子网内的 IP 分组,控制器调用底部 API,使用最小生成树计算转发路径,并下发对应的流表项.
- 不同子网处理,如代码第 5 行~第 9 行.如果通信双方不属于同一个 IP 子网,控制器需要将分组的目标 MAC 设置为 MAC_{NEW} .首先计算转发路径并向相关交换机下发流表项,此外需要在最后的 OpenFlow 交换机上添加首部修改操作.

```

Input:  $IP_{DST}, IP_{SRC}, MAC_{DST}, MAC_{SRC}$ .
Output: installing the flow table in switches.
1.  $MAC_{NEW} \leftarrow ip\_map.get(IP_{DST})$ 
2. if ( $MAC_{NEW}==MAC_{DST}$ ): //belong to same subnet
3.   invoke  $l2\_multi(MAC_{DST}, MAC_{SRC})$ ; //calculating the shortest path
4.   installs the flow table in switches;
5. else //belong to different subnet
6.   invoke  $l2\_multi(MAC_{NEW}, MAC_{SRC})$ ;
7.   installs the flow table in switches;
8.   modify destination MAC at last switch
9. end if

```

Fig.2 Algorithm description for procession IP packets in controller

图 2 控制器实现 IP 分组处理的算法描述

3.2 ARP 分组处理

控制器必须正确响应并处理 ARP 报文,从而确保移动主机发送 IP 分组.在 OpenFlow 机制中,ARP 报文起着重要作用.例如,移动主机接入 FC-WiFi 后,首先会发送广播 ARP,以确保本机 IP 地址的唯一性;在发送 IP 分组之前,移动主机发送查询 ARP,以获取下一跳 MAC 地址等.按照 IP 协议,如果移动主机和服务器属于同一 IP 子网,主机直接查询服务器的 MAC 地址;否则,移动主机将查询默认网关的 MAC 地址.因此,控制器可能收到目标 IP 地址不存在的 ARP 查询报文.

本系统以 MAC 地址作为主机标识,在分组转发过程中首先根据 IP 地址查询其 MAC 地址,对于 IP 地址不存在的 ARP 查询报文,控制器直接返回一个假定的 MAC 地址,以使发送方能够继续发送分组.由此,控制器对 ARP 分组处理如下:对于广播 ARP,判断源 IP 地址在网络中是否存在;若存在,则返回冲突提示;对于查询 ARP,返回目标 IP 对应的 MAC 地址;如果目标 IP 不存在,则返回假定 MAC 地址.

3.3 移动主机切换 AP

WiFi 遵循 802.11 标准,移动主机和 AP 之间通过主机 MAC 和 BSSID 标识进行关联.其中,BSSID 是 AP 所在的基本服务集合标识符.一旦与 AP 建立关联,移动主机会发送包含其 BSSID 的数据帧,AP 收到数据帧后返回 ACK 以维持此关联.只有当关联 AP 的信号强度发生了严重衰减,主机才会重新扫描和关联新的 AP.为了实现全网范围内的移动通信,移动主机需要主动切换到适当的 AP.FC-WiFi 采用的主动切换方案是:在感知主机移动趋势的过程中,基于信号强度选择下一个 AP 接入点.

每台移动主机都维持一张 AP 状态表,以网络名 SSID 为索引,记录时间、信号强度和移动状态.首先,主机周期性(如每隔 5s)扫描周边可达的接入点 AP,并以 SSID 为索引记录信号强度.如果某个 AP 的信号强度持续增强,表示主机正在靠近该 AP,计算该 AP 和当前所接入 AP 的信号强度差值.如果该差值达到某个阈值,移动主机将主动关联该 AP.

4 实验和评估

我们在 WiFi 无线环境下实现了 FC-WiFi 原型系统,并进行了一系列相关移动通信实验,重点分析了系统的可用带宽、切换时延等性能指标.

4.1 实验环境

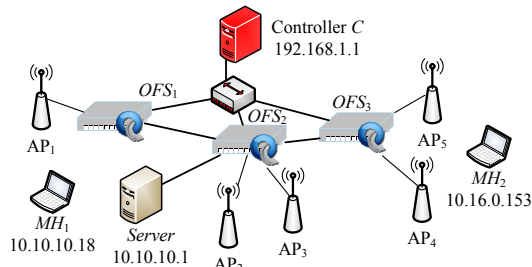


Fig.3 Illustration of FC-WiFi experimental enviroment

图 3 FC-WiFi 的实验环境和配置说明

为了验证基于名称路由和 FC-WiFi 机制的可行性和可用性,我们搭建了如图 3 所示的 FC-WiFi 实验环境.其中包括 OpenFlow 软件交换机 2 台、V5WiFi 公司的 SDNAP 交换机 1 台、Cisco 公司的 AIR-AP1151A 接入点 5 台、POX 控制器 1 台和 Linux 主机 2 台以及服务器 1 台.2 台 OpenFlow 软件交换机 OFS_1, OFS_3 均为运行 openflow-1.0.0 软件的 Linux PC.这些 PC 采用 i5-3470CPU,主频为 3.2GHz,内存为 4GB,具有 4 端口千兆以太网.控制器采用了 pox-carp 版本,与交换机之间使用带内方式互连.控制子网为 192.168.1.0/24,Server 和 MH_1 属于子网 10.10.10.0/24, MH_2 属于子网 10.16.0.0/8.

4.2 移动主机免配置接入

第 1 个实验是考察当移动主机关联 AP 后,能否免配置访问 FC-WiFi 中的服务器资源.首先,Server 运行 iperf 的服务器模式指令以监听端口 10086,然后在移动主机 MH_1 和 MH_2 分别运行 iperf 的客户模式,并主动连接服务器并产生 TCP 流量.在免配置接入过程中, MH_1 分别关联 AP_1 和 AP_2 , MH_2 分别关联 AP_3 和 AP_4 .图 4(a)是在 4 种不同关联情况下, MH_1 和 MH_2 访问服务器时的可用带宽变化图.

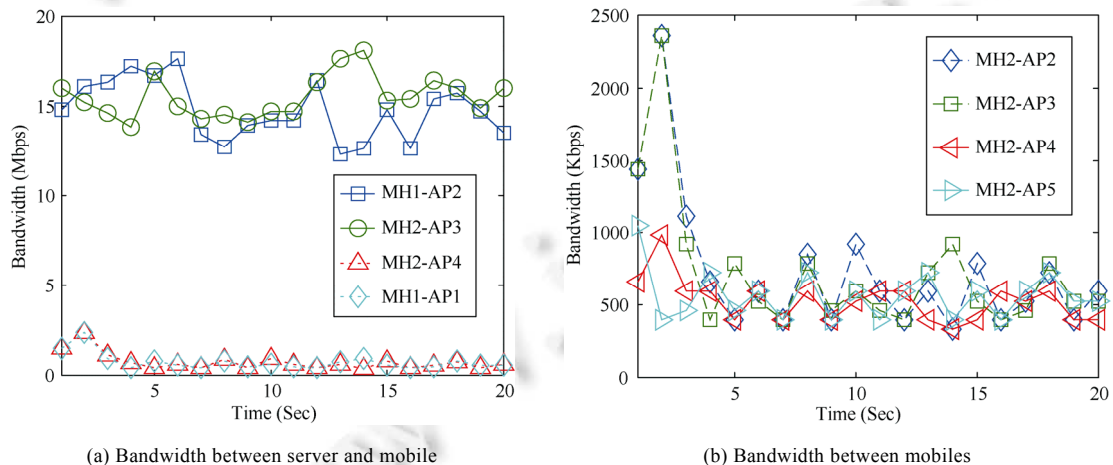


Fig.4 Available bandwidth when association to different access points

图 4 关联不同接入点时的可用带宽

第 2 个实验是考察两台移动主机关联 AP 后能否实现彼此资源共享.首先是 MH_1 关联 AP_1 并运行 iperf 指令监听端口 10086,然后是 MH_2 关联接入点并运行 iperf 指令,主动连接 MH_1 的 10086 端口.实验中, MH_2 依次选择接入点: AP_2, AP_3, AP_4 和 AP_5 .图 4(b)描述了在免配置接入情况下, MH_2 访问 MH_1 时的可用带宽变化图.

当移动主机访问服务器时,在 MH_1-AP_2 和 MH_2-AP_3 的情况下,客户可用带宽均可达 15Mbps,而在 MH_1-AP_1 和 MH_2-AP_4 的情况下,客户只能得到 700kbps 的可用带宽.当访问移动主机 MH_1 时,不管 MH_2 选择哪个接入点,可用带宽都维持在约 700kbps 左右.其原因在于,OpenFlow 交换机处理能力存在差异:如果通信路径上仅有采用 OpenVSwitch 的 SDNAP,则可用带宽可达 15Mb/s;如果通信路径上有 OpenFlow 软件交换机,则可用带宽仅为 700kbps.

小结:当移动主机接入 FC-WiFi 时,在不修改主机原来配置的情况下,可以访问服务器资源,也可以彼此共享信息;主机配置对可用带宽没有影响.

4.3 移动主机切换时延的影响

4.3.1 切换时延测量方法

测量切换时延的实验主要过程如下:服务器运行 iperf 并监听指定端口,移动主机运行 iperf 并与服务器连接,其间让移动主机从一个 AP 向另一个 AP 切换.每次移动主机切换 AP,均需要发送新的 ARP 查询分组.切换过程中的相关时刻描述如下:

- 1) 切换开始时刻,即切换前发送最后一个 TCP 分组的时间值.
- 2) 物理层完成切换时刻,该时刻已完成关联新 AP,发送 ARP 查询分组后等待响应.
- 3) 链路层响应时刻,该时刻收到 ARP 响应并发送 TCP SYN 分组.
- 4) 切换完成时刻,该时刻收到服务器返回的 TCP ACK 应答分组.

基于上述分组,可以分析移动主机切换 AP 的整体切换时延(total-delay),并进一步将其划分为物理层时延(physical handover)、链路层时延(ARP-response)和 IP 层路由时延(IP-routing).在移动主机运行 Wireshark 俘获所有交互报文,对 trace 文件进行分析后计算切换时延及其组成.

4.3.2 切换时延测量和分析

第 3 个实验考察切换时延对保持会话连接的影响.首先,Server 运行 iperf 指令监听 10086 端口;移动主机运行 iperf 指令连接服务器,同时运行 Wireshark 程序抓取通信分组. MH_1 选择 $AP_1-AP_2-AP_3-AP_4-AP_5$ 的路线移动, MH_2 选择 $AP_5-AP_4-AP_3-AP_2-AP_1$ 的路线反向移动.将 AP 切换划分为交换机之间(inter-switch)和交换机内部(intra-switch)两种类型,分别计算整体时延和时延组成.

表 1 描述了移动主机切换接入 AP 时的中断时延.由实验结果可知,整体切换时延均在 1 020ms 左右.对于交换机之间的 AP 切换,整体时延有略微增加,但是非常接近.由此可知,移动主机的网络配置和 AP 的连接位置对切换时延影响很小.在切换时延的基本组成中,物理层切换时延所占比例最高,该时延值基本稳定在 910ms,最多是 923ms.链路层的 ARP 时延占比最小,该时延值都在 54ms 以内.IP 层路由时延基本稳定在 70ms 附近.由整个实验结果可知,移动主机的网络配置和 OpenFlow 交换机的性能对切换时延影响很有限.因为整个切换过程只涉及很少的 TCP 分组,OpenFlow 的交换机处理能力足够处理这些分组.

Table 1 Statistics and analysis for handover delay (ms)

表 1 切换时延的统计和分析 (ms)

	Intra-Switch (min/avg./max)	Inter-Switch (min/avg./max)
Total-Delay	1010.1/1020.7/1070.9	1010.9/1030.4/1140.4
Physical-Handover	901.1/914.3/920.9	904.3/914.3/923.7
ARP-Response	31.1/44.5/50.9	33.1/45.7/54.3
IP-Routing	63.3/70.8/73.9	63.7/72.3/73.8

小结:FC-WiFi 为移动主机提供了移动通信支持;移动主机可以在切换 AP 时保持现有 TCP 连接不中断.移动主机的网络配置和 OpenFlow 交换机性能对切换时延影响很小.

5 结论和下一步研究工作

本文基于 OpenFlow 协议提出 WiFi 网络接入方案.该网络使用 OpenFlow 交换机和 WiFi 接入点组成的无线网络,移动主机周期性感知 AP 的信号强度和自身移动趋势,并主动切换网络接入点.整个方案针对现有 TCP/IP 终端的业务需求进行了专门处理.该网络架构支持客户端自主配置 IP 地址,并在全网范围内实现移动通信.目前已经完成了系统原型的代码开发,实现了主机通信过程中接入点的切换实验,测量了移动接入情况下系统的相关性能参数,并对切换时延的具体组成进行了分析和统计.

当前的问题是,网络覆盖范围为园区网,在单个控制器的管辖范围内实现移动.下一步将研究面向全网范围的免配置接入方案,通过多个控制器之间的协作实现高效率 and 免配置的移动接入.此外,当前主要解决网络接入和移动通信问题,没有针对关键业务预留专用带宽,下一步将在这个方面进行研究.

References:

- [1] Bennis M, Simsek M, Czylik A, Saad W, Valentin S, Debbah M. When cellular meets WiFi in wireless small cell networks. IEEE Communications Magazine, 2013,51(6):44–50.
- [2] Lantz B, Heller B, McKeown N. A network in a laptop: Rapid prototyping for software-defined networks. In: Proc. of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks. ACM, 2010.
- [3] McKeown N, Anderson T, Balakrishnan H, Parulkar G, Peterson L, Rexford J, Shenker S, Turner J. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008,38(2):69–74.
- [4] Ganapati S, Schoepf CF. The wireless city. Int'l Journal of Electronic Government Research, 2008,4(4):554–568.
- [5] Chen YT. Achieve user authentication and seamless connectivity on WiFi and Wimax interworked wireless city. In: Proc. of the IFIP Int'l Conf. on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN 2007). IEEE, 2007.
- [6] Pang J, Greenstein B, Kaminsky M, McCoy D, Seshan S. Wifi-Reports: Improving wireless network selection with collaboration. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2010,9(12):1713–1731.
- [7] Bansal M, Mehlman J, Katti S, Levis P. Openradio: A programmable wireless dataplane. In: Proc. of the 1st Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks. ACM, 2012. 109–114.
- [8] Gudipati A, Perry D, Li LE, Katti S. SoftRAN: Software defined radio access network. In: Proc. of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking. ACM, 2013. 25–30.
- [9] 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. ACM, 2012. 115–120.
- [10] Schulz-Zander J, Suresh L, Sarrar N, Feldmann A, Hühn T, Merz R. Programmatic orchestration of wifi networks. In: Proc. of the 2014 USENIX Annual Technical Conf. (USENIX ATC 2014). USENIX Association, 2014.



吴君青(1979—),男,浙江浦江人,博士生,讲师,主要研究领域为网络管理,软件定义网络.



胡超(1984—),男,博士,讲师,CCF 专业会员,主要研究领域为分布式计算,软件定义网络.



陈鸣(1956—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络体系结构,网络测量,网络管理,SDN.



张国敏(1979—),男,博士,讲师,主要研究领域为网络管理,分布式计算.