

基于 SDN 的 Wi-Fi 网络 TCP 流分析

牛文祥¹, 陈 鸣², 代 飞³, 吴君青², 张国敏²

(1. 解放军理工大学指挥信息系统学院研究生 2 队, 江苏 南京 210007;
2. 解放军理工大学指挥信息系统学院; 3. 解放军理工大学指挥信息系统学院研究生 1 队)

摘 要: Wi-Fi 网络朝着快速部署, 便捷管理的方向发展, 软件定义网络(SDN)的优势与 Wireless 的便利相结合为接入网络的发展带来了新的契机。文章以 TCP 视频流作为背景, 定量地分析研究了 OpenFlow 交换机环境与二层交换机环境下的 TCP 流的性能, 得到了在前者场景下比后者场景下的切换时延以及丢包数多等结论; 定义了控制器对 PacketIn 报文的处理流程, 测量了 AP(Access Point)切换时延对 TCP 流的影响。文章为设计实现基于 SDN 的 Wi-Fi 网络提供了重要的参考依据。

关键词: 软件定义网络; 无线保真网络; 网络测量; 性能分析

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16464/j.cnki.cn32-1289.2016.01.012

TCP Traffic Analysis of Mobile Video in SDN Based Wi-Fi Networks

NIU Wen-xiang¹, CHEN Ming², DAI Fei³, WU Jun-qin², ZHANG Guo-min²

(1. Postgraduate Team 2 CCIS, PLAUST, Nanjing 210007, China;
2. College of Command Information Systems, PLAUST; 3. Postgraduate Team 1 CCIS, PLAUST)

Abstract: Wi-Fi is developing in the direction of rapid deployment, and easy management. Wireless SDN advantages and convenience of combining the development of access networks brought new opportunities. By utilizing the TCP traffic, the transmission performance of TCP flow both OpenFlow switches and layer 2 switches was analyzed and explored quantitatively. The process of dealing with mobile video packets by SDN controller and the transmission performance of TCP traffic effected by AP handoff delay were analyzed and observed. The paper can provide important quantitative basis for designing and implementing SDN based Wi-Fi networks.

Key words: software defined network; Wi-Fi; network measurement; performance analysis

软件定义网络 SDN(Software Defined Network)是近年来兴起的一种新型网络架构, OpenFlow 是 SDN 中重要的南向接口标准。SDN 分离了网络的控制平面与数据平面, 以编程的方式对 OpenFlow 交换机流表进行细粒度的控制, 灵活地操作应用流的路径, 从而改变了 IP 僵化的现状, 为网络应用创新提供了新途径^[1]。无线 Wi-Fi 技术由于其标准成熟、速率高、成本低而成为因特网首选的无线接入网技术。然而, 这种 Wi-Fi 网络还存在如下一些问题: 首先, 由于目前 Wi-Fi 的众多 AP(Access Point)是通过二层交换机连接至 AP 控制服务器, 但 AP 控制服务器的可用功能较少且功能封闭, 只能由设备厂商定义。其次, AP 控制服务器既无法掌握和控制 Wi-Fi 网络部分和有线网络部分的流量分布, 网络资源的利用率低。

因此, 将 SDN 架构引入 Wi-Fi 网络中是一种发展趋势^[1]。为此, 将二层交换机更换为 OpenFlow 交换机, 将 AP 控制服务器更换为 SDN 控制器。用开放的 SDN 控制器替换厂商封闭的 AP 后台服务器, 使用户

收稿日期: 2015-11-30; 修回日期: 2015-12-23
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61379149)
作者简介: 牛文祥(1991-), 男, 硕士生。

能够定制自己的网络功能,进而使 Wi-Fi 网络更具创新活力。TCP 是网络中可靠传输的保障,对 Wi-Fi 网络传输性能又很敏感,为此,本文以网络测量为手段,定量分析研究移动视频应用对基于 SDN 的 Wi-Fi 网络中 TCP 传输性能。

尽管软件定义网络的发展已逐渐由概念阶段向产业应用阶段发展,Wi-Fi 结合 OpenFlow 网络的组网方式的研究成果并不多。OpenFlow 软件交换机的时延、吞吐量等网络性能测量^[2]为研究人员评估软件交换机的性能提供了参考。开放的研究实验平台 OpenRoads^[3]实现开发不同的移动解决方案、网络控制器和路由协议等。OpenRoads 提供给研究者两种网络控制方式,即使用 OpenFlow 协议的路径控制和使用 SNMP 对设备进行控制。将无线协议规则因子重分解的概念,以用于处理和控制平面的控制,其原型系统通过对 PHY 和 MAC 层的灵活管控,优化利用了当前流行的无线协议^[4]。为了将 SDN 的理念用于无线网络,Suresh 等人基于 LVAP^[5-7](Light Virtual Access Point)设计了软定义架构 Odin。该方案通过 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。上述研究论文集中在基于 OpenFlow 的 SDN 网络与 WLAN 的结合使用,即结合 SDN 网络灵活管控的优点与 Wi-Fi 网络便于接入,便于使用的特点,结合两种技术组合新型的无线边缘接入网。

1 基于 SDN 的 Wi-Fi 网络原型系统

Wi-Fi 技术遵循 802.11 协议族标准。当前构建无线局域网 WLAN(Wireless Local Area Network)的典型方式是,通过二层交换机互联多个 AP 使 Wi-Fi 网络拥有更大的接入范围,并用具有控制功能的服务器管理这些 AP,而每个 AP 提供以服务集标识符 SSID(Service Set Identifier)为标识的网络接入。图1显示了一个基于二层交换机 Wi-Fi 网络环境。

当某移动主机要访问固网上的一台视频服务器时,通常以动态主机配置协议获取它在 WLAN 使用的 IP 地址,并通过关联某个 AP 的 SSID 才能进行 Wi-Fi 通信。当主机在移动过程中,就会出现与当前关联的 AP 越来越远(如来自 AP₁ 的 Wi-Fi 信号越来越弱),而与另一个 AP 越来越近(如来自 AP₂ 的 Wi-Fi 信号越来越强)的情况,结果就会出现移动主机与前一个关联 AP 解除关联而与后一个 AP 关联的现象,这种现象称为 AP 切换。当移动主机发生 AP 切换时,将会出现丢包,使视频质量下降甚至视频流中断。

在图1所示环境中,视频服务器采用运行 Windows 7 操作系统的 Lenovo T4900v 台式机,由 VLC server 程序提供视频服务,AP 的型号为 HUAWEI AP3010DN-AGN,主动广播自身的 SSID,二层交换机为 HUAWEI S5700,移动主机采用运行 Window 7 操作系统的 Lenovo T440p 便携机,VLC client 软件接受视频服务,并安装 Wireshark 协议分析仪以俘获和定量分析分组信息。AP、服务器和移动主机都支持 802.11b/n/g 协议。分析移动视频的性能测度主要包括:传输时延、网络带宽和丢包率。

如果将图1中的二层交换机都为 OpenFlow 交换机所替换,并增加了 SDN 控制器,我们将得到如图2所示的基于 SDN 的 Wi-Fi 网络。

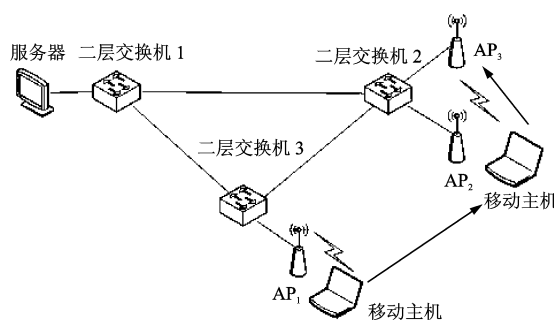


图1 二层交换机场景下移动视频测试环境

2 交换机对切换流程的影响

本节分别讨论在使用二层交换机场景下和在使用 OpenFlow 交换机场景下,对比分析 TCP 视频流在移动主机切换时的时序以及两种场景下的区别。

2.1 二层交换机场景的情形

在图1所示环境中,服务器运行 VLC 视频服务器 Server,移动主机 MH 运行 VLC 客户端,并在服务器

之间基于 HTTP 连接一个高清视频流,其间让移动主机在 AP_1 到 AP_2 (与不同的二层交换机相连) 以及 AP_2 到 AP_3 (与一台二层交换机不同端口相连) 之间进行切换。移动主机上运行协议分析仪 Wireshark, 俘获所有交互报文。然后通过分析所得 trace 文件中的分组, 得到通信各阶段的时延和丢包率。

通过分析, 得到如图 3 所示的通信时序图。当 MH 经 AP_1 关联与 Server 进行正常视频通信时, 在某时刻发起从 AP_1 向 AP_2 切换, 后继 HTTP 视频分组经交换机 SW 到达 Server, 历时为 t_1 。此后视频分组请求沿此路径再历时 t'_1 到达 Server, 视频分组返回 MH。其中移动主机从 AP_1 切换到 AP_2 的时间定义为:

$$t_{1-2} = t_1 - t'_1 \quad (1)$$

AP_2 到 AP_3 的切换时间定义为:

$$t_{2-3} = t_2 - t'_2 \quad (2)$$

试验结果取 10 次测量的平均值, 其分析如表 1 所示, AP_1-AP_2 表示移动主机从 AP_1 切换到 AP_2 。所丢的报文 VLC 视频服务器以恒定速率发送的是 TCP 的视频包, 不同的试验长度略有区别, 其字节长度在 1 216~1 514 之间。丢包长度在二层交换场景下与 OpenFlow 交换场景下 TCP 报文长度在同一范围内。分析表 1 结果表明: ① AP 切换时建立路径的时延 t_{1-2} 远大于分组沿路径传输时延 t_2 ; ② 移动主机在不同二层交换机之间切换时延要比它在同一个交换机的不同端口切换时延大 (约 182 ms); ③ AP 切换时都会产生少量丢包 (2 个~5 个)。

2.2 OpenFlow 交换场景下的情形

在图 2 所示环境下, 仍采用相同的测量方法, 然后也采用 Wireshark 分析所得 trace 文件, 得到通信各阶段的时延和丢包率。通过分析, 得到如图 4 所示的通信时序图, 图 4 中的流程与图 2 中的类似, 其中的符号也类似于式 (1) 和式 (2) 的定义。与图 3 不同的是, 由于控制器 CLT 中的控制逻辑, 工作流程中增加了控制器决策和向交换机下发流表的过程。

试验结果取 10 次测量的平均值, 其分析如表 2 所示。分析表 2 可以得到与分析表 1 得出的类似结论。如果比较表 1 和表 2, 我们得到如下结论: ① OpenFlow 交换场景下的切换时延比二层交换场景下的切换时延要大 939 ms, 丢包率也要大一倍以上; ② 在同一场景下, 切换时延都比分组传输时延要大 360 倍, 移动主机在不同交换机间切换比在同一交换机的不同端口间切换时延偏大; ③ OpenFlow 交换场景下的传输时延比二层交换场景下的传输时延稍大 (1 ms~2 ms)。

因此, 对于移动视频而言, 在 SDN 环境下比在二层交换机环境下有更大的 AP 切换时延和更多的丢包。

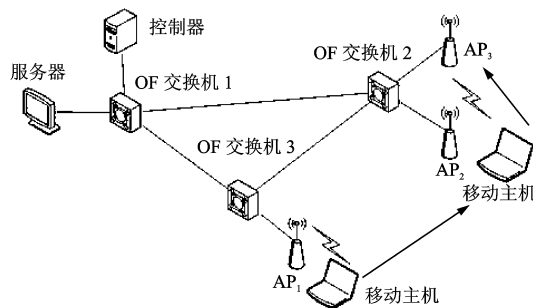


图 2 OpenFlow 交换场景下移动视频系统的试验环境

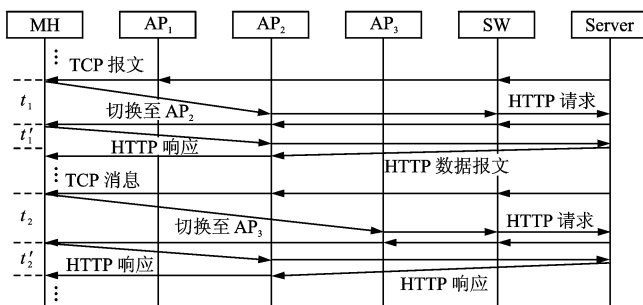


图 3 二层交换机的通信时序图

表 1 二层交换场景下的试验结果

实验条件	t_1 /ms	t_2 /ms	t_{1-2} /ms	丢包/个
AP_1-AP_2	1 096	3	1 093	2
AP_2-AP_3	914	3	911	2

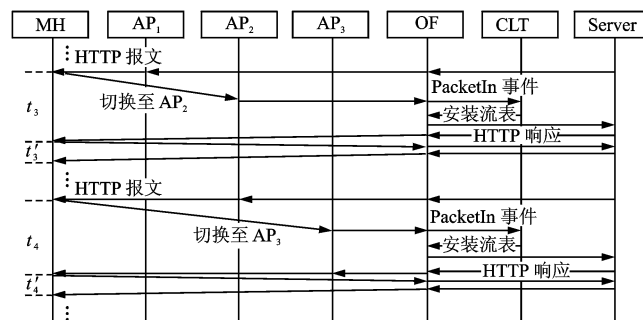


图 4 OpenFlow 交换机的通信时序图

表 2 OpenFlow 交换场景下的试验结果

实验条件	t_1 /ms	t_2 /ms	t_{1-2} /ms	丢包/个
AP_1-AP_2	1 636	4	1 632	6
AP_2-AP_3	1 597	5	1 592	4

3 控制器对 PacketIn 报文的处理

控制器根据 OpenFlow 交换机交付的 PacketIn 报文建立 TCP 流路径。流表的匹配选项以及 PacketIn 事件的处理方式直接影响流在交换机中的转发方式。本文试验使用普通的二层交换机和 POX 控制器构建的基于 MAC 地址的转发路由策略的 SDN 网络做对比,同时,与 POX 自带的转发模块相比,本节描述的转发方式适用于无线切换环境下的数据包转发。因此有必要描述试验中控制器对 PacketIn 报文的处理。

在使用二层交换机的环境中,交换机通过洪泛和自学习方式可以自主处理新到达的报文,处理速度很快。而在使用 OpenFlow 交换机的环境中,OpenFlow 交换机将新到达的流的首个报文转发到控制器请求建立路径通过向控制器转发的方式来处理新报文。如果 OpenFlow 控制器允许该流通过网络,就计算出路径并向相关交换机下发流表,此后该流后继报文延路控制器建立的路径转发,因此控制器参与的方式对于处理移动视频建立路径的首个报文有延迟作用。而路径建立之后,控制器便不再干预流的转发。

控制器的 OpenFlow 交换机的转发匹配策略由图 5 所示的 PacketIn 事件处理报文实施。当移动视频流的首个报文到达 OpenFlow 交换机后,交换机查找自身的流表进行流匹配。若报文与流表项不匹配时,交换机发起 PacketIn 事件,将不匹配报文通过安全通道交付给 POX 控制器。若二层漫游时 OpenFlow 交换机使用交换机端口号,源和目的 MAC 地址定义流,则移动主机的位置使用移动主机 MAC 地址,交换机标识符,交换机端口号来标识。POX 控制器可以用移动主机的 MAC 地址与(dpid, Inport)的映射关系来标识它的位置。控制器 POX 对 PacketIn 事件的处理流程如图 5 所示。当控制器监听到 PacketIn 事件时,首先调用函数 event_parse 从 PacketIn 事件中提取产生事件的报文所对应的交换机标识符 dpid,交换机端口 Inport 以及源和目的 MAC 等字段。接下来,调用主机位置更新模块 location_update 来更新主机位置映射表,并判断该流的目的主机 MAC 地址是否在主机位置映射表中。如果在,则调用路径计算模块 get_path 计算并生成该流的转发路径;否则,调用 flood 函数来广播此报文。最后,调用流表安装模块 install_path 将流表下发到转发路径上的 OpenFlow 交换机中,此时 PacketIn 事件处理结束。

值得注意的是,主机位置更新模块 location_update 是由 POX 原有的函数 l2_multi 的代码流程改写得来的。如图 6 所示,在更新主机位置的过程中,首先根据报文源 MAC 地址判断主机位置是否存于主机位置映射关系表中,若不存在,则直接在表中添加新的主机位置映射关系;若存在,则比较主机当前位置与主机位置映射表中的位置是否一致。若两者不一致,则判定发出报文的具有源 MAC 地址的主机发生了 AP 切换,此时需要调用模块 flow_delete (MAC)模块从交换机中删除该主机有关的流表,然后更新主机位置映射表中的主机位置。

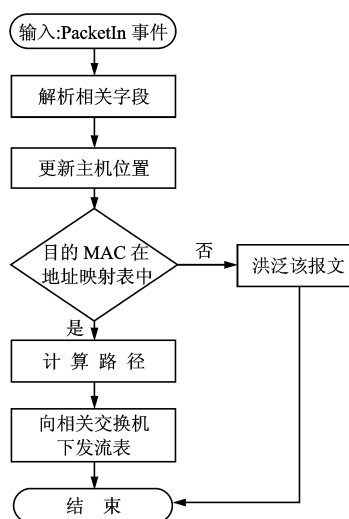


图 5 控制器 PacketIn 事件处理流程

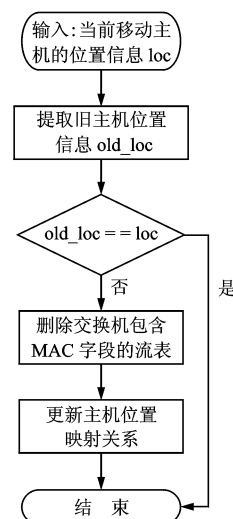


图 6 主机位置更新模块的工作流程

4 试验结论

使用 iperf 分别测量了两种组网方式的实际网络环境的网络带宽,测量结果如图 7 所示,图 7(a)为图 1 网络场景下的带宽测量结果,图 7(b)为图 2 网络场景下的带宽测量结果。对比测试结果,可以发现,拥有灵活管控优势的 OpenFlow 组网方式的 TCP 吞吐量低于普通二层交换机 TCP 吞吐量,且测量值比普通交换机不稳定。

对比表 1 和表 2 中的测试数据,我们发现 AP 切换时延越大,其丢包率就越大,移动视频的质量就越差。

并且我们知道,当丢包率大到某个阈值时,就可能导致 TCP 连接断开,从而会使移动视频中断。为此,我们在基于 SDN 的 Wi-Fi 环境下设计了一个试验,定量比较切换时延对丢包率和视频质量可能的影响。试验中,移动主机在进行前述切换后,再人为地增加时延 T_{so} 来模拟切换时延变长。切换时延变长的因素可能包括切换算法的复杂性增加、网络规模变大和不同实现设备等。

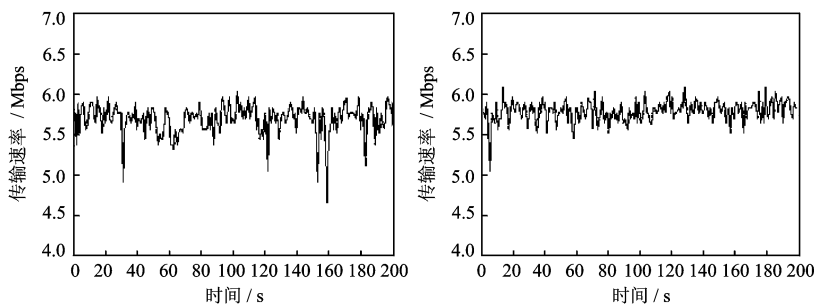
图8是重复测量30次所得丢包数量平均值的曲线。随着切换时延的增大,丢包数量也呈现出增大的趋势。OpenFlow 网络场景下的测量结果如图8(a)所示,考察 AP_1 切换到 AP_2 的情况,当 AP 切换时延为 0.4 s 时,丢包数为 1.8;当 AP 切换时延为 2.4 s 时,丢包数为 2.0;当 AP 切换时延为 4.0 s 时,丢包数则为 3.4,视频质量严重变差,而 AP 切换时延为 4.5 s 时,导致视频中断。这表明为保证基

于 OpenFlow 的 Wi-Fi 网络传输不中断, AP 切换时延存在一个阈值,如在本试验的场景下 AP 切换时延阈值约为 4.1 s。普通交换机的场景下的测量结果如图8(b)所示,移动主机切换前后的 AP 连接在两台不同的交换机,与切换前后的 AP 连接同一交换机在丢包数量上并没有明显区别。当时延大于 4.1 s 后,所测量的 TCP 断链率急剧增大;4.5 s 后,仍能保持通信的 TCP 链极少。测量分析还表明,在相同 AP 切换时延情况下,移动主机由 AP_1 切换到 AP_2 的丢包数比 AP_2 切换到 AP_3 的丢包数要多一些。

本文基于 SDN 的 Wi-Fi 网络中 TCP 流传输性能为设计实现基于 SDN 的 Wi-Fi 网络提供了定量依据。本文通过搭建基于二层交换机和对基于 OpenFlow 交换机的两种 Wi-Fi 网络场景,实际测量和分析了相关传输性能参数,得到了有关交换机、控制器处理和 AP 切换时延的一些重要结论。下一步将深入研究基于 SDN 的 Wi-Fi 网络中的管理和 AP 切换算法等问题,以提高 Wi-Fi 网络的工作效率。

参考文献:

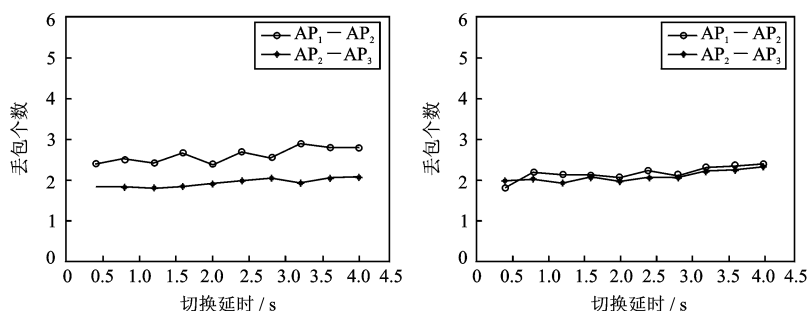
- [1] 左青云,陈 鸣,赵广松,等.基于 OpenFlow 的 SDN 技术研究[J].软件学报,2013,24(5):1078-1097.
- [2] 蒋培成,陈 鸣,李 兵. OpenFlow 软交换机的性能测量[J].重庆邮电大学学报,2013,25(1):24-29.
- [3] YAP K K, KOBAYASHI M, Sherwood R, et al. OpenRoads: empowering research in mobile networks[EB/OL]. (2009-08-17)[2015-11-10]. <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2009/posters/sigcomm-pd-2009-final28.pdf>.
- [4] BANSAL M, MEHLMAN J, KATTI S, et al. OpenRadio: a programmable wireless dataplane[EB/OL]. (2012-11-04)[2015-11-20]. <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2012/paper/hotsdn/p109.pdf>.
- [5] SURESH L, SCHULZ-ZANDER J, MERZ R, et al. Towards programmable enterprise WLANs with odin[C]// Proceedings of the First Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks. Helsinki, Finland: ACM Press, 2012: 115-120.
- [6] SCHULZ-ZANDER J, SURESH L, SARRAR N, et al. Programmatic orchestration of Wi-Fi networks[C]// Proceedings of the USENIX Conference on USENIX Annual Technical Conference. Pennsylvania, USA: USENIX Association, 2014: 347-358.
- [7] SCHULZ-ZANDER J, SARRAR N, SCHMID S. Towards a scalable and near-sighted control plane architecture for Wi-Fi SDNs[C]// Proceedings of the 3rd Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking. Chicago, USA: ACM Press, 2014: 217-218.



(a) 图1 网络场景下的带宽测量

(b) 图2 网络场景下的带宽测量

图7 两种组网方式下的带宽测量



(a) 图1 网络场景下测量结果

(b) 图2 网络场景下测量结果

图8 切换时延对丢包数的关系