

表1 硬件实验平台参数

设备	型号与配置
AP	Netgear R6100 openwrt15.05
	TP-Link WR1043ND v2 openwrt15.05
服务器	CPU: Intel Xeon E5 RAM: 64 G
	Ubuntu14.04
	CPU: Intel Core I7-8700 RAM: 16 G
终端设备	Ubuntu14.04
	iPhone A1586 ThinkPad E550

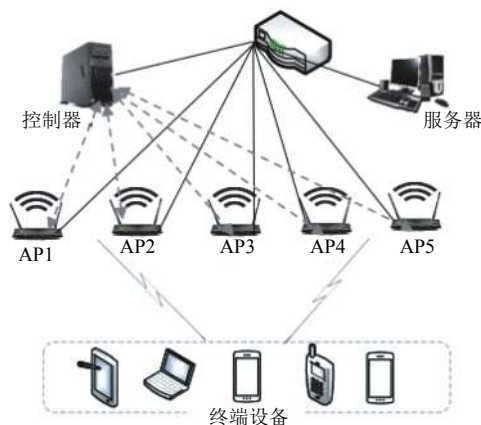


图4 实验网络拓扑

通过设置不同的试验条件,对文中搭建的可编程无线局域网的性能进行评估,下文章节给出了实验结果,并对结果进行了分析。

4.2 结果分析

1) AP 限流对终端设备带宽的影响

为了验证上文提出的集中接入策略的可行性,在实验中采用笔记本接入测试,不同于传统的仅接入一个 AP;按照上述支持 MPTCP 的集中接入策略,实验中选取 3 个 POF-AP 与笔记本相关联。同时,利用 shell 脚本,采用 tc 和 iptables 命令实现 AP 的限流,从而模拟现实网络中 AP 带宽资源的不稳定性。

实验中通过编程方式实现在第 31.5 s-46.5 s 间将接入的 AP1 的带宽限制在 1 Kbps,图 5 是在对 AP1 进行限流时,笔记本测试的带宽结果。分析实验结果可知,按照传统方式接入 AP 时,因为只接入 AP1,所有的数据流只能由 AP1 传输,所以在将 AP1 的带宽限制在 1 Kbps 的时间段内,终端总带宽极速下降到接近于零的状态;然而,按照上文提出的支持 MPTCP 的集中接入策略,由于同时择优接入了 3 个 AP(即 AP1、AP2、AP3),将 AP1 的带宽限制在 1 Kbps 时,AP1 的

负载比变大,其负载的子流将会被切换到另外两个 AP 上,而总的带宽会基本保持稳定。同时,与传统的接入策略相比,上文提出的接入策略在一定程度上提升了整体网络的吞吐量,提高了网络资源的利用率,避免在拥塞的路径上继续传输数据,从而均衡底层 AP 负载。

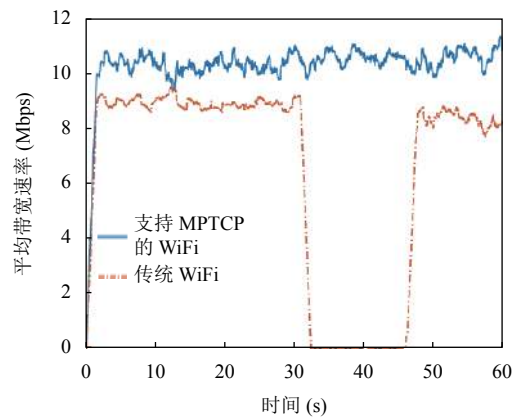


图5 AP 限流后终端带宽速率对比

2) AP 限流对其他 AP 带宽的影响

上小节是从终端用户的角度分析集中接入策略的可行性,接下来从 AP 的角度进行分析。为了体现一般性,实验中部署两个 POF-AP(AP1 和 AP2) 和十个终端设备,每个终端具有两个子流分别与上述两个 AP 相关联,即 20 个子流均匀分布在两个 AP 上。

如图 6 所示,在非限流情况下,两个 AP 的带宽速率相当,保持在 19 Mbps 左右,总体上振幅差不多;当把 AP1 的带宽速率限制在 15 Mbps 时,由实验结果可知,AP1 的振幅变小,而 AP2 的带宽速率上升到 23 Mbps 左右,振幅变大。经过分析可知,在 AP1 限流时,AP1 负载比变大,其上的子流大部分被切换到 AP2,达到 AP 间的负载均衡,保证整体网络的吞吐量。

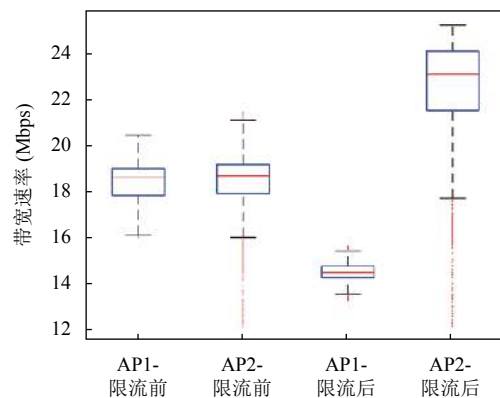


图6 AP 限流后各 AP 间的带宽速率对比

3) 控制平面性能测试

采用笔记本接入 AP1 测试, 编写 shell 脚本, 比较 OpenWrt 自带 WiFi 和支持 MPTCP 的 WiFi 情况下的接入时间. 共测得 40 组数据, 将每 10 组求平均, 得到 4 组数据如表 2 所示. 在终端接入时, 由于 AP 与控制器之间存在数据流交互, 而且集中控制器还要进行 AP 接入选择决策, 这些都会间接造成终端接入延迟. 相比较 OpenWrt 自带的 WiFi, 本研究原来提出的支持 MPTCP 的 WiFi 接入耗时是前者的 2 倍左右, 但是经过优化, 接入耗时降到前者的 1.5 倍左右, 其中, 算法运行耗时平均在 800~900 ms 之间, 在可接受范围之内.

表 2 终端接入测试 (ms)

OpenWrt 自带 WiFi	支持 MPTCP 的 WiFi	优化后的 WiFi
2654	5908	4026
2642	4028	3963
2651	4181	3896
2649	5564	3947

由于本研究引入软件定义的思路对物理 AP 虚拟化, 采用集中式管理方式实现终端设备的接入, 所以仅考虑接入时的延迟确实比传统的接入方式耗时一些. 但是, 相比较该架构带来的优势, 这些延时代价完全在可接受范围; 因为该架构不仅可以很好的做到 AP 设备之间的负载平衡, 避免网络拥塞; 同时, 该架构未来还可以拓展到用户移动的环境下, 如果在终端用户移动的情况下, 终端用户可能从 AP1 覆盖的范围移动到 AP2 的覆盖范围, 这时, 如果是传统的 WiFi 环境, 终端就需要先与 AP1 断开关联, 再接入 AP2, 不仅要重新接入而且终端的服务也会被迫断开; 但是如果利用该架构就可以实现无缝切换, 不需要重新接入, 因为该架构中终端是与 VAP 绑定的, 无论终端如何移动, 与之关联的 VAP 并不变, 底层只需要 VAP 在物理 AP 之间迁移, 而 VAP 是以流表的形式存在, 相比较传统的接入方式, 流表的迁移更便捷、更容易实现, 从而实现终端用户无感知的 AP 切换, 这也是未来会进一步研究的方向.

接下来进行多终端接入的仿真测试, 由 AP 不间断上报不同的 probe_request 报文来模拟设备的接入请求, 测试不同负载情况下控制面的 CPU 占用率, 固定

接入 AP 的总是为 5, 调整每个 AP 上报的 probe_request 数目, 即模拟的主机个数. 由图 7 分析可知, 随着终端数的增加, 控制平面 CPU 占用率呈现上升趋势,

在终端数目一定的情况下, 随着子流数的增加, 控制平面 CPU 占用率呈现小幅度提升趋势, 即随着终端数或子流的增加, CPU 的占用率呈现明显上升趋势.

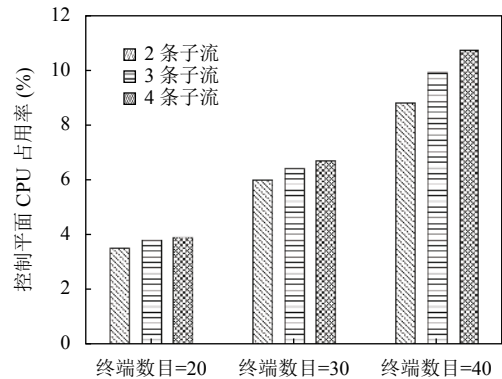


图 7 控制平面 CPU 占用率

综上分析各实验结果可知, 本文提出的支持 MPTCP 的集中接入策略在一定程度上能提升网络的吞吐量, 提高网络资源的利用率; 同时, 能充分利用各 AP 的带宽资源, 避免在拥塞的路径上继续传输数据, 从而达到平衡拥塞和均衡 AP 间负载的目的, 保证终端用户的服务质量. 然而, 除了上述优势之外, 该集中接入策略也存在一些不足, 该策略会造成接入耗时的延长, 随着终端数和子流的增加, 控制平面 CPU 的占用率也会有一定程度的提高.

5 结论与展望

本文引入 POF 技术, 提出一种深度可编程 WLAN 架构, 该架构实现终端设备的集中接入管理. 同时, 提出一种基于 MPTCP 的无线 AP 接入管理机制, 相对于传统的仅仅按照信号强度 RSSI 来选择 APs 接入, 该机制从信道相对空闲的 APs 中选取接入点, 对整个网络资源的利用率进行调优, 解决了因 AP 负载过重造成的连接中断、效率低下等问题, 保证了终端用户的服务质量.

然而, 实验环境也仅仅是在实验室很小的局域网内进行, 同时也未考虑终端用户的移动性. 所以, 未来的工作就是将文中提到的 AP 接入管理机制应用到更大范围的网络, 同时考虑终端用户移动的情况.

参考文献

- 1 Namal S, Ahmad I, Gurtov A, et al. SDN based inter-technology load balancing leveraged by flow admission

- control. Proceedings of 2013 IEEE SDN for Future Networks and Services. Trento, Italy. 2013. 1–5.
- 2 Papanikos I, Logothetis M. A study on dynamic load balance for IEEE 802.11 b wireless LAN. Dennis: IEEE, 2001.
 - 3 刘志宏. 802.11 无线局域网接入式负载均衡技术研究[硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
 - 4 李云, 周亚峰, 曹侯. 基于软件定义网络的 WLAN 架构及负载均衡切换. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2016, 28(5): 613–619. [doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.2016.05.002](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.2016.05.002)]
 - 5 Kreutz D, Ramos FMV, Verissimo PE, *et al.* Software-defined networking: A comprehensive survey. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 14–76. [doi: [10.1109/JPROC.2014.2371999](https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2371999)]
 - 6 Zhang CK, Cui Y, Tang HY, *et al.* State-of-the-art survey on software-defined networking (SDN). Journal of Software, 2015, 26(1): 62–81.
 - 7 Wang XD, Tian Y, Zhao M, *et al.* PNPL: Simplifying programming for protocol-oblivious SDN networks. Computer Networks, 2018, 147: 64–80. [doi: [10.1016/j.comnet.2018.09.018](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.09.018)]
 - 8 谈小冬, 邹山, 郭浩然, 等. 面向协议无感知转发技术的 SDN 试验床. 计算机系统应用, 2016, 25(4): 237–241.
 - 9 Zhao M, Li MZ, Mei L, *et al.* FlowWatcher: Adaptive flow counting for source routing over protocol independent SDN networks. Proceedings of the 8th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication. Beijing, China. 2018. 237–242.
 - 10 Song HY. Protocol-oblivious forwarding: Unleash the power of SDN through a future-proof forwarding plane. Proceedings of the Second ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking. Hong Kong, China. 2013. 127–132.
 - 11 Song HY, Gong J, Chen HF, *et al.* Unified POF programming for diversified SDN data plane devices. Proceedings of the 11th International Conference on Networking and Services. Rome, Italy. 2015. 92–97.
 - 12 Tan XD, Zou S, Guo HR, *et al.* POFOX: Towards controlling the protocol oblivious forwarding network. In: Park JJJH, Yi GM, Jeong YS, *et al.*, eds. Advances in Parallel and Distributed Computing and Ubiquitous Services. Singapore. 2016. 21–30.
 - 13 Bansal M, Mehlman J, Katti S, *et al.* Openradio: A programmable wireless dataplane. Proceedings of the 1st Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks. Helsinki, Finland. 2012. 109–114.
 - 14 Schulz-Zander J, Suresh L, Sarrar N, *et al.* Programmatic orchestration of wifi networks. Proceedings of 2014 USENIX conference on USENIX Annual Technical Conference. Philadelphia, PA, USA. 2014. 347–358.
 - 15 Sequeira L, de la Cruz JL, Ruiz-Mas J, *et al.* Building an SDN enterprise WLAN based on virtual APs. IEEE Communications Letters, 2017, 21(2): 374–377. [doi: [10.1109/LCOMM.2016.2623602](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2623602)]
 - 16 Sen A, Sivalingam KM. An SDN framework for seamless mobility in enterprise WLANs. Proceedings of the IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Hong Kong, China. 2015. 1985–1990.
 - 17 Ford A, Raiciu C, Handley M, *et al.* TCP extensions for multipath operation with multiple addresses. RFC 6824, IETF, 2013. [doi: [10.17487/RFC6824](https://doi.org/10.17487/RFC6824)]
 - 18 Croitoru A, Niculescu D, Raiciu C. Towards wifi mobility without fast handover. Proceedings of the 12th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation. Oakland, CA, USA. 2015. 219–234.
 - 19 Liu L, Li MZ, Mei L, *et al.* Design and Implementation of a novel SDN-based architecture for Wi-Fi networks. Proceedings of the 19th International Conference on Parallel and Distributed Computing: Applications and Technologies. Jeju Island, South Korea. 2018. 41–49.
 - 20 Dutt S, Habibi D, Ahmad I. A low cost Atheros system-on-chip and OpenWrt based testbed for 802.11 WLAN research. Proceedings of the TENCON 2012 IEEE Region 10 Conference. Cebu, Philippines. 2012. 1–4.