

未来无线网络技术研究现状和面临的主要挑战

中国科学技术大学软件学院 孟宁

近一两年来全球移动互联网发展迅猛，其流量已经占到互联网流量的 13%，典型互联网业务移动化趋势尤为突出，Facebook 近 30% 的流量来自移动设备，Twitter 移动流量占比超过 50%，移动互联网的发展速度超出想象。网络整体流量在以每年 100%-200% 的增速增长 [1]。用户需求仍在释放，近五年内仍将延续当前的发展速度。从整个产业来看，移动互联网发展的大幕才刚刚拉开 [1]。

与此同时当前移动互联网产业发展已对移动通信网络造成巨大冲击，也对无线网络 WLAN 的支撑能力提出了新的挑战。

一、当前移动互联网产业的发展对移动通信网络造成的巨大冲击

移动数据流量增势迅猛导致频谱资源稀缺性加剧，因而流量优化控制存在巨大提升空间。移动互联网应用与网络资源的紧密程度远超桌面互联网应用，终端侧流量优化控制存在巨大的提升空间。3G 网络并非为今天的移动互联网应用所设计，无线网络与应用之间难以有效匹配，如永远在线类应用会产生超过 10 倍于普通业务的信令量，加剧了信令拥塞，需要通过多层面调整应对信令负荷和数据流量冲击。移动网络、操作系统平台、应用开发三个层面都可以引入系列技术优化方案 [1]。

在移动网络层面比较成熟的有网络控制的快速休眠技术 (NCFD R8) 和连续分组连接技术 (CPC)，有助于节电、减少网络信令流量、缩短状态转换时延、增加网络控制力、提高容量和吞吐量。

在操作系统平台层面，涉及的技术点较多，比如通过设置 PUSH 中心进行统一信息推送减少心跳信息、采用休眠机制避免应用后台消耗流量、设定大流量数据上传下载提示、通过自动识别与平滑切换实现对多种数据连接方式的支持、支持断点数据下载等。

在应用开发层面，改进空间广阔，比如通过代理服务器技术，减少网络数据负载；通过内容压缩技术，对视频文件进行压缩以实现传输数据量的最小化；通过分步下载技术，避免缓冲过多造成的流量浪费；通过自适应终端类型，自动识别屏幕尺寸与分辨率以平衡视听感受和流量控制之间的矛盾等。

尽管面对当前移动互联网对移动通信网络造成的巨大冲击有以上众多缓解措施，但由于受到频谱资源和信道容量的限制移动通信网络无法跟上移动互联网的迅猛发展。同时在移动通信和互联网融合的大背景下，两个重要的边界正逐步模糊。一是互联网业务与基础电信业务之间的边界逐步消失。米聊、微信、iMessage、盛大有你、飞豆等移动即时消息应用已经在替代电信运营商的彩短信业务，而谷歌、苹果、微软在其操作系统上整合 VOIP，未来对电信运营商业务的影响将更为显著 [1]。这是否会降低电信运营商对移动通信网络基础设施建设的投资冲动还有待观察。即便移动通信网络基础设施建设投资没有受到影响，但是高昂的基础设施建设成本和不断增长的数据带宽市场需求将决定了在未来一段时间内移动通信数据带宽的价格很难会大幅下降，至少无法 WLAN 的带宽成本相比。

因此，仅仅依靠移动通信网络的发展将无法满足不同持续增长的数据需求，而为移动互联设计的 WLAN 将会在移动互联网时代依旧扮演极其重要的角色，但 WLAN 网络也面临着移动互联网设备的高移动性挑战，同时移动互联网设备随着人群的快速聚集和分散也会给 WLAN 网络带来前所未有的容量挑战及智能适应性挑战。

二、当前移动互联网产业发展对无线网络 WLAN 的支撑能力提出了新的挑战

今天无线局域网 WLANs 无处不在，在几乎所有日常生活场合 WLANs 是将笔记本、平板电脑、智能手机、数码相机、电视和机顶盒等接入互联网 Internet 的简单廉价方式。在家庭、学校、办公室、酒店都能找到 WLAN，甚至最近在飞机、汽车或火车上也有 WLAN。它们能用来浏览网页、观看视频、打电话等。用途广泛、便宜的硬件和免费的无线频谱使用权导致了一直不断增长的带宽需求。学术界和工业界已经接管满足这种需求的任务，并在过去 15 年使 WLAN 的速度取得的惊人的增长。从 1997 年第一个 IEEE 802.11 标准发布到预计 2014 年发布的 IEEE 802.11ad，网络传输速度差不多增长了 4 个数量级。这意味着 IEEE 802.11 标准的最大传输速率平均每四年差不多增长一个数量级。它甚至比 CPU 速度的增长更快，CPU 速度的增长遵守著名的摩尔定律，即每 18 个月速度翻倍。因此 CPU 速度大约需要 5 年才能增长一个数量级。

然而 WLAN 速度增长的代价常常是通信距离更短。另一个著名的定律——香农定律，香农定律告诉我们了一个简单的方法来计算一个无线链路的基本容量限制，即容量取决于两个因素：信号质量和传输信道带宽。WLAN 的速度增长很大程度上来自更加精良的无线收发器和天线，因而可以利用更高的载波频率、更宽的通道带宽和更快的调制方式，这三个因素导致更小的传输范围。与低频相比高载波频率常常恶化无线电信号的传输特性；宽信道使传输更大的距离变得困难；更快的调制方式使得信号更易被噪音干扰，因此只适用于高信噪比的短距离链路。

可以看到一个清晰的趋势：用户要求高速度但仅在短距离链路上是可能的。因此覆盖大范围的快速 WLAN 需要密集部署接入点 APs，而密集部署会带来新的问题。一是怎样用经济有效的方法达成密集部署；覆盖一定区域的最少 AP 数量随着 AP 的通信距离的平方成反比，这意味着通信距离减半则至少需要 4 倍的 AP。为了保持低成本，AP 的硬件、软件和网络管理都需要简化。

当 APs 的覆盖范围缩小时切换的需求将会大量增加。对于密集部署的未来 WLAN 面临的挑战是目前的 WLAN 网络架构和算法在切换管理方面是不合适的。因此未来 WLAN 管理和运营将面临在高容量密集部署 AP 的环境下实现无缝切换，以满足高移动性条件下移动互联网应用的流畅运行。

三、软件定义网络 SDN 的思想为未来 WLAN 网络架构提供了新的思路

要充分利用未来 WLAN 网络的潜力需要一个密集部署 AP 的网络。传统上来说，WLAN AP 是一种低处理能力和低智能的设备。然而，这种设计观点已经在被逐渐抛弃了，AP 现在正变得越来越强大，配置了越来越多的功能。

提升 AP 的能力有多种原因：

首先，WLAN 物理层协议的速率在过去几年里不断增长，在新的 IEEE 802.11ac 标准中达到了每秒数个 Gbit。显然更高速的物理层需要更强大的 CPU 以便支持快速的帧处理，而帧处理很大一部分是由软件来实现的。

第二，新功能比如 QoS 和移动管理在 AP 上需要软件支持，一个更大的软件堆栈需要更强的 CPU 和内存来执行程序。比如，在流行的开源 AP 固件 OpenWRT 上当前发行的软件包的数量在过去 5 年增长了 800%。广泛应用的 Cisco 500 AP 的开放系统映像大小从 2007 到 2011 年增长了超过 150%。

典型情况下，一个密集的网络部署会导致高的建设成本和运营成本。为了减少建设成本

和运营成本，网络虚拟化和架构共享是必需的。网络虚拟化的主要原理是数个虚拟化网络在同一个物理网络上提供不同的网络操作来实现。这允许更有效地利用网络硬件资源，但是需要在不同虚拟网络间进行隔离。

为了实现前述提及的技术，工业界和标准委员会已经引入了新的管理协议，这种协议部分的卸除功能以便精简控制服务器。比如 CAPWAP [3] 允许部分去除认证服务到外部服务器中。然而，这些协议的功能被限制了，扩展是很难实现的。此外，虚拟网络的隔离是很难通过这些协议来获得的。因此迫切需要一个新的 WLAN 管理架构：

- 1) 能够使得网络应用程序以一个独立于卖方的方式来部署；
- 2) 允许卸除一些时延要求不高的应用到外部服务器中；
- 3) 能够以可量度的高速率来处理物理层链路数据；
- 4) 支持虚拟化网络。

SDN 原则上能够满足这些需求。

尝试建立一个基于 SDN 的 WLAN 管理架构学术界已有提议，如 [4] 和 [5] 提出使用 OpenFlow 来控制数据流，通过一个图形用户界面让终端用户控制数据流。[5] 明确的提出了网络虚拟化，它建议基于 IP 层和应用程序特性将网络分片，例如一个视频流服务能够建立它自己特定的 QoS 设置的网络片。[5] 不允许控制 MAC 层。Cell-SDN [6] 是最近提出用于 SDN 在蜂窝网络中管理控制路径的，关键的理论是从无线电硬件中分离出控制面并在远程数据中心使用控制器，比如执行无线电资源管理或移动管理。

在 Odin [7] 文章中，物理层 AP 运行着提供认证服务和产生灯塔帧的软件。Odin 允许使用自定义协议来通过迁移这样一种代理的状态来初始化 AP 之间的交付。OpenFlow 利用更新网络交换机中的转发表来实现。类似于 CAPWAP，在 Odin 中关联状态是保持在一个中心服务器和 AP 自己上的。在 Odin 中，MAC 帧在 AP 中被处理，OpenFlow 不能控制 MAC 层。

在 [8] 和 [9] 中，虚拟 AP 通过使用 AP 上 OS 的管理程序来创建。这样完全的 AP 虚拟化提升了灵活性，但是需要一个强大的 x86 架构的 AP，这对于通常的 WLAN 部署是很难做到的。而且 [8] 和 [9] 没有提供一个中心控制平台，而这个在上面讨论的 OpenFlow 却提供了。

CAPWAP [10] 和它的前任 LWAPP [11] 是 IETF 标准用来拆分 WLAN 中 MAC 的处理过程。CAPWAP 使用一个中心化控制器来发现 AP，配置它们同时给站点 (STA) 提供认证服务。CAPWAP 实现了一个划分的 MAC 层，这里一些 MAC 帧由 AP 控制器产生，其他的由 AP 产生。然而 CAPWAP 没有标准化的平台和 API 来部署新的网络应用程序。而且，CAPWAP 需要的还是 AP 中较为复杂的 MAC 处理过程。

由于所有相关工作都致力于一个或多个上面描述的需求，而不是满足所有 4 个需求。在 [12] 中引入了 CloudMAC，一个新的用于 WLAN 的管理架构。CloudMAC 的关键思想是在一个 WLAN AP 上进行划分，物理 AP 只负责转发 MAC 帧，而虚拟 AP 可能放在一个数据中心或云端的虚拟机上（这也是为什么叫 CloudMAC），而此虚拟 AP 包含了所有功能比如 MAC 帧产生和认证服务。虚拟和物理 AP 通过一个使得网络可用的 OpenFlow 来通信。OpenFlow 转发器能够操纵控制块头部信息（包含编码机制或传输功率以及其他信息），按照在转发器中的控制流表（类似于转发表）关联了从虚拟 AP 到物理 AP 的帧发送过程，这个控制块头部信息允许定义无线传输中的编码机制或传输功率。Flow Table 由使用 OpenFlow 协议的外部应用程序进行编写。因此，CloudMAC 允许从物理 AP 中卸除处理过程，改由强大的数据中心中的虚拟 AP 来处理，这样来调配硬件转发器中的快速报文处理，以及在开放和独立于硬件制造商的方式下部署新的应用程序。而且，使用 CloudMAC 的网络管理者能够发起无缝的站点移交，不需要站点的主动协作。关联状态的集中化存储允许 CloudMAC 仅仅通过重新配置 OpenFlow 规则便可以触发移交。这显示了相对于在标准 WLAN 中通常打断和重新连接的移交过程更具有无缝操作性。

由[12]描述的 CloudMAC 的主要思想,我们可以大致勾勒一种可能的未来 WLAN 网络架构。WLAN 网络由虚拟 AP 和物理 AP 构成,每个物理 AP 只作为虚拟 AP 的一个无线数据收发器,虚拟 AP 具有完整的标准 AP 功能,终端 (STA) 进入一个虚拟 AP 的网络后,只会看到虚拟 AP 的 SSID,并且虚拟 AP 所关联的所有物理 AP 的信号覆盖范围内,终端 (STA) 都认为是一个 AP,虚拟 AP 的覆盖范围内从一个物理 AP 移动到其他物理 AP 的过程中无缝移交,对于终端 (STA) 来讲没有数据链路的切换,最多只有物理信道的协商,上层应用完全感觉不到物理 AP 的变化。

四、基于虚拟化网络的未来无线网络架构中有待研究的问题

除了无缝移交,基于虚拟 AP 的未来 WLAN 网络架构能够扩展新的应用程序实现智能的 WLAN 网络管理和维护,比如:动态频谱使用、自动节能、自动优化整体网络性能等。

根据终端 (STA) 的动态聚集与分散动态调整物理 AP 的信号发射功率和无线信道,甚至开关部分物理 AP,智能地实现自动适应网络流量的变化、优化整体网络性能和达成节能的目标。

虚拟 AP 是否可以成为像亚马逊 EC2 一样的公有云服务基础设施还有待研究,更进一步,虚拟 AP 可以将 WLAN 中众多物理 AP 作为它的数据收发器来进行统一管理,那是否可以将移动通信网络设施也作为它的数据收发器?何况能够支持 3G、WLAN、蓝牙等多种无线标准协议的融合无线芯片已成未来发展趋势,终端 (STA) 无线模块管理逐渐走向统一,那网络管理逐渐融合或许也是可行的,特别是移动通信网络和 WLAN 网络在统一的平台下进行用户认证、链路管理、流量统计和计费,那将为移动互联网的高速发展提供更加理想的网络支撑环境。

致谢:

本文中部分内容从[1]和[2]中直接翻译整理而来,在此向原作者表示敬意。

我的学生张凯、凌建辉参与了部分内容的翻译和讨论,为本文做出了贡献,一并致谢。

参考文献:

- [1]《移动互联网白皮书》(2013年),工业和信息化部电信研究院,2013年2月
- [2]Architectures and Algorithms for Future Wireless Local Area Networks,Peter Dely,Karlstad University,2012
- [3]S. Govindan, H. Cheng, ZH. Yao, WH. Zhou, and L. Yang. Objectives for Control and Provisioning of Wireless Access Points (CAPWAP).RFC 4564 (Informational), July 2006.
- [4]R. Mortier, T. Rodden, T. Lodge, D. McAuley, C. Rotsos, A.W. Moore, A. Koliouisis, and J. Sventek. Control and understanding: Owning your home network. In Proceedings of International Conference on COMMunication Systems and NETWORKS (COMSNETS) 2012, pages 1 - 10, January 2012.
- [5]Yiannis Yiakoumis, Kok-Kiong Yap, Sachin Katti, Guru Parulkar, and Nick McKeown. Slicing home networks. In Proceedings of the ACM SIGCOMM workshop on Home networks (HomeNets) 2011, pages 1 - 6, August 2011.
- [6]Li Erran Li AND Z. Morley Mao AND Jennifer Rexford. Toward Software-Defined

Cellular Networks. In Proceedings of the European Workshop on Software Defined Networking, October 2012.

[7]L. Suresh, J. Schulz-Zander, R. Merz, A. Feldmann, and T. Vazao. Towards Programmable Enterprise WLANs with Odin. In Proceedings of the ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in Software Defined Networks (HotSDN) 2012, pages 49 – 54, August 2012.

[8]Tsuyoshi Hamaguchi, Takuya Komata, Takahiro Nagai, and Hiroshi Shigeno. A Framework of Better Deployment for WLAN Access Point Using Virtualization Technique. In Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA) 2010, pages 968 – 973, April 2010.

[9]O. Braham and G. Pujolle. Virtual wireless network urbanization. In Proceedings of Network of the Future Conference (NOF) 2011, pages 31 – 34, November 2011.

[10]S. Govindan, H. Cheng, ZH. Yao, WH. Zhou, and L. Yang. Objectives for Control and Provisioning of Wireless Access Points (CAPWAP). RFC 4564 (Informational), July 2006.

[11]P. Calhoun, R. Suri, N. Cam Winget, M. Williams, S. Hares, B. O' Hara, and S. Kelly. Lightweight Access Point Protocol. RFC5412 (Historic), February 2010.

[12]Vestin, Jonathan, Peter Dely, Andreas Kassler, Nico Bayer, Hans Einsiedler, and Christoph Peylo. "CloudMAC: towards software defined WLANs." ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review 16, no. 4 (2013): 42–45.