

迈向极限无线互联之路

许辰人
北京大学

关键词：无线网络 极限无线互联

引言

近年来，无线技术的飞速发展使之如同水和电一样，成为了我们日常生活中不可或缺的一部分。以无线局域网技术 (Wireless Fidelity, Wi-Fi)、蓝牙技术 (Bluetooth) 和长期演进技术 (Long Term Evolution, LTE) 为代表的无线网络技术在室内外的互补，基本满足了我们通过手机、手表和音箱等智能设备随时随地和数字世界保持连接的需求。然而，今天的商用网络提供的数百兆带宽和数十毫秒级别延迟的性能，还远远无法满足我们对网络原生应用的用户体验期许。比如我们日常浏览一个普通网页通常需要等待 2 秒左右，而一旦上了地铁或高铁，页面加载时间就可能长达 5 秒甚至 10 秒以上。对视频和虚拟现实流媒体而言，我们经常因为网络带宽不稳定的缘故无法享受画质稳定的高清体验。另一方面，智能物联网对我们许下了一个通过信息技术就能随时随地和物理世界便捷沟通交互的美好愿景，从而在医疗健康、商务物流和休闲娱乐等行业产生颠覆性的革命和影响。

然而现实情况是，作为无源传感器和无源感知技术的代表，射频识别 (Radio Frequency Identification, RFID) 如今依然无法满足物流仓储和无人超市等密集程度稍大的应用场景，而有源物联网设备因为功耗和电池管理问题，制约了其在实际场景中大规模部署的可能性。这些性能瓶颈代表了对极限无线互联 (Extreme Wireless Networking) 的诉求。极限

无线互联是一种新一代无线互联技术，它能为极快移动、极低功耗和极多连接等传统无线技术无法满足其性能需求的新兴场景提供有针对性的设计和优化。换言之，现有的商用无线技术不仅让我们今天的用户体验打了折扣，还制约了更多面向未来的极限无线互联场景下智能应用服务的开发和部署。

随着 5G 商业化部署脚步的临近，我们预期将在增强型移动宽带 (eMBB)、超高可靠与低延迟通信 (uRLLC) 以及大规模机器类通信 (mMTC) 所赋能的无线接入场景迎来峰值 1 Gbps 的用户体验速率、毫秒级的延迟以及百万级 /km³ 的终端接入。在目前明确的 5G 落地技术中，硬件方面有基于大规模天线阵列 (Massive MIMO) 和毫米波技术的新空口技术来提升带宽，而软件方面则是以服务为中心的分布式核心网设计，即通过将网元进行解耦重构和模块设计实现微服务架构，将集中单元 (CU) 和分布单元 (DU) 分离，使得用户面网关逐步下沉来优化数据流量流向，并通过部署移动边缘计算切片服务来降低延迟。然而，不同运营商之间对 5G 标准的采用和实现既不统一也不透明。而且根据过往的经验，用户实际测试中体验到的性能指标往往离标准中的规范有一定的差距。

因此，本文立足于 4G 到 5G 演进的过渡阶段，旨在对面向未来的极限无线互联应用场景中的关键挑战点和学术界最有代表性的候选技术进行介绍，指出在泛化场景下满足高性能指标的关键，以及无线网络技术的发展趋势，并分享笔者在个人践行中的一些心得体会。

三种极限场景

极快移动

近年来,我们的出行方式有了更多更快的选择。尤其在今天,我国高速铁路飞速发展,为我们的中短途出行带来了极大的便利。与此同时,乘客也希望在旅途中享受优质的上网体验。然而,目前高铁乘客的通勤效率和上网速度构成了一对基本矛盾,主要原因有两点:第一,列车和基站的高速相对运动带来的多普勒扩展(Doppler spread)和信道衰变的快速变化会导致接收端的信噪比和有效带宽急剧减小,并导致误码率提高和有效覆盖范围减小;第二,平均约每9秒一次的频繁基站间切换产生的切换失败和间歇性网络无覆盖,导致大量丢包和网络延时的剧烈变化,使得基于主流拥塞算法(CUBIC)的传输层协议将链路层的丢包以及非丢包引起的网络延时当作网络拥塞来处理,从而错误地自我抑制了发送端的数据速度。这两点原因共同导致了乘客在高铁上使用网络时遇到的网速慢以及网络连接断续的问题,端到端吞吐率在350 km/h的情况下相比静止时下降可高达83%。

互联网在设计之初考虑到了网络在演进过程中的异构性和复杂性,在模块化理念的基础上进一步采用了协议栈分层的思想。从上述分析可以看出高铁网络性能涉及从物理层到应用层的跨层协同问题。与其等待和依赖底层硬件技术的升级,不如改进端到端协议,这样更切实可行。最近的测量研究发现,不同运营商的网络覆盖范围和基站间切换时机很少完全一致^[1],因此在多运营商网络接入的基础上,在移动终端和核心网内部的网元或者客户端代理之间部署多路径TCP(Multipath TCP)传输协议,可以有效聚集带宽并减少网络断开连接的时段。另一方面,最近谷歌公司基于对网络带宽和延时建模理念而设计的拥塞控制算法BBR由于无法适应高

铁网络的剧烈变化,导致其在发包策略上显得过于保守,而BBR+是在其基础上将网络延时的概率分布作为发包策略的一部分,从而有效地权衡带宽和延时的一种拥塞控制设计^[2]。

极低功耗

低功耗技术对实现绿色环保和人类文明的可持续发展起着积极和关键的作用。而在无线网络领域,低功耗成为了实现万物互联的必要条件。近年来随着物联网技术的日趋成熟,越来越多的设备和场所被赋予智能并正在积极地改善我们的生活环境。但是,物联网设备的爆炸式增长使得管理海量电池的任务成为了阻碍其大规模部署的一个实际问题。现在主流的物联网通信技术,例如蓝牙低功耗(BLE)、WiFi HaLow¹、LoRa²以及窄带物联网(NB-IoT)等,数据传输功耗无一例外都在几十甚至上百毫瓦。受限于物联网设备本身的大小,目前的锂电池续航只能支撑几周,而通常在实际部署的系统中,依赖太阳能电池和环境射频信号能获取的能量最多仅分别为数百和数十微瓦。由此推断,我们至少要将通信功耗降低到亚毫瓦级别甚至实现无源感知,才能使得万物互联成为现实。

反射通信(backscatter communication)是目前被认为最有潜力且实用性强的超低功耗技术。它通过反射环境中的(激励)信号而不是生成并发射信号来实现信息调制和传输,由此将发射功耗降低到原来的1/1000以下。RFID便是基于此原理研发的一项典型技术和应用。双基(bistatic)反射通信设计通过将传统RFID读写器上原本共位的收发模块在物理空间上解耦,实现分布式RFID系统^[3]。这种设计可以将载波激励源和接收器分离,为优化传输性能和覆盖范围提供了更大的可编程性和灵活性。基于此原理,研究人员通过设计和构建原型系统并在多种无线技术上做了积极的尝试^[4]。通过在激励源和接收器至少一端的软硬件系统定制,基于Wi-Fi

¹ HaLow是Wi-Fi联盟2016年通过的一项新标准,即802.11ah标准的拓展。主打的是低功耗、低功率设备。

² LoRa: Semtech公司创建的超低功耗局域网无线标准。

技术的通信速率最高可达 10 Mbps 以上^[5]，基于 LoRa 技术的通信距离最远可达 2.8 km^[6]，且它们的 IC 仿真级功耗都在 100 μ W 以下。另一方面，由于这些芯片的功耗极低，研究人员可以通过时域波束成形技术来引导电磁能量进入人体，使得无源反射传感器可以成功应用于人体大于 10 cm 的深度植入^[7]，未来这些微型生物医疗传感器将为癌症检测、帕金森综合征等疾病的治疗提供新的途径。值得一提的是，其中有一系列工作以牺牲部分性能为代价，通过精巧的设计实现了直接能和现有商用设备或芯片兼容的系统，以便快速部署^[8, 10]。同样是基于反射通信的原理，光标签则是利用逆反射器和液晶材料作为光学调制器实现宽视角自对准的亚毫瓦级被动式可见光通信技术^[11]。光的定向性使得该技术相比无线电技术在频谱效率、数据安全以及抗环境干扰方面具有根本性的优势。

极多连接

在万物互联描绘的愿景里，周围所有静默的物体都会被赋予直接通过数字世界与我们沟通的能力，并通过网络效应将设备数量的增长转化成它们所产生价值的指数级增长。实现万物互联除了需要低功耗技术以外，可扩展性是另一个必要条件。从宏观的角度来说，在万物互联语义下的可扩展性有两个层面：在有网关统一管理的情况下，在有限的带宽中能尽可能支持多路设备数据通信的并发；在没有网关的情况下，让使用异构无线技术的设备之间能够直接互相通信。

NetScatter 是第一个同时兼顾低功耗、长距离和多连接的物联网系统^[12]。该系统在 LoRa 反射通信的基础上提出了分布式线性调频扩频调制技术，可以在带宽仅为 2 MHz 下支持超过 1000 个设备的并发通信。此项技术基于线性调频，相比幅度、频率和相位键控调制而言，具有更优秀的抗干扰抗衰落性能，将不同起始频率的线性调频脉冲分配给多个发送设备实现多路频分复用的开关键控，相比之前的 LoRa 反射通信系统，其总吞吐率和时延均提升了约 60 倍。

跨协议通信 (cross-technology communication) 的

提出解决了不同无线技术设备间互联互通的问题。早期的跨协议通信通过在发送端进行数据包级别的修改（包括包长、发送时延、信号强度和信道状态信息）来调制信息，在接收端通过相应的先验知识来检测和解调。然而它们的速率会始终受限于固有协议发包速率。WeBee 是第一个基于物理层（篡改发送数据包载荷波形）仿真实现上百 Kbps 速率、支持并发且对两端硬件和固件全透明的跨协议通信技术^[13]。值得一提的是，跨协议通信除了能实现异构通信，还能减少设备间的相互干扰。

两项关键指标

随着移动互联网和智能物联网赋能的新兴应用在各行各业的渗透，终端用户对高带宽和低延迟的需求显得愈加迫切。以虚拟现实 (VR) 为例，要让用户感到不眩晕需要达到 20 ms 以内的延迟，而极致的视觉效果则需要 8K 分辨率及 Gbps 级别的带宽。伴随着 5G 的浪潮，无线接入网的基础设施从射频前端技术到网络体系架构正在经历颠覆性的变化，并给我们带来前所未有的机遇探索通信计算一体化优化，以提升其性能。当专用集成电路 (ASIC) 缺乏为场景定制开发的灵活性，而传统纯软件方案也无法满足性能要求的时候，我们需要从软硬件共融设计的角度来重新思考下一代无线接入网体系架构该如何设计。

极低延时

无线接入网中的延时分为无线接入侧和有线网侧。无线侧主要包括物理层在信道层面的模数信号数据流处理和 MAC 层的帧级别逻辑控制操作，而有线侧包括连接、设备、移动、计费管理等信令。Wi-Fi 通常作为热点部署，为数十个用户提供去中心化式的随机接入，而控制平面功能相对简单，因此主要延时在无线侧。移动通信网络（例如 LTE）除了传输数据外还有控制平面功能，而这些功能在基站间以及基站与核心网中交换的控制信令繁多且频繁，因此延时主要集中在有线侧。我们依托这两种主流技术分别介绍在数据平面和控制平面降低延

迟的通用方法。

现场可编程门阵列 (FPGA) 能实现时钟周期级别的控制和计算、逻辑门级别的可重构和流水线。这种支持硬件模块粒度灵活定制和调度的特点,使它在所有可编程芯片中是公认的最适合设计和实现低时延无线系统的平台。

Tick 是第一个既满足 Wi-Fi 标准的延迟要求,又具备易编程与可定制性的软件定义无线电系统^[14]。Tick 采用软硬件共融的设计理念,将计算量大、对延迟和时序要求高的系统模块(例如物理层的信道估计、同步、FFT/IFFT 等全部模块和 MAC 层的 CRC 校验模块等)主要实现在 FPGA 硬件上,而条件逻辑复杂但计算量小的 MAC 层控制功能(如信道检测、随机回退等)逻辑操作模块实现在嵌入式 (ARM 软核或硬核) 协处理器上。研究人员可以通过对不同模块的灵活组合或定制部分 PHY/MAC 模块,同时满足低延迟和可定制的要求。Tick 在物理层从计算机体系结构的角度出发,采用了松耦合多时钟域流水线架构和基于字段的流水线处理这两种优化技术达到延迟最小化。其中,第一种设计通过为每个模块分配一个单独的时钟,使得各个模块都在各自最高的时钟频率下工作,方便对每个模块独立进行性能优化而不受其他模块时钟频率影响。第二种设计是基于帧中的特定字段仅被流水线中相应的处理模块所使用的洞察,将物理层发送端部分字段越过流水线的某些层级,使得流水线上的多个模块可以并发地进行数据处理。当前一级流水线的计算结果传送到下一级时,越级到达的部分字段可能已经完成了处理,从而节省了时间。相比物理层,MAC 层对数据处理的计算量较少,但需要处理信道检测、随机回退等功能牵涉到的大量复杂的逻辑控制和条件判断等,而且要求微秒级别的时序控制。为了在支持灵活的逻辑控制的同时保证低延迟,Tick 采用了以 FPGA 加速器为主,嵌入式处理器协助控制的软硬件协同设计方案,并将数据流和控制流分离处理。具体来说,Tick 使用协处理器对多个 MAC 层模块的(数据流处理)硬件加速器通过其控制状态寄存器的读写进行控制。在 802.11ac

的实验结果中,Tick 在 DATA-ACK 的时间间隔(即 SIFS)达到了 $14.7\mu\text{s}$,满足了 IEEE 802.11ac 在 SIFS 上 $16\mu\text{s}$ 的延迟要求。

相比 Wi-Fi 而言,移动通信网络主要增加了广域移动管理的需求,因此它的网络架构及其控制平面会更为复杂。现有的 LTE 核心网架构将不同功能分开实现成分散的组成部件,主要包括处理控制信息的移动管理节点 (MME)、处理用户数据的服务网关 (S-GW) 和公用数据网关 (P-GW)。移动管理节点需要追踪用户位置、处理身份验证、辅助对称密钥协商、管辖基站和配置网关路由等功能。DPCM^[15] 提出了一系列利用终端信令状态副本加速推送的技术。首先,LTE 核心网中各部件存储的状态是有冗余的,因此用户设备可以将其相关状态直接推送给基站,以省去已有协议中基站向 MME 请求用户设备的相关状态造成的额外时间开销。其次,与前序信令没有依赖关系的控制平面和用户平面的数据可以并发传输,以进一步减少由于顺序传输信令造成的不必要的延迟。实验结果表明,DPCM 将跨移动管理节点的基站切换延迟由平均 902 ms 降低到了 166 ms。在 PEPC^[16] 的设计中,MME、S-GW 以及 P-GW 被整合到一起,实现了在一个部件中完成控制信息和用户数据的处理。相比之前的设计,该设计中每个用户的状态信息只存储一份,从而减少了用户在接入、请求服务以及切换基站时由于多份状态数据副本引起的同步和迁移开销。

极高速率

香农定理 (Shannon's Theorem) 不仅给出了信息传送速率的上限和信道信噪比及带宽的关系,同时也从理论上指明了提高速率的两个关键点。其中,信道带宽受限于当地的无线电管理委员会的管制。从物理性质上说,电磁波在频率低的频段传播距离远,穿透障碍物能力强,收发装置软硬件系统复杂性低。这个特点使得如果将 6 GHz 以下的优质频段开放给民用就会变得相对紧张。我国三大运营商在 4G 和 5G 上可用的频谱资源总和分别仅为 260 MHz 和 460 MHz,而在免授权频段,Wi-Fi 虽然在 2.4 GHz 和 5 GHz 上

的总频谱资源有 210 MHz，但出于设备硬件限制和减少干扰的考虑，一般一个无线接入点最多只使用 40 MHz。因此，提高信噪比和频谱利用率，以及在更高频段上寻求额外的（免授权）带宽资源成为了两个基本方案。目前它们各自公认的比较切实可行的技术是大规模天线阵列和毫米波技术。这两项技术已经被 5G 标准采用并准备进行商业化部署。

大规模天线技术是指在基站端同时使用数量大于 32 的天线阵列的通信技术，可以跳出单信道香农极限的限制，为并行信道提供巨大增益。它通过精确控制每根天线上输出波形的相位来生成可预计算的聚合输出波形，即波束成形——它可以在不改变信号频谱的情况下将能量集中在很窄的波束上，从而获得更大的空间分集增益，同时有效减小对其他波束的干扰，提高系统的信道容量、频谱效率和鲁棒性。以 Argos 架构为代表的基于软硬件协同设计的架构，可以有效解决大规模天线带来的可扩展性和实时性问题^[17]。为了实现不同数量射频链路的可扩展性，Argos 提出了结合集线器和串链的分层硬件架构，同时保证了系统的低延迟和灵活性。为了保证系统的实时性，Argos 一方面从软件层面加速信道校准，通过基站内部天线间的预先校准来减少需要校准的信道数量，另一方面利用波束成形权重只和相对信道估计有关的特点，用无反馈式信道校准代替反馈式信道校准。在波束成形预编码的算法上，Argos 将传统共轭算法中需要集中式计算得到的所有天线最大传输强度用每个天线各自的最大传输强度代替，从而支持波束权重的分布式计算，并利用分层硬件架构的优势，将波束权重计算与波束成形实现的计算量分配到各个 FPGA 无线基带处理模块，大大减小中央控制器的计算负担。目前最新的 Argos 架构支持多达 160 个天线的基站天线阵列。

毫米波技术使用的是波长在 1~10 毫米之间（频率在 30 GHz~300 GHz 之间）的电磁波，具有频谱宽、衰减大、穿透性差、天线尺寸极小等特点。例如 802.11ad 协议采用了毫米波技术中的 60 GHz 频段，具有约 2.16 GHz 单通道带宽的 4 个通道。Open-Milli^[18] 是第一个支持 GHz 级带宽的 60 GHz 软件定

义无线电平台。它使用了可编程的 4 天线相控阵天线，每个天线的相位有 2 种取值。采用编码本的方式，它一共可以支持 8 种波束模式的实时切换。为了实时处理大带宽的基带信号，OpenMilli 采取了与 Tick 类似的在物理层和 MAC 层上软硬件任务分配和管理的设计。受限于其使用的模数和数模转换器 1.25 Gsp/s 的最高采样速率，它在有效带宽 800MHz 的条件下速率最高能达到 1.3 Gbps。X60^[19] 则是第一个支持 2 GHz 传输带宽、12 单元的相控阵天线，提供 25 种波束模式的 60GHz 软件无线电平台。在最高采样率为 3.072 Gsp/s 的模数、数模转换器和多块 FPGA 作为基带处理单元的支持下，X60 在实际测试中的最大速度可以达到 4.75 Gbps。

发展趋势

在人工智能时代，无线网络技术决定了我们能更快、更广和更好地连接信息世界和物理世界，而其自身的发展和演进在今天依旧保持着旺盛的生命力。伴随着 5G/6G 的发展浪潮，通过对极限无线互联场景的畅想及对优化性能的探索，我们看到了三个势在必行的趋势。

第一，要打破软硬件之间的壁垒。今天的通用处理器已经越来越难以满足我们未来在数字世界中追求的极致体验。通过借鉴计算机体系结构研究工作的经验，我们可以重构无线网络系统全栈中的各个计算单元，为它们定制硬件加速器，并通过通用处理器灵活地进行协调和适配来优化系统总体能效。

第二，要打破协议栈层级之间的壁垒。当协议栈某一层具备直接或间接感知甚至预测网络状况能力的时候，跨层的信息共享可以极大地提升网络性能。以高铁网络场景为例，GPS 位置信息可以有效预测网络的连接情况，而基站侧的连接状态和负载信息可以有效地指导端到端的 TCP 拥塞控制策略研究。

第三，要打破利益相关者之间的壁垒。在未来天地空一体化网络的场景中，随着自动驾驶技术的普及，个体和群体的移动性会变得越来越可预测。因此，不论是从个体优化还是群体优化的角度

来说,网络运营商、互联网应用服务商、内容分发网络以及公共交通网络运营商都需要以更开放的态度分享数据和信息来合作并实现共赢。同时,今天的边缘和中间网元节点普遍具有远比IP网络设计之初更强大的计算和存储资源,这也促使我们重新思考该如何设计一个更扁平的以移动为中心的未来网络体系结构(例如MobilityFirst^[20]),能将身份、内容、情境、成员关系等网络地址以外的原语从应用层下沉到网络层,打破信息孤岛并使得这些资源能更高效地被感知和使用,并最终提高网络的运行效率和终端用户体验。

心路历程

2008年秋天,我抱着出去看看的心态前往美国求学。我所在的大学有一个无线信息网络实验室(WINLAB)。WINLAB是世界上最优秀的无线研究实验室之一,这里既有人研究如何最高能效地和外星人通信,成果发表到了*Nature*封面^[21],也有人在诺基亚N95的年代就开始做智能手机感知。当然最牛的还是ORBIT项目^[22],即一个包含了400个无线节点阵列可以用于支持软件定义无线电、软件定义网络和云计算等研究的开放平台。和AT&T贝尔实验室的渊源,也使WINLAB和工业界有着广泛和密切的联系。第一年的暑假,我走进了满心向往的WINLAB。

我第一次主导的研究课题完全是机缘巧合。当时WINLAB的一个工业界合作伙伴对无源感知技术很感兴趣,认为基于我们课题组的主动RFID系统可以实现高效、低成本智能家居老年健康检测,而我也刚好在熟练掌握这套系统后想尝试一些新的想法。无源感知在当时还是一个比较新的方向,最负盛名的要数美国犹他大学的无线电层析成像技术^[23]。这种方法的特点是需要密集规整的节点部署,通过对每条链路的信号衰减及其视线几何位置进行建模来计算空间中每一个点的衰减程度,从而反推出人所在的位置。这项工作的理论模型很漂亮,但通过实验我发现它在实际家居环境中受多径效应的影响,与实验结果和论文中在相对空旷环境下的结

果相去甚远。而我们的设备由于受限于成本,无法提供除了接收信号强度以外更细粒度的信道信息,因此无法对多径进行详尽分析并设计有针对性的方案。刚好在上机器学习课程的我,想到可以把定位问题转换成一个分类问题。基于这个思路,我们提出了随机指纹识别算法,即通过在采集训练数据的时候综合多径效应的随机影响来有效地提高定位精度。在导师的点拨和悉心指导下,这个课题及后续的一系列工作收获了物联网领域最好的国际会议和期刊的多篇长文,而我本人也于2014年很荣幸地顶着学校的最高荣誉获得了博士学位。

在攻读博士学位的六年中,有几件事对我产生了很大的影响。抱着对自己高标准的心态,我在2011年4月第一次投稿就尝试去投顶级会议,结果不出意外地被拒收了。在我的主动要求和导师的鼓励与支持下,我申请到会议的旅行资助,在会议的海报环节满怀激情地介绍了自己被拒的工作,居然很幸运地获得该会议的年度最佳海报论文奖,可谓意外之喜。奖项虽小,但给予我很大的精神鼓舞以及在学术道路上走下去的信心和动力。自从我的研究工作有了一些起色和进展之后,我开始自信地和同行进行工作交流,在探讨中收获了很多启发和合作。我们和AT&T实验室移动感知专家的合作首次提出了基于智能手机的群智感知计数方法来解决基于无线电的无源感知技术在人数过多时面临的瓶颈,和实验室研究可见光通信的同学对基于光电融合感知的增强现实识别技术项目的合作经历,让我对可见光通信有了一定了解和兴趣,也为我今后从事相关研究方向做了铺垫。2013年8月,麻省理工学院在整个计算机网络领域最好的学术会议上发表了WiVi这项工作^[24]。同样是做无源感知,我惊叹于他们切入问题和场景角度的独到之处以及对无线电底层技术了解和改造的彻底程度。如果要总结经验教训的话,我想从挑选实验平台这一步就应该选择对底层技术的可编程性支持更具开放性的平台,当然也很可能会有因为能力有限导致项目失败的风险。

博士毕业后,我在卡耐基梅隆大学计算机系做博士后,这一年的研究内容是基于未来网络体系架

构在车联网的内容分发。可以说，这个项目和之前的研究经历几乎没有任何交集，而我很欣喜地把这个挑战看成一个机遇。这一年里，得益于这个项目自身的性质和合作导师的启发，我对计算机系统研究自上而下的设计理念，以及在系统设计方面打破陈规的颠覆性思考习惯有了感性的认识和实践。

博士后出站后我入职了北京大学。燕园汇聚了全国最顶尖且极具天赋的人才，加上其开放包容的平台和氛围，这些都在激励着我去证明自己的独立研究能力，并让我很享受这个过程。我给自己未来6年的研究定了三个纲领和基调：希望能研究甚至开辟一些新的方向，这样和博士期间的研究能做一个明显的区分；在物联网领域，我希望能研究新型通信技术，因为它更底层，需要软硬件融合，面临的挑战更大，也更容易有显示度；我还希望能结合我国特色在国际上做出一些独特的贡献。在反复思索以及和国内外同行不断的交流中，我终于在入职后的第二年逐渐明确了自己科研的主打方向，即可见光反射通信和高铁数据网络。

自2013年起，反射通信就成为无线网络领域最火的研究方向之一。至今大部分的研究人员都在无线电频段和不同的无线网络技术上做各种尝试和研究。我很喜欢无源低功耗这个理念，但希望能另辟蹊径做一些与众不同的工作。受路面上反光标志物的启发，我想把这些原本是为了增强可见性和交通安全性而部署的道路基础设施改造成携带可定制动态信息的光标签，实现一系列全新的移动交互和可用于自动驾驶的车路协同技术。我们从设计PCB硬件电路开始，花了整整两年的时间，经历了数十次迭代过程搭建出了一套光标签软件定义平台，并把原型系统在物联网和车联网这两个场景上定制。目前，该平台正在朝低功耗、长距离、高速率、多用户接入以及基于此技术的新型感知和成像技术等方向并行地开展一系列研究工作。而另一个高铁数据网络项目则同样来源于生活，即我希望能出差过程中保持连续、高效的工作。我们从跨层网络协议测量开始，后续花了一年多的时间搭建了一个完全在用户空间的多路多通框架与中间件，逐步从端到端

和跨层协议设计，结合移动互联网应用的特点乃至整个移动网络体系架构的角度来优化网络性能。值得一提的是，这个实验平台的中国特色为我们做这个方向的研究建立了天然的高门槛。而在过去的4年中，得益于北大的平台，我也逐渐建立起自己的小团队，并和国内外顶尖学术机构保持密切的沟通与合作。

总结一下自己过往的研究经历，从读博士阶段做的无源感知应用，到今天的可见光反射通信以及高铁数据网络，我在应用层和物理层之间来回切换上下游走。与此同时，我也在有意识地尝试在不同的应用场景都能有所涉猎或全栈贯通。WINLAB的研究领域覆盖网络协议栈的每一层，这对我后来面对任何新问题都勇于探索并寻求挑战与机遇，有着潜移默化的引导。博士后那一年接触的未来网络和车联网领域，让我对计算机网络的全栈面貌和高速移动场景有了感性的认识，也在冥冥之中指引着我在基于可见光反射通信的车路协同和高速移动数据网络这两个研究方向上开展工作。 ■



许辰人

CCF 专业会员。北京大学计算机科学技术系高效计算与应用中心助理教授。首届阿里巴巴达摩院青橙奖获得者、CCF-英特尔青年学者。主要研究方向为无线网络系统。chenren.xu@gmail.com

参考文献

- [1] Li L, Xu K, Li T, et al. A measurement study on multipath TCP with multiple cellular carriers on high speed rails[C]// *Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'18)*, ACM, 2018: 161-175.
- [2] Wang J, Zheng Y, Ni Y, et al. An active-passive measurement study of TCP performance over LTE on high-speed rails[C]// *The 25th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'19)*, ACM, 2019.
- [3] De Donno D, Ricciato F, Catarinucci L, et al. Challenge: Towards distributed RFID sensing with software-defined radio[C]// *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'10)*, ACM, 2010: 97-104.
- [4] Xu C, Yang L, Zhang P. Practical backscatter

- communication systems for battery-free internet of things: A tutorial and survey of recent research[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018, 35(5): 16-27.
- [5] Zhao R, Zhu F, Feng Y, et al. OFDMA-enabled Wi-Fi backscatter[C]// *The 25th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'19)*, ACM, 2019.
- [6] Talla V, Hesar M, Kellogg B, et al. LoRa Backscatter[J]. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2017, 1(3): 1-24.
- [7] Ma Y, Luo Z, Steiger C, et al. Enabling deep-tissue networking for miniature medical devices[C]// *Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'18)*, ACM, 2018: 417-431.
- [8] Wang A, Iyer V, Talla V, et al. FM backscatter: Enabling connected cities and smart fabrics[C]// *Proceedings of the 14th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'17)*, USENIX Association, 2017: 244-258.
- [9] Zhang P, Josephson C, Bharadia D, et al. FreeRider: Backscatter communication using commodity radios[C]// *Proceedings of the 13th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies (CoNEXT'17)*, ACM, 2017: 389-401.
- [10] Peng Y, Shangguan L, Hu Y, et al. PLoRa: A passive long-range data network from ambient LoRa transmissions[C]// *Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'18)*, ACM, 2018: 147-160.
- [11] Xu X, Shen Y, Yang J, et al. Passive VLC: Enabling Practical Visible Light Backscatter Communication for Battery-free IoT Applications[C]// *Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'17)*, ACM, 2017: 180-192.
- [12] Hesar M, Najafi A, Gollakota S. Netscatter: Enabling large-scale backscatter networks[C]// *Proceedings of the 16th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'19)*, USENIX Association, 2019: 271-283.
- [13] Li Z, He T. WEBee: Physical-layer cross-technology communication via emulation[C]// *Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'17)*, ACM, 2017: 2-14.
- [14] Wu H, Wang T, Yuan Z, et al. The tick programmable low-latency SDR system[C]// *Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'17)*, ACM, 2017: 101-113.
- [15] Li Y, Yuan Z, Peng C. A control-plane perspective on reducing data access latency in LTE networks[C]// *Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'17)*, ACM, 2017: 56-69.
- [16] Qazi Z A, Walls M, Panda A, et al. A high performance packet core for next generation cellular networks[C]// *Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'17)*, ACM, 2017: 348-361.
- [17] Shepard C, Yu H, Anand N, et al. Argos: Practical many-antenna base stations[C]// *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'12)*, ACM, 2012: 53-64.
- [18] Zhang J, Zhang X, Kulkarni P, et al. OpenMili: a 60 GHz software radio with a programmable phased-array antenna[C]// *Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'16)*, ACM, 2016: 162-175.
- [19] Saha S K, Ghasempour Y, Haider M K, et al. X60: A programmable testbed for wideband 60 GHz WLANs with phased arrays[J]. *Computer Communications*, 2019, 133 (1): 77-88.
- [20] MobilityFirst future internet architecture project[OL]. <http://mobilityfirst.winlab.rutgers.edu/>.
- [21] Rose C, Wright G. Inscribed matter as an energy-efficient means of communication with an extraterrestrial civilization[J]. *Nature*, 2004(431): 47-49.
- [22] Open-access research testbed for next-generation wireless networks (orbit). <https://www.orbit-lab.org/>
- [23] Wilson J, Patwari N. Radio tomographic imaging with wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(5): 621-632.
- [24] Adib F, Katabi D. See through walls with wifi![C]// *Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'13)*, ACM, 2013: 75-86.