5G 前传光网络: 关键问题、重要特征与发展目标

纪越峰*, 张佳玮*

北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

* 通信作者. E-mail: jyf@bupt.edu.cn, zjw@bupt.edu.cn

收稿日期: 2017-06-20; 接受日期: 2017-08-21; 网络出版日期: 2017-10-16

国家自然科学基金 (批准号: 61501055) 资助项目

摘要 5G 正在朝着更高速率、更低时延、更低功耗的方向迈进, 前传光网络 (fronthaul optical network) 已成为提升其综合能力必不可少的重要手段之一. 本文阐述了 5G 前传光网络未来发展趋势的“三一”观点 (一个关键问题, 一个重要特征, 一个发展目标): (1) 面向 5G 大带宽和低时延传送需求, 探索光网络资源的多维度复用技术, 实现海量数据的高速与低时延传送是 5G 前传光网络亟待解决的关键问题; (2) 天线数量的激增与虚拟化技术的不断部署, 导致面向 5G 前传光网络的拓扑不再是固定的点到点的连接形式, 构建灵活与可重构的前传光网络是实现 5G 资源高效配置的重要特征; (3) 满足不断增长的移动业务流量需求, 以及物联网等多样化业务接入下的高质量数据传送, 结合人工智能与机器学习, 打造深度智能化的控制管理系统是未来 5G 前传光网络的又一发展目标.

关键词 移动前传, 宽带, 低时延, 网络灵活性, 人工智能

1 背景

近年来, 随着移动数据流量的极速递增, 组播等多样化业务的快速发展, 以及高质量网络服务与用户体验的实际需求, 移动网络的发展面临着网络资源分配与传输时延控制层面的诸多挑战. 未来的无线接入网络迫切需要支持更强的灵活性、动态性与宽带性^[1]. 而光纤通信技术可满足相关需求, 如利用光纤实现分布式简易微天线的拉远, 利用高速光传输与光交换实现宽带接入与资源调配, 利用集中式可编程控制实现灵活、智能和低耗管理, 因此, 无线通信与光通信相融合的接入网络代表了未来发展趋势.

为了实现更高的无线资源利用效率, 业界提出了云无线接入网. 其本质是将基带处理单元 (baseband unit, BBU) 从传统的无线基站中分离, 仅剩下远端射频单元 (remote radio unit, RRU), 并将 BBU 集中起来进行虚拟化处理, 实现基带处理资源的高效利用. 前传网络是连接 RRU 与 BBU 之间的传输通道, 需要满足大带宽和低时延的传输需求. 光网络作为移动前传的一种主要实现手段正受到学术界的广泛关注. 此外, 国内外有关 5G 前传光网络的标准建议也正在研究与商讨中.

引用格式: 纪越峰, 张佳玮. 5G 前传光网络: 关键问题、重要特征与发展目标. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 1435–1442, doi: 10.1360/N112017-00136
Ji Y F, Zhang J W. 5G optical fronthaul: key issues, features and goals (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 1435–1442, doi: 10.1360/N112017-00136

目前, 在移动前传中普遍应用的通用公共无线电接口 (CPRI 接口) 存在带宽需求量大, 时延要求高, 灵活性差, 难以扩展等问题. 为解决上述问题, 3GPP 提出了基于基带功能分割的无线接入网架构, 即重新划分 BBU 与 RRU 的基本功能, 将 BBU 中的部分基带处理功能转移至 RRU 上, 以减少前传网络带宽和时延的需求, 并增强了 BBU 与 RRU 资源分配的灵活性. 基于上述架构, 业界提出了下一代无线前传接口^[2] (next generation fronthaul interface, NGFI), 其可变带宽速率与基于分组特性的传输功能使得 5G 前传网络具有更强的灵活性和更高的资源利用效率. 通过灵活可重构的前传光网络将无线信号传送到不同的基带处理单元中, 可实现无线信号与处理资源的高效适配^[3].

此外, 由于 5G 时代用户设备的移动性, 数据的突发性以及巨大的数据带宽需求, 相比于传统的移动网络管控方式, 未来 5G 接入网络需要新的资源管控方式. 人工智能通过其强大的学习能力, 对网络状态进行分类并不断利用数据集进行学习, 使其自身能够根据网络状态的变化给出相应的资源管控策略, 使网络变得更自适应与智能化.

2 低时延大带宽是 5G 前传光网络的重要技术挑战

5G 空口速率的急剧增长需要更大的传输带宽. 随着虚拟现实、物联网、高清视频等移动业务的出现, 5G 无线通信需要支持更高频段的空口设计 (millimeter wave), 更大规模的天线阵列 (massive MIMO), 更宽的频谱范围 (100 MHz, 200 MHz), 以及更密集的蜂窝部署 (small cell), 将会导致海量的数据接入. 随着网络中天线数的不断增长, RRU 所需要的天线数将比目前 4G 系统大幅增加, 现有的 CPRI 接口的带宽需求也将会增长数十乃至上百倍, 这无疑会给 5G 前传光网络带来巨大的带宽压力. 因此, 如何利用光传输技术解决 5G 网络中因为空口速率的急剧增长所带来的传输带宽需求, 是未来 5G 前传光网络所面临的一大挑战. 为了解决前传带宽问题, 可通过对 CPRI 信号进行压缩的方式减少前传带宽的压力^[4]. 此外, 在现有的波分复用系统中, 引入空分复用的方式, 通过多芯光纤技术实现前传容量的提升^[5]. 特别是对于 Massive MIMO 场景下, 将无线中的 MIMO 处理技术和光传输中的 MIMO 处理技术相结合可实现更高的频谱利用效率和处理效率.

5G 业务数据传送的高要求需要更低的传输时延. 针对超可信低时延通信 (ultra-reliable low-latency communication, uRLLC) 应用场景, 对无线信号在 5G 前传网络中的传输与处理提出了极高的要求. 无线信号在光网络中的适配、传输, 与交换等需要在极短时间内完成. 因此, 如何解决大量数据接入下, 传输与处理资源调度过程中的时延控制, 满足 5G 时延敏感业务的时延要求, 是 5G 前传光网络所面临的另一大挑战. 表 1 给出了不同天线配置下的前传带宽和时延要求. 为了减少前传时延, 可利用光与无线网络协同工作的方式, 如通过 BBU 与 OLT 之间的信息交互, 将无线带宽需求与光传送通道有效匹配, 解决了因 TDM-PON 上行时隙分配所带来的时延过大问题^[7]. 此外, 也可在带宽受限的前传网中通过不同的数据封装策略来满足传输时延需求^[8].

大带宽与低时延是 5G 前传网络的重要挑战. 通过先进的光通信与组网技术来解决上述带宽与时延问题. 例如, 针对带宽问题, 采用密集波分复用技术 (DWDM) 实现 Gbps 多路并发数据传输, 目前单波长 10 Gbps 的光收发单元技术以及 50 GHz 和 100 GHz 的波分复用与解复用器已经十分成熟, 且成本相对较低, 可以用于接入侧的大量部署. 此外, 为了实现更大粒度、更精细化的带宽处理, 采用基于正交频分复用 (OFDM) 的灵活栅格光网络, 以及基于多芯光纤的空分复用 (SDM) 光网络是未来前传光网络的发展方向. 再如, 针对时延问题, 一方面通过改进现有的光传输网络技术, 如无源光网络 (PON) 和光传送网 (OTN), 减少其层间信号适配复杂度, 使其能够适应低时延业务传输需求; 另一方面可以通过光波处理技术, 使前传信号适配扁平化, 射频信号可直接通过物理层信道进行传输, 减少

表 1 不同天线配置下的峰值速率与平均吞吐量^[6]Table 1 Peak rate and average throughput under different antenna configurations^[6]

Antenna configuration	Air interface data rate (Gbps/s)	Fronthaul interface data rate (Gbps/s)	Latency (ms)
125 MHz-256QAM-8×8 MIMO	0.61	61	0.1
175 MHz-256QAM-8×8 MIMO	0.85	85	0.1
100 MHz-256QAM-16×16 MIMO	0.98	98	0.1
125 MHz-256QAM-16×16 MIMO	1.2	120	0.1
150 MHz-256QAM-16×16 MIMO	1.5	150	0.1
250 MHz-256QAM-16×16 MIMO	2.4	240	0.1
500 MHz-256QAM-16×16 MIMO	4.9	490	0.1
500 MHz-256QAM-32×32 MIMO	9.8	980	0.1

了信号处理所造成的时延问题.

综上, 实现移动用户数据的大带宽与低时延传送是未来 5G 前传光网络追求的目标, 探索光网络中的多维 (时分、波分、空分等) 复用技术, 实现海量数据的高效传送是未来 5G 前传光网络中的关键问题.

3 网络的灵活性是 5G 前传光网络的重要特征

5G 前传光网络要求接入网更加灵活, 重点表现为网络连接的动态可重构与前传带宽的弹性可变. 首先, 天线数量的持续递增和虚拟化技术的不断部署, 导致面向 5G 的前传网络拓扑不再是简单的点对点式结构 (如图 1 所示), 因此支持更高自由度的前传连接是未来的发展趋势; 其次, 在 5G 网络庞大、多样的数据流量承载需求下, 提升网络带宽配置的灵活性, 实现按需高效分配, 可有效地缓解前传带宽压力.

首先, 从移动前传光网络本身考虑, 为了提升其灵活性, 可以通过分析移动前传流量, 优化 TDM-PON 移动前传网络的带宽分配^[9]. 在基于 WDM 的下一代无源光网络 (NG-PON) 中, 可通过设计新型的动态带宽 (时隙) 和波长分配模型, 实现高效灵活的前传网络资源调配^[10]; 相比于光载数字无线传输来说, 光载模拟无线传输具有更高的带宽利用效率. 通过采用支持多用户多输入多输出 (MU-MIMO) 的 RoF-WDM-PON 系统, 设计动态的光与无线资源分配模型, 通过异构资源建模与启发式算法设计, 实现低成本和大容量的模拟无线信号传输^[11]. 其次, 对于下一代前传网络接口, 可变带宽传输接口相比于传统的 CPRI 接口具有更加灵活的数据传输速率, 适用于未来移动前传网络的超大规模带宽需求^[12]. 再次, 移动前传光网络灵活性的另一个重要体现在于网络控制与管理的灵活性. 基于 SDN/NFV (software defined network, SDN; network function virtualization, NFV) 的网络控制架构可实现网络的虚拟化与弹性可切片, 从而为网络资源的灵活, 低成本适配提供了可能^[13].

通过对比诸多研究结果可以看出, 为支持复杂的网络拓扑, 实现对用户的优质服务, 必须对 5G 前传光网络提出更高的灵活性要求, 这主要体现在对无线资源的灵活映射^[14], 对网络带宽的灵活分配, 以及对虚拟化^[15]技术的支持 3 个方面.

5G 前传光网络需要更灵活的资源映射机制. 目前, 尽管 BBU 与 RRU 在地域角度处于分离状态, 但其间仍采用固定连接的方式. 此种非灵活的静态连接方式, 会导致资源利用率与服务质量整体

图 1 (网络版彩图) 灵活的 5G 前传光网络示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the flexible 5G optical fronthaul networks

性下降,这其中主要存在 3 方面原因: (1) 因为每个 BBU 基带池下辖大量的 RRU,对于可靠性的要求较高.而当某个 BBU 池发生故障,在固定连接的模式下,将无法支持链路的动态恢复; (2) 移动流量的潮汐效应导致 BBU 的利用率随时间和地域的变化而变化,因而当某些 RRU 处于空闲状态时,与其对应的 BBU 处理资源将被浪费; (3) 固定连接的模式不利于多个 RRU 之间的数据共享,从而限制了多点协作 (coordination of multiple point, CoMP) [16,17] 的系统性能.因此,5G 前传光网络需要更灵活的资源映射机制.

5G 前传光网络需要更灵活的带宽分配机制. 面对 5G 网络中急剧膨胀和频繁变化的移动数据流量,当前固定带宽分配的前传网络分配机制无法满足未来的发展需求,这其中主要存在 4 方面的原因: (1) 现有网络架构中 BBU 与 RRU 之间的传输带宽资源紧张,固定带宽分配模式势必导致带宽资源的闲置,致使资源利用率降低; (2) 网络中业务存在多样化的带宽需求,刚性的分配机制无法根据实际需求动态分配带宽,从而导致网络调度过程中数据传输效率相对低下; (3) 数据流量的快速增长,固定分配模式势必引入额外的传输设备,增加网络建设成本; (4) 刚性的带宽分配机制不利于无线网络的集中式部署,从而影响组网性能.因此,5G 前传光网络需要更灵活的带宽分配机制.

5G 前传光网络需要更灵活的 NFV 支持手段. 目前网络中存在诸多私有专用的网元设备, NFV 技术的引入能够整体性地提升网络运作性能,使各项资源充分地灵活共享,这主要表现在 3 个方面: (1) NFV 技术通过功能抽象,使网络设备无需依赖专用硬件,进而实现资源灵活共享; (2) NFV 技术支持新业务的快速开发,并且保证其灵活部署与故障自愈; (3) NFV 技术的引入有利于降低网络设备成本投入,为运营商提供更灵活的网络运营模式.因此, NFV 在 5G 前传光网络中具有较高的技术定位与广阔的应用前景 [18],能够从整体上为 5G 传送网络提升灵活性并压缩成本.

一般来说,灵活可重构的前传光网络包括两种实现方案.其一是无源光网络(PON)方案,通过支持可调节激光器和滤波器的无源光网络实现BBU与RRU的灵活映射关系;其二是有源光网络方案,在前传网络的中间节点增加交换功能,实现网络与链路的可重构.

另外,就前传光网络的信号承载而言,光载模拟无线接入系统和光载数字无线信号接入系统都是5G光载无线接入的技术手段,应用于不同的无线接入环境和场景.例如:针对低频无线信号,可以采用光载数字无线传输,其优势在于远距离传输和QoS保障,但缺点在于带宽需求量大,时延要求高;针对高频无线信号,可以采用光载模拟无线传输,其优势在于带宽需求小,无需高速数字信号处理,但缺点在于传输距离受限,信号衰减和干扰较大.两种技术手段,各有特点,可根据实际需求做灵活调整与部署,从而满足5G前传光网络的灵活性需求.

上述的资源映射,带宽分配,NFV技术对5G光传送网的弹性和可重构性提出了更高的要求,构建灵活的前传光网络是5G接入网未来发展的重要特征.

4 人工智能是解决 5G 前传光网络灵活控管的必然之路

为满足5G时代数据流量的极速递增,以及多样化业务泛在接入下的高质量网络服务需求,高智能管控将成为网管平面的演进指向,从而促进多维网络资源的弹性融合^[19,20].目前,常规管控技术处于网管指配甚至人工干预,无法适应未来网络的演进需求.SDN技术从一定程度上解决了网络资源互联管控的问题,但从智能性角度而言仍有欠缺.如何部署学习能力,提升网络智能层级,实现思维化管控,是5G时代的追求目标.为实现这一目标,人工智能与5G的融合将势在必行^[21,22].

关于提升网络智能性方面,可通过基于软件定义的集中控制手段,统一调控由无线网络资源和光网络资源组成的多层异构网络,实现资源的智能按需分配^[23].此外,通过控制器和编排器之间的协作,设计不同的智能化控管策略,实现5G接入网络的层次化控制^[24];在采用人工智能的方式解决网络控管方面,可通过一种人工智能的网络决策结构,该结构包含两个相互关联的,且能够交互的决策内核,一个负责感知物理层信息,另一个执行对网络资源的控制,旨在对前传网络与用户小区中的流量分布进行联合优化,尽可能地满足所有用户对于数据速率的实际需求,并通过控制蜂窝开启数量最大限度地减少网络能耗^[25].通过分析不同研究课题可以发现,移动网络的演进将带动网管智能化的升级,具体表现如下.

业务属性的改变要求 5G 网络装备更智能的管理平台.5G前传光网络的业务属性将发生重大变革.在传统的前传光网络中,用户业务属性相对单一,其业务分布符合一定的统计规律.然而,5G时代下,大量的数据业务从固定设备转移到移动设备.智能手机、智能平板,以及物联网传感器等设备生成的业务,呈现移动性强、突发性强、体量巨大等特性.另外,对于设备的移动趋势以及业务发生概率,借助传统模型难以预测,从而导致对移动用户进行资源分配较为困难.因此,在5G背景下,仍然借助传统的管控手段将无法上述业务需求.

人工智能技术的引入为 5G 网络管控平台提供独立决策能力.为使机器能够具有良好的思维能力,将人工智能技术转嫁至网络管控层面,如图2所示,具有4大优势:(1)能够使网络具备自学习性,根据训练集不断调整自身参数,最大可能地去适应所有输入场景;(2)能够使网络具备自组织性,传送网络根据学习结果对输入业务,对网络传输、处理功能模块,进行非人为干预下的独立规划与适配;(3)能够使网络具备无监督自推广性,网络能够对全新的输入场景进行无监督下的分析,从已有知识库中对新问题进行归纳、演绎,无监督地制定出适应新场景的全新策略;(4)能够使网络具备无监督自适应性,该特性承接无监督推广的演绎结果,将新策略在网络中按局部到全局的顺序逐步推广,从而适应

图 2 (网络版彩图) 人工智能管控下的网络架构
Figure 2 (Color online) Network architecture under artificial intelligence

频繁变化的网络负载. 上述特性中, 最后两项是人工智能管控的优势, 重点突出无监督的特性, 使网络能够从真正意义上达成蜕变而实现智能化.

无论是从适应 5G 时代万物互联的全新场景角度, 还是实现高速流量下的多样化网络服务与高质量用户体验角度出发, 人工智能管控技术都将具有广泛的应用前景与拓展空间. 人工智能是解决复杂光传送网管控的有效手段.

5G 前传光网络的研究与发展正愈来愈受到业界的广泛重视, 本文阐述了对它的“三一”观点 (一个关键问题, 一个重要特征, 一个发展目标). 目前尽管一些系统指标、技术途径与标准规范尚未明晰, 一些观点也还在讨论或争论中, 但由于需求的强烈性和迫切性, 以及技术的针对性和适应性, 研究工作不会停止, 一些问题也会在演进过程中得到解决, 5G 前传光网络将具有广阔的应用前景.

参考文献

- 1 Ji Y F, Zhang J W. Radio waves travel with light: smart light wireless I-RoF technology. IEEE Spectrum, 2016, 4: 64–65 [纪越峰, 张佳玮. 无线电波, 与光同行: 智能光载无线 I-RoF 技术. 科技纵览, 2016, 4: 64–65]
- 2 Chih-Lin I, Yuan Y N, Huang J R, et al. Rethink fronthaul for soft RAN. IEEE Commun Mag, 2015, 53: 82–88
- 3 Fiorani M, Tombaz S, Farias F S, et al. Joint design of radio and transport for green residential access networks. IEEE J Sel Area Commun, 2016, 34: 812–822
- 4 Shibata N, Shigeru K, Jun T, et al. Dynamic IQ data compression using wireless resource allocation for mobile front-haul with TDM-PON. J Opt Commun Netw, 2015, 7: 372–378
- 5 Morant M, Macho A, Llorente R. On the suitability of multicore fiber for LTE-advanced MIMO optical fronthaul systems. J Lightw Technol, 2016, 34: 676–682
- 6 Musumeci F, Tornatore M, Pattavina A. A techno-economic outlook to optical-interface requirements for midhauling of 5G small cells. In: Proceedings of the 42nd European Conference on Optical Communication, Dusseldorf, 2016. 1–3
- 7 Takayoshi T, Shigeru K, Jun T, et al. A novel DBA scheme for TDM-PON based mobile fronthaul. In: Proceedings

- of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, San Francisco, 2014. 1–3
- 8 Chang C-Y, Nikaen N, Spyropoulos T. Impact of packetization and scheduling on C-RAN fronthaul performance. In: Proceedings of Global Communications Conference, Washington, 2017. 1–7
- 9 Kobayashi T, Ou H, Hisano D, et al. Bandwidth allocation scheme based on simple statistical traffic analysis for TDM-PON based mobile fronthaul. In: Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, Anaheim, 2016. 7
- 10 Wang L, Wang X B, Tornatore M, et al. Dynamic bandwidth and wavelength allocation scheme for next-generation wavelength-agile EPON. *J Opt Commun Netw*, 2017, 9: 33–42
- 11 Xu S, Xu S G, Tanaka Y. Dynamic resource reallocation for 5G with OFDMA in multiple user MIMO RoF-WDM-PON. In: Proceedings of IEEE Communications, Kyoto, 2015. 480–484
- 12 Jun-ichi K, Shigeru K, Jun T. Options for future mobile backhaul and fronthaul. *Opt Fiber Technol*, 2015, 26: 42–49
- 13 Costa-Perez X, Garcia-Saavedra A, Li X, et al. 5G-crosshaul: an SDN/NFV integrated fronthaul/backhaul transport network architecture. *IEEE Wirel Commun*, 2017, 24: 38–45
- 14 Zhang J W, Ji Y F, Xu X Z, et al. Energy efficient baseband unit aggregation in cloud radio and optical access networks. *J Opt Commun Netw*, 2016, 8: 893–901
- 15 Zhang J W, Ji Y F, Song M, et al. Dynamic virtual network embedding over multilayer optical networks. *J Opt Commun Netw*, 2015, 7: 918–927
- 16 Zhang J W, Ji Y F, Jia S H, et al. Reconfigurable optical mobile fronthaul networks for coordinated multipoint transmission and reception in 5G. *J Opt Commun Netw*, 2017, 9: 489–497
- 17 Zhang J W, Yu H, Ji Y F, et al. Demonstration of radio and optical orchestration for improved coordinated multi-point (CoMP) service over flexible optical fronthaul transport networks. In: Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, Los Angeles, 2017. 2
- 18 Abdelwahab S, Hamdaoui B, Guizani M, et al. Network function virtualization in 5G. *IEEE Commun Mag*, 2016, 54: 84–91
- 19 Yang H, Zhang J, Zhao Y L, et al. CSO: cross stratum optimization for optical as a service. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 130–139
- 20 Yang H, Zhang J, Ji Y F, et al. C-RoFN: multi-stratum resources optimization for cloud-based radio over optical fiber networks. *IEEE Commun Mag*, 2016, 54: 118–125
- 21 Sharma T, Ritesh K, Chauhan N, et al. Analogous study of 4G and 5G. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, 2016. 2137–2140
- 22 Li R P, Zhao Z F, Zhou X, et al. Intelligent 5G: when cellular networks meet artificial intelligence. *IEEE Wirel Commun*, 2017, 99: 2–10
- 23 Zhang J W, Ji Y F, Zhang J, et al. Baseband unit cloud interconnection enabled by flexible grid optical networks with software defined elasticity. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 90–98
- 24 Fiorani M, Rostami A, Wosinska L, et al. Abstraction models for optical 5G transport networks. *IEEE/OSA J Opt Commun Netw*, 2016, 8: 656–665
- 25 Bartoli G, Marabissi D, Pucci R, et al. AI based network and radio resource management in 5G hetNets. *J Signal Process Syst*, 2017, 89: 133–143

5G optical fronthaul: key issues, features and goals

Yuefeng JI* & Jiawei ZHANG*

State Key Lab of Information Photonics and Optical Communication, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

* Corresponding author. E-mail: jyf@bupt.edu.cn, zjw@bupt.edu.cn

Abstract 5G optical transport networks are advancing toward higher speed, lower latency, and lower power consumption. The main viewpoints presented in this article regarding the development trends in 5G optical transport networks are: (1) Large bandwidth and low latency transmissions are the major goals for future 5G optical transport networks. This is the essential problem for multi-dimensional optical multiplexing technology, with the goal of the transmission of massive data at high speeds with low latency. (2) With the surge in the number of antennas and the continuous deployment of virtualization technology, the topology of 5G transport networks no longer requires a fixed connection mode. The construction of flexible and reconfigurable transport networks is an important feature of 5G resource utilization. (3) In order to meet the growing demand for mobile traffic, as well as high-quality transmission for the diversification of Internet of Things services, combining artificial intelligence and machine learning technology to construct a deep-intelligence control plane for 5G optical transport networks is another significant development goal.

Keywords mobile fronthaul, broadband, low latency, network flexibility, artificial intelligence

Yuefeng JI was born in 1960. He received his Ph.D. degree in electromagnetic fields and microwave technology from the Beijing University of Posts and Telecommunications. He is currently a professor at the Beijing University of Posts and Telecommunications and executive dean of the School of Optoelectronic Information. Additionally, he is the executive deputy director of the State Key Laboratory of Information

Photonics and Optical Communications, member of the Discipline Appraisal Group of the Academic Degree Commission of the State Council, and recipient of the National Science Fund for Distinguished Young Scholars. His main teaching and research interests are broadband networks and lightwave technologies.

Jiawei ZHANG was born in 1984. He received his Ph.D. degree in information and communication engineering from the Beijing University of Posts and Telecommunications. He was also a joint supervised Ph.D. candidate at the University of California, Davis. He is currently a lecturer at the Beijing University of Posts and Telecommunications. He runs several projects for the National Nature Science foundation of

China, as well as several industry-academia-research cooperation projects. His current research interests are 5G optical transport networks and intelligent control plane technologies.