

面向下一代移动通信的前传网络关键技术



Key Technologies for Fronthaul Network in Next-Generation Mobile Communication

赵俊皓/ZHAO Junhao, 张俊文/ZHANG Junwen,
迟楠/CHI Nan

(复旦大学 电磁波信息科学教育部重点实验室, 中国 上海 200433)
(Key Laboratory of EMW Information (MoE), Fudan University, Shanghai
200433, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202305008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20231016.1012.010.html>

网络出版日期: 2023-10-17

收稿日期: 2023-08-08

摘要: 下一代宽带移动通信的容量相对5G通信提升百倍至千倍, 这对支撑其发展的前传光通信网络的物理基础提出了巨大的挑战。系统回顾和梳理了移动前传网络的需求、技术和实现架构等。以光纤无线融合接入为基础, 重点针对数字前传技术、模拟前传技术和数模结合前传技术3类移动前传架构, 围绕其网络架构、关键技术和未来发展方向进行了深入的分析和探讨, 并对未来前传网络关键技术进行展望。本研究可为未来移动前传网络的研究提供参考。

关键词: 前传网络; 接入网; 光载无线

Abstract: The next-generation broadband mobile communication is expected to increase capacity by hundreds to thousands of times compared with 5G communication, posing significant challenges to the physical foundation of the fronthaul optical communication network that supports its development. A systematic review of mobile fronthaul networks is provided, including their requirements, technologies, and implementation architectures. Furthermore, three types of mobile fronthaul architectures based on radio-over-fiber access are highlighted: digital fronthaul technology, analog fronthaul technology, and hybrid digital-analog fronthaul technology. Then the network architectures, key technologies, and future development directions are discussed, offering valuable insights and references for the research on the mobile fronthaul networks of future communication.

Keywords: fronthaul network; access network; radio-over-fiber

引用格式: 赵俊皓, 张俊文, 迟楠. 面向下一代移动通信的前传网络关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(5): 45-55. DOI: 10.12142/ZTETJ.202305008

Citation: ZHAO J H, ZHANG J W, CHI N. Key technologies for fronthaul network in next-generation mobile communication [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(5): 45-55. DOI: DOI: 10.121 42/ZTETJ.202305008

进入21世纪以来, 通信需求的爆炸性增长给宽带通信接入带来巨大考验, 也为新型高速通信技术的发展提供机遇。如图1(a)所示, 与5G相比, 下一代宽带移动通信在数据容量、网络覆盖范围、能源消耗、时延、可靠性以及网络连接密度方面提出新的需求^[1], 通信容量提升百倍至千倍, 这对支撑其发展的前传光通信网络的物理基础提出重大挑战。随着数据流量的指数级增长, 现有前传光网络带宽不能完全满足未来业务流量需求, 亟需物理层通信技术的变

革。当前, 以通用公共无线接口(CPRI)为主要接口标准的集中式无线接入网^[2]和云无线接入网是主流的前传网络。但由于存在低频谱效率和大数据速率需求, CPRI的可扩展性受到限制。如今, 移动前传网络的发展面临两大挑战: 一方面, 未来移动前传网络亟需寻求新的光前传网络实现架构, 实现大带宽、高速率、低时延的移动前传网络; 另一方面, 亟需开发新型前传数据调制、传输和解调实现方式, 压缩前传通信的带宽, 以进一步提高前传通信的传输效率。

对此, 业界展开了大量深入的研究。在网络架构实现方面, 相干技术的下沉为高速短距离光接入及光互连提供了机遇, 包括基于相干载波聚合技术的点到多点相干技术^[3], 以及基于相干的无源光网络^[4], 均有望提供巨大的前传通信网

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62171137、62235005、61925104);
上海市自然科学基金资助项目(21ZR1408700)

络带宽，这也为超高速的移动前传光网络提供了物理基础。另一方面，随着光纤无线电融合（RoF）技术的发展，新型前传数据调制、传输和解调成为可能。针对CPRI低效率的数据传输，压缩前传网络的数据量成为研究热点^[5]。有望替代CPRI的前传技术分支有：数字前传技术、模拟前传技术和数模结合前传技术等。其中，数字前传技术的研究热点聚焦于压缩数字信号数据，以获取更高频谱效率^[6]；模拟前传技术的研究热点在于如何更好地补偿模拟信号的非线性失真^[7]；数模结合前传技术则结合了数字信号的高保真度和模拟信号的高频谱效率的优点，实现了两者间较好的结合^[8]。而近年来，随着毫米波、太赫兹等无线通信技术的发展，业界也提出了光子毫米波、光子太赫兹承载的前传网络^[9-10]，以满足未来前传网络的大规模密集布站需求。

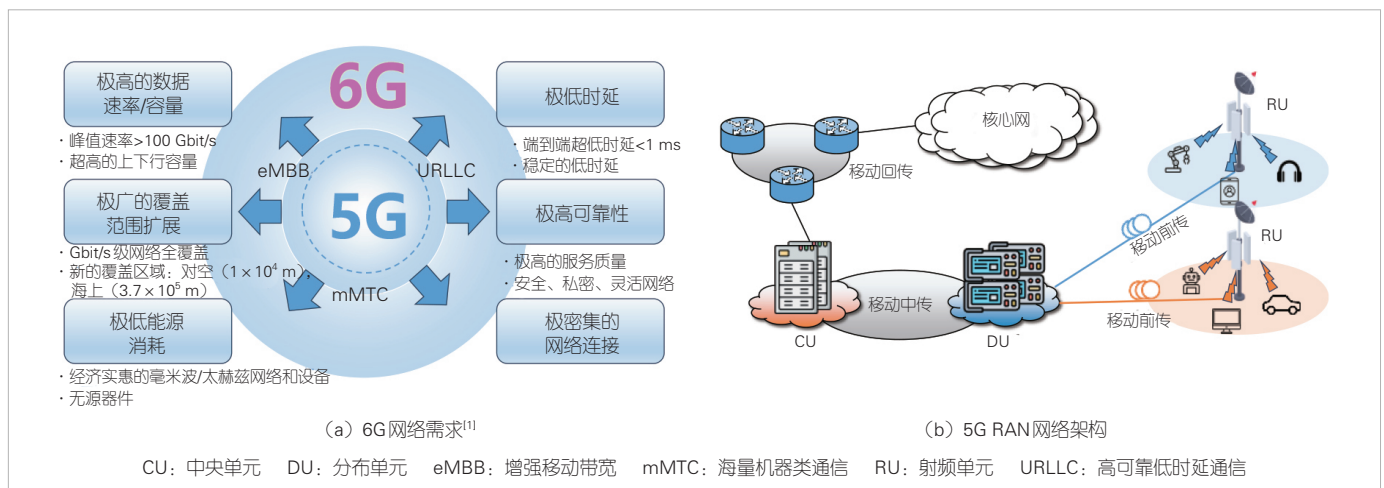
本文中，我们以未来前传网络的需求为导向，系统回顾和梳理了移动前传网络的需求、技术和实现架构等。此外，本文以光纤无线电融合接入为基础，重点针对数字前传技术、模拟前传技术和数模结合前传技术，围绕其网络架构、关键

技术和未来发展方向进行深入分析和探讨；进一步地，对未来前传光网络关键技术进行展望，为未来移动前传网络的研究提供参考。

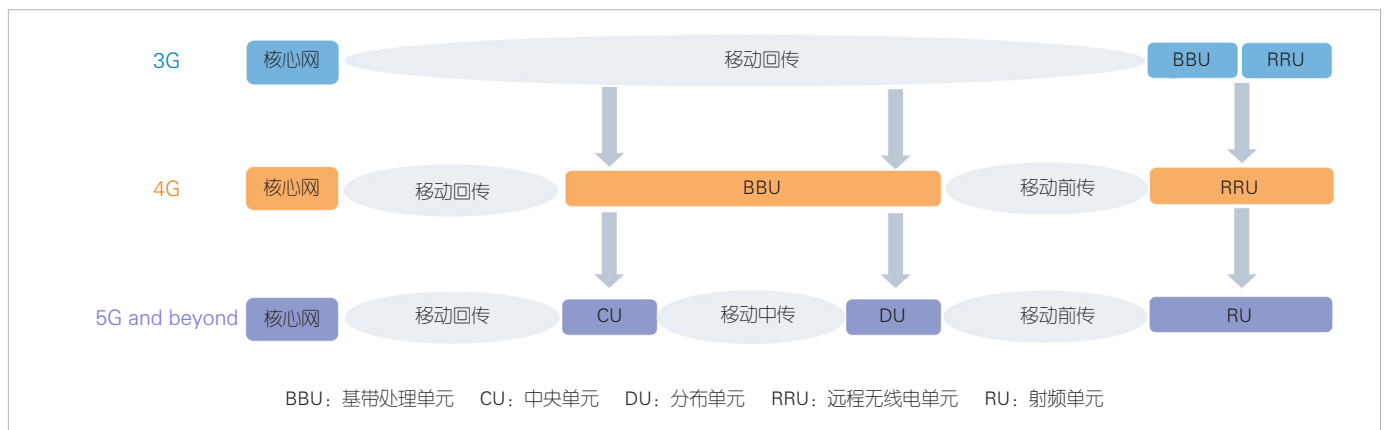
1 移动前传的发展

移动前传（MFH）是无线接入网功能划分的产物。5G乃至B5G的接入网架构如图1（b）所示。在接入网的发展中，随着接入网架构的变化，前传网络的功能定位也在随之改变。如图2所示，在3G接入网中，基带处理单元（BBU）和远程无线单元（RRU）作为一个整体，通过回传（Backhaul）网络与核心网连接；4G时代，BBU与RRU被拆分分开，它们之间的链接定义为前传（Fronthaul）网络，一般由光纤承载；5G时代后，接入网又被进一步拆分，BBU被拆分成了中央单元（CU）和分布单元（DU）。CU和DU之间形成了新的链路称为中传（Midhaul），而RRU也由于功能的增加演变成了射频单元（RU）。

为了实现更加有效的功能划分，第3代合作伙伴计划



▲图1 6G网络需求和5G RAN网络架构



▲图2 不同代际移动通信网络的前传网络架构

(3GPP)以网络层、数据链路层和物理层为基础提出了8种不同的功能划分选项,如图3所示。业内可根据实用需求,以不同功能划分为基础定义接入网。随着技术的发展和不同需求的增加,以功能划分为原则,形成了许多种不同结构的接入网,如分布式无线接入网、集中式无线接入网、云无线接入网和开放式无线接入网等。前传网络的功能定位也随之改变,形成了图2中3G、4G、5G乃至B5G的不同接入网架构。这种网络架构的演进既是网络功能的细化和功能分解的需要,也是系统对带宽、时延和处理能力的进一步优化。展望未来通信网络,前传网络将在5G的基础上,进一步提升传输带宽,降低时延,并展现高度的灵活性。

在前传网络之间的传输、连接和控制标准规范方面,业内根据不同实际需求在不同的功能区间制定了多种前传标准协议接口。4G前传标准接口是通用公共无线电接口(CPRI),由原始设备制造商联盟于2003年制定。CPRI通常应用于选项8,使用同步数据传输协议,其比特率取决于天线数量。对于一个多单元多天线系统,CPRI的比特率可由式(1)表示:

$$B_{CPRI} = S \cdot A \cdot f_s \cdot b_s \cdot 2 \cdot \left(\frac{16}{15}\right) \cdot LC, \tag{1}$$

其中, S 为单元数, A 为每个单元中的天线数量, f_s 表示采样率, b_s 表示每个样本的比特数(一般取15或8),参数2表示I和Q两路处理, 16/15表示多余的开销信息, LC为约束编码(一般取10/8或66/64,取决于CPRI网络比特率选项)。

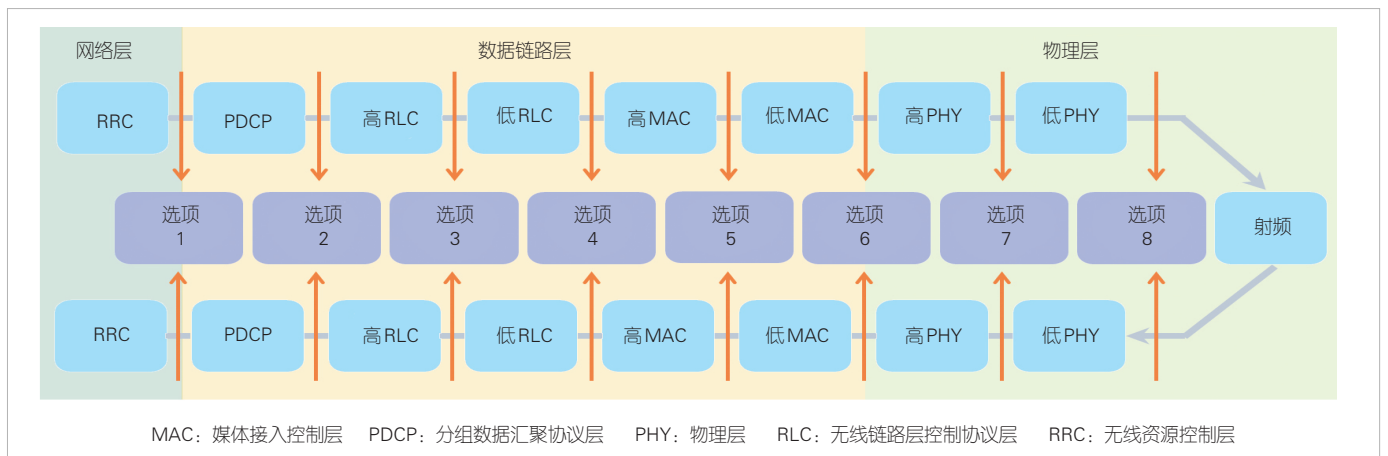
由式(1)可知,CPRI协议下的传输速率不会根据实际网络负载的变化而进行调整,这是产生CPRI低利用率的主要原因。4G前传网络主要采用CPRI协议,但由于5G网络速率需求大幅提升、天线数量成倍增加,CPRI难以满足5G高容量需求。4G网络中载波带宽一般为20 MHz,快速傅里叶

逆变换(IFFT)点数为2 048,子载波间隔为15 kHz,采样频率为30.72 MHz(2 048 × 15 kHz),采样位宽为30 bit(I/Q各15 bit)。根据式(1)可以算出每单元单天线所需CPRI速率为1.228 8 Gbit/s。如果采用8 × 8多输入多输出(MIMO),单条线路的CPRI速率需求就为9.830 4 Gbit/s(8 × 1.228 8 Gbit/s)。5G新空口定义载波带宽为100 MHz,IFFT点数为4 096,子载波间隔为30 kHz,采样频率为122.88 MHz(4 096 × 30 kHz),采样位宽为30 bit(I/Q各15 bit),可以算出每单元单天线所需CPRI速率为4.915 2 Gbit/s,而5G采用64TRx MIMO时,最终单条线路的CPRI速率需求为314.57 Gbit/s(=64 × 4.915 2 Gbit/s)。5G的CPRI速率需求较4G增长了几十倍。为此,3GPP TR 38.801、电气和电子工程师协会(IEEE)和国际电信联盟标准化部门(ITU-T)等组织制定了新的解决方案,例如将BBU的功能进行拆分,让部分功能下沉至RRU中,以降低接口之间的传输速率需求。

随着功能结构的拆分,新的接口协议也由此诞生。增强型通用公共无线电接口(eCPRI),是用于连接无线基站DU与RU的前传接口协议,以物理层功能内部拆分为基础。相比于CPRI,eCPRI在选项7内新增了选项7-1、7-2a、7-2和7-3,目的就是调制、映射、预编码以及循环前缀添加等数字信号处理(DSP)功能下沉到RU中,以此来减轻前传传输速率的压力,大幅提升前传网络的高效性和灵活性。新一代前传光网络正在如上的功能拆分的基础上,进一步创新前传光网络架构,发展物理层前传通信技术,满足未来前传的带宽、效率和灵活性需求。

2 相关工作

随着前传网络更深层次的覆盖与应用,业界对未来前传网络的发展趋势展开了一系列的研究。例如,文献[11]预测



▲图3 新一代移动前传网络的不同功能划分选项

未来前传网络会向着更加开放智能的方向发展，认为下一代移动通信可能会出现以用户为中心的网络架构，主要由人工智能和机器学习算法驱动，其网络端点可以根据用户操作习惯做出自主的网络决策。这种网络架构可以极大地减少用户端点与基站之间的通信开销。文献[12]对未来接入网以及前传网络发展趋势提出了3点看法：1) 未来接入网应该进一步虚拟化并且注重优化物理层管理与维护，以缓解多用户链路的端到端网络切片问题；2) 未来前传网络应更具有针对性，根据具体服务项目的需求分配专门的前传链路负责，以更好地满足用户的需求；3) 未来前传网络需要实现不同接口间的互操作性，这对搭建低运营成本、高传输效率的前传网络架构至关重要。文献[13]预测未来前传网络开放操作维护管理(OAM)接口将成为趋势，这能够做到对网络资源分配的实时监控，以实现网络资源的智能动态重构，从而满足网络切片之间共享资源的需求。在无线前传网络方面，文献[14]仿真研究了80 GHz高频段毫米波应用于无线前传的可能性，认为在经济性和实用性的考量下，未来无线前传网络可以部分替代光纤前传网络，提供稳定高速的传输链路。

下面本文将重点从新型前传光网络实现架构和光无线融合的新型前传光信号调制与传输技术两个方面，分析前传光网络的发展。

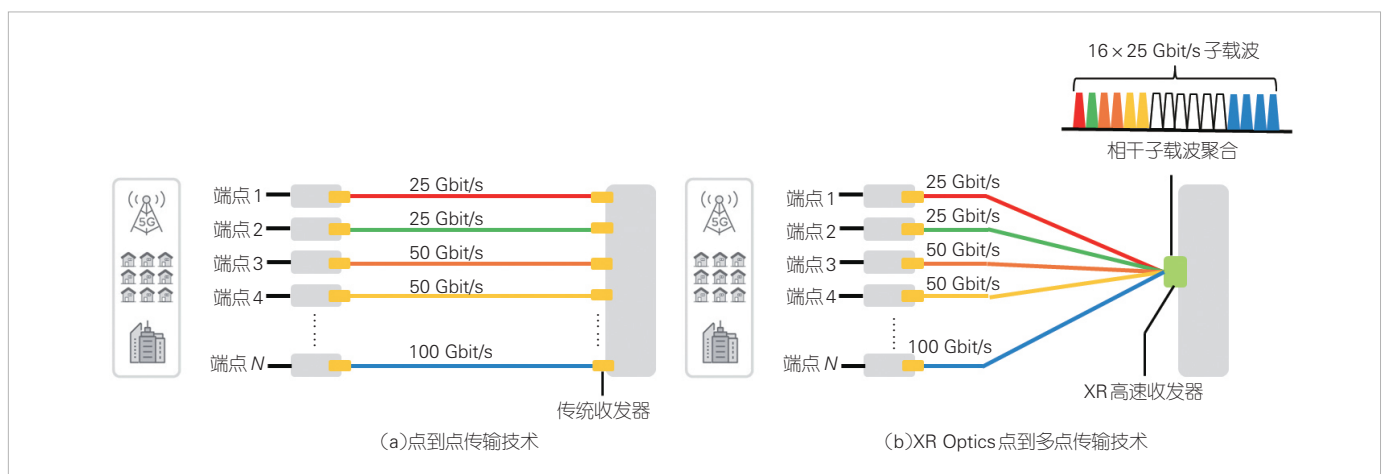
3 新型前传光网络实现架构

3.1 载波聚合的点到多点相干技术

前传光网络通常应用点对点(PtP)连接，如图4所示。点对点接口部署在许多网段中，市场规模巨大且有不断增长的趋势。在2020年的统计中，点对点接口占光组件总量的40%以上^[15]，可预计未来带宽25 GHz以上前传光接口

(CPRI或eCPRI)将占据主要市场。目前的5G前传通信大多基于点对点强度调制/直接检测(IM/DD)系统，采用专用光纤链路或波分复用(WDM)链路进行传输^[12]，每个RU通过单向或双向光纤直接与DU相连。该系统仅适用于光纤资源丰富的场景。考虑到基站建设愈加密集的趋势，部署大规模光纤的成本高昂，并且伴随B5G大规模MIMO的进一步部署，前传网络所需速率将变得前所未有的高。面对不断提升的速率要求，ITU-T目前已经提出了10 Gbit/s和25 Gbit/s的标准，50 Gbit/s的新标准正在准备中，IEEE的802.3标准也在不断完善中^[16]。但点对点IM/DD系统仍面临未来前传演进的巨大挑战。首先，IM/DD系统将遇到超过100 Gbit/s级别的容量瓶颈。随着波特率的提高，色散将从根本上限制IM/DD系统的性能。具体来说，IM/DD PAM4信号可传输的距离与波特率的平方成反比关系^[17]。对于一个波分复用IM/DD系统(每个通道200 Gbit/s)来说，其在o波段的传输范围被限制在大约2.5 km内(< 1 dB损失)^[18]。其次，灵活性是第二大限制。如图4(a)所示，在点对点架构中，每个终端会根据流量需求的峰值占用相应的资源，每个端点对应的链路都需要以相同的速度运行，导致整个网络成为一个极其低效的传输结构。实际过程中的实时流量可能会有所不同，点对点架构难以实现资源的有效分配而造成不必要的资源浪费。

面对这一问题，业内提出了基于相干载波聚合的点到多点相干技术。如Infinera在ECOC 2019上推出了XR Optics点到多点相干传输技术。如图4(b)所示，XR Optics利用数字信号处理技术将给定波长光谱的传输和接收细分为一系列称为相干数字子载波的频率通道，这些数字子载波可以独立地分配到不同的端点。这一技术实现了业界首个可扩展的点到多点和低速高速可相互转换的光模块连接。单个400G XR Optics集线器模块可生成16 × 25 Gbit/s数字子载波。



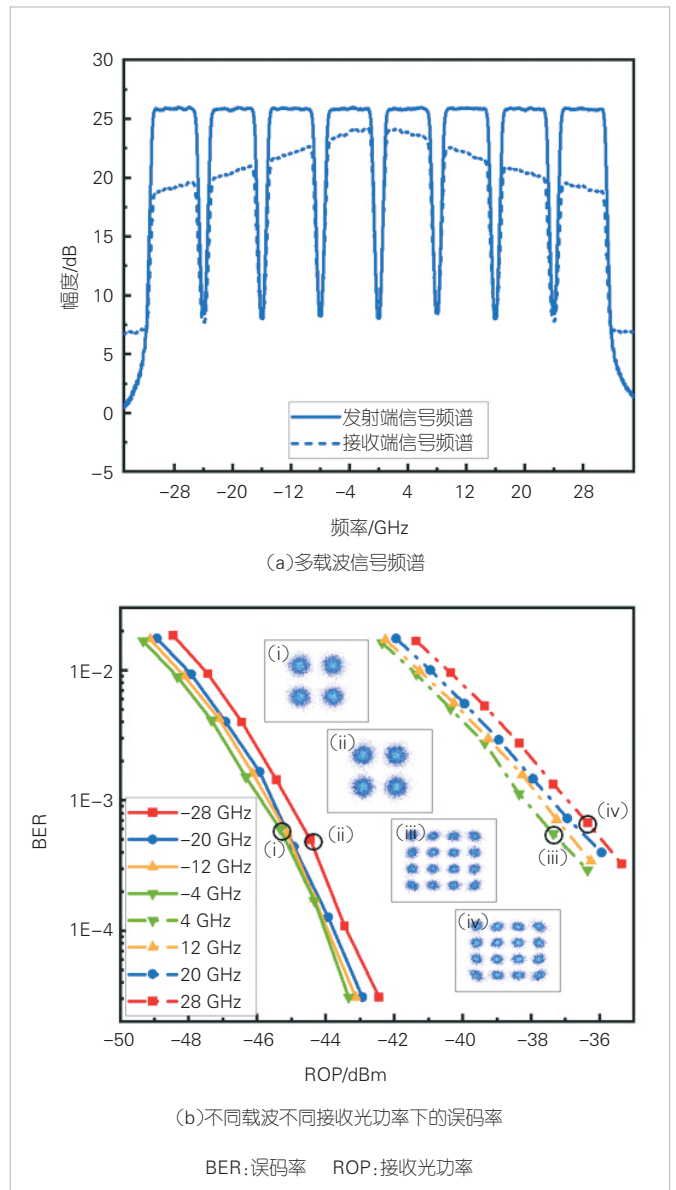
▲图4 点到点、点到多点传输技术

个或多个数字子载波可以组合并分配到特定的目的地，以提供需要的带宽。XR Optics 打破了传统点对点光学传输解决方案的局限性，引入了一种新型可插拔和支持软件的架构，从根本上降低了部署和运营光网络的成本。另外，XR Optics 器件提高了部署灵活性，相同的相干可插拔器件可以通过软件配置在点对点或点对多点系统中运行^[19]。这种方式支持灵活速率分配、灵活调制格式切换和点到多点的连接。如图 5 (a) 所示，我们仿真了基于相干数字子载波的载波聚合点到多点相干接入方案。这里，我们展示了 8 个数字子载波的相干收发，其中前 4 个子载波承载正交相移键控 (QPSK) 信号，后 4 个子载波承载 16-QAM 信号。图 5 (b) 表明，它们在较低接收光功率情况下也能满足 $1E-2$ 的误码率门限要求。这证明了相干子载波点到多点系统实际应用的可行性。

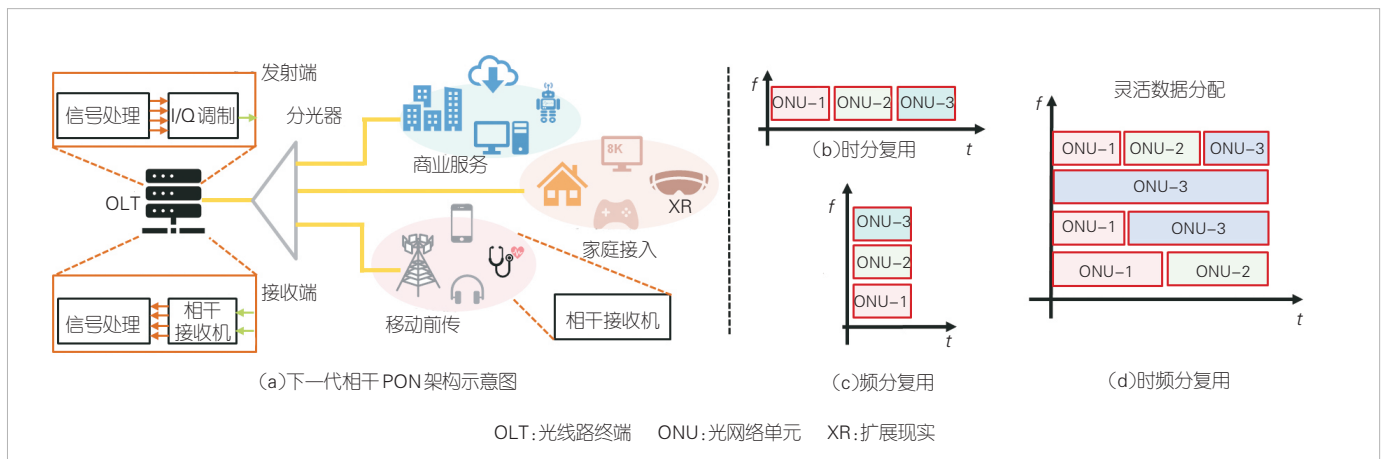
3.2 下一代相干无源光网络技术

未来移动通信、云计算、高清视频等高端业务的发展对前传光网络的传输速率提出了更高的要求。无源光网络 (PON) 技术是一种经济的小型密集部署的候选技术，大量应用在前传光网络中。在过去的几年中，IEEE 和 ITU-T 积极推进高速 PON 的标准化进程，可以推测未来 PON 系统将需要满足 100 Gbit/s、200 Gbit/s 甚至更高的传输速率需求。目前，IM/DD 技术是商用 PON 系统中的常用技术，部署简单，成本低；但是，由于灵敏度和功率预算受限，其很难满足未来高速传输的需求。相比而言，相干技术是适合下一代大容量 PON 系统的一项很有潜力的候选技术，其灵敏度高，可实现多维复用，结合先进数字信号处理 (DSP) 技术可以实现高速数据传输^[20-22]。

图 6 (a) 为下一代相干 PON 架构的示意图。光线路终



▲图 5 基于相干数字子载波的载波聚合点到多点仿真结果



▲图 6 下一代相干无源光网络架构及其复用方式

端的信号经过无源节点分配给不同的用户，提供商业服务、住宅接入或者移动前传等服务。在光线路终端的发射端，原始信号经过发端信号处理后被调制在 I/Q 调制器上，可实现信号的多维调制；在光线路终端的接收端，信号在集成相干接收机中进行探测，本地振荡信号的引入可以提高系统的接收灵敏度，探测得到的信号进行后续的信号处理。相应地，在光用户单元中也部署了相干收发机，从而构成了相干 PON 系统。在相干 PON 系统中常用的 3 种复用方式包括：时分复用 (TDM)、频分复用 (FDM) 和时分频分复用 (TFDM) 技术，如图 6 (b) - (d) 所示。在 TDM 技术中，信号通过不同的时隙传输给不同的用户，可提高大带宽接入；在 FDM 技术中，信号被调制在不同的频率上，可提供低时延服务；TFDM 结合两者的优点，信号可以在时间和带宽上进行灵活分配，提供更大的自由度。

目前，高速相干 PON 系统的研究已经取得了很多的进展。文献[23-24]基于相干探测和 TDM 技术实现了单波 100G 信号传输。在相干 PON 系统中，突发接收是一个重要的挑战，其中包括突发放大和突发信号处理。文献[25]研究了基于本振功率调整的突发放大技术，该技术可以有效提升突发相干 PON 系统的接收动态范围，实现了单波 200G 信号传输。文献[26]提出了一种基于有效前导的突发 DSP 技术，可以实现算法的快速收敛，并且在单波 100G 的 TDM-PON 系统中进行了验证。同时，相干 PON 系统的灵活性是一个值得关注的特性。用户端相对于光线路终端的距离是不一样的，导致用户端的接收光功率不一样。距离近的用户具有更高的功率来满足更高速率的传输，因此通过灵活的编码整形调制技术，可以进一步提高系统传输的容量，实现速率的灵活分配。文献[27]首次提出并演示了一种新颖的三维柔性相干 PON (3D FLCS-CPON)。该技术具有在时域、频域和功率域内的资源分配能力，在 20 km 光纤上实现了 $250 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\lambda^{-1}$ 的峰值数据速率^[27]。文献[28]首次提出了基于概率整形技术的新一代灵活相干接入网框架，并结合本振光 (LO) 动态调控技术

实现了最高 300G 的高速光传输和 $7\ 104 \text{ dB}\cdot\text{Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的动态范围与净速率积 (DRNRP)；基于灵活的调制格式切换，可以实现最高 300 Gbit/s 的速率传输^[29]。TFDM 技术的研究也取得了很多的进展，例如：文献[30-31]利用数字子载波复用技术，在 4 个子通道中实现了 100 Gbit/s 的数据传输；文献[32]基于简化相干技术实现了实时 TFDM-PON 系统验证，上下行支持 100 Gbit/s 和 200 Gbit/s 的峰值速率传输。可以看出，相干 PON 系统能够实现高传输速率。灵活的速率调节与带宽分配，是未来高速率、低成本与低时延移动前传网络的支撑。

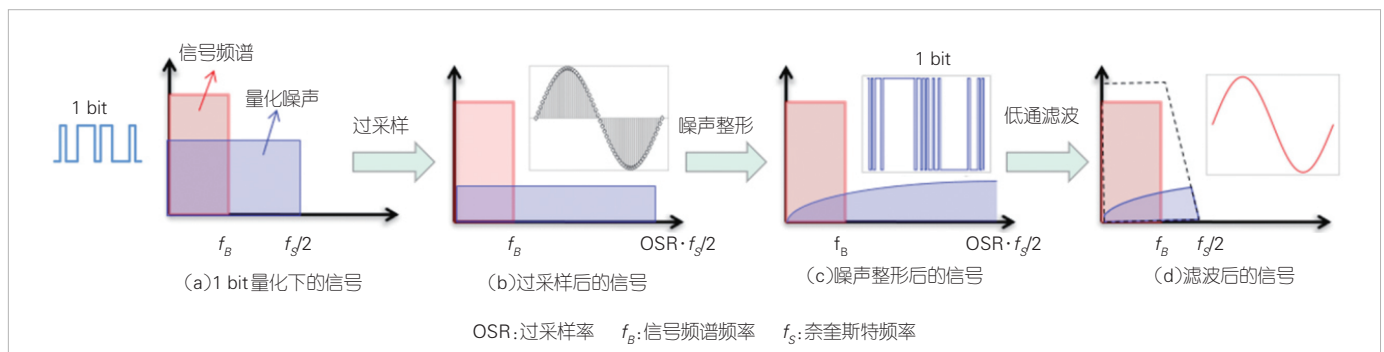
4 新型前传光信号调制与传输技术

相较于 CPRI 的数字前传接口，光载无线 (RoF) 融合传输技术具有带宽大、效率高和时延低等优点，在前传网络中具有广阔的应用前景。基于 RoF 技术，业内发展了多种新型前传光信号调制和传输技术。根据实现方式的不同，这些技术主要分为以下几类：数字前传技术、模拟前传技术和数模结合前传技术。

4.1 数字前传技术

数字前传技术拥有成熟、传输可靠、易于标准化等特点，CPRI、eCPRI 等标准已经落地多年，拥有现成的设备。数字光纤无线电 (D-RoF) 目前大多部署在基于 CPRI 或 eCPRI 标准的前传链路上。数字信号传输受光纤色散、非线性等影响小，均衡手段丰富，美中不足的是数字信号面临带宽效率低、可扩展性有限和接收端设备复杂度高问题。近年来，业界对数字信号前传的研究主要集中于提高信号信噪比，这不仅可满足高阶 QAM 需求从而增加每符号携带的比特数，还有利于实现高波特率信号的传输。

Delta-Sigma 调制技术在数字前传领域的研究引人注目^[33]。如图 7 所示，Delta-Sigma 调制技术可以将模拟信号量化成 1 bit 或者 2 bit 数字信号，该技术通过过采样和噪声整形



▲图 7 Delta-Sigma 调制技术对信号的处理过程

形操作有效地降低量化噪声，并且通过模拟滤波器就可恢复出模拟信号，不需要额外的数模转换器（DAC）设备。在最新的研究中，上海大学提出将Delta-Sigma调制与自零相干接收机结合，可以做到2.5 GBaud 4194304-QAM的相干光纤系统传输^[33]。华中科技大学提出将分层调制技术与Delta-Sigma技术相结合，在不占用额外频谱资源的情况下使访问容量增大一倍，并且可以根据需求灵活分配接收端设备的信噪比^[34]。同时，他们还提出了两层Delta-Sigma调制的方法，相较于一般Delta-Sigma调制在IM/DD系统中有15.9 dB的信噪比提升^[35]。另外，复旦大学提出了概率整形（PS）与Delta-Sigma结合技术，实现了28.1 Gbit/s PS-131072-QAM的信号传输，进一步扩展了Delta-Sigma调制技术的适用性^[36]。从经济性方面考虑，在发射端，传统数模转换器（ADC）需要使用模拟低通滤波器来减少高于奈奎斯特频率的成分，这些滤波器需要具备严格的性能要求，难以设计和制造，并且成本高。Delta-Sigma ADC采用过采样的方法，可以减轻对模拟抗混叠滤波器的要求。过采样使得输入信号的频谱在频域中被分离开来，允许使用更宽带宽、更缓慢截止特性的滤波器，降低了滤波器设计的难度。在接收端，Delta-Sigma信号只需要通过模拟滤波器就可以完成数模转换，进一步简化了RU结构。

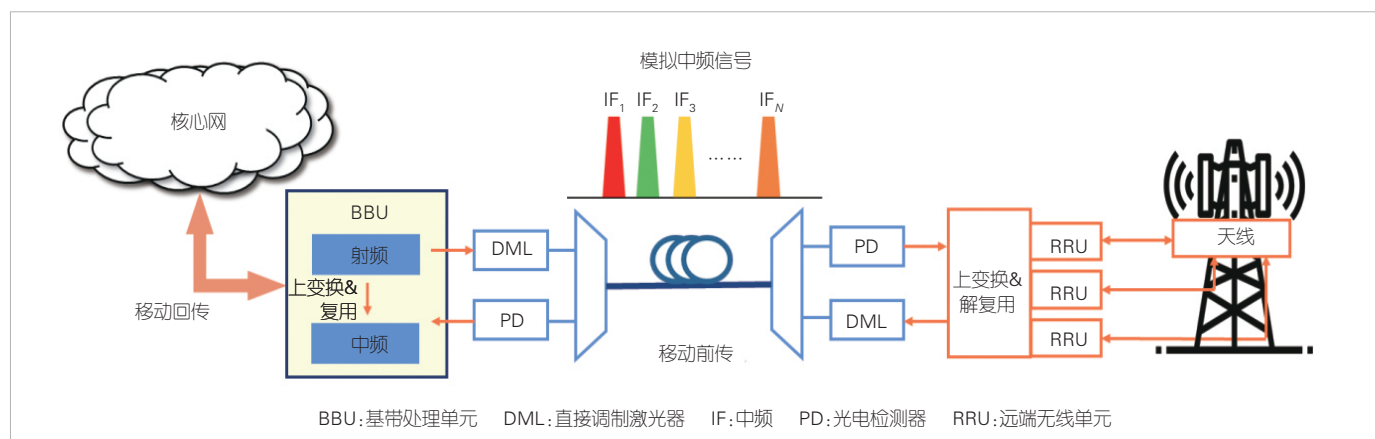
4.2 模拟前传技术

模拟前传技术直接将无线信号调制到光载波上，较于数字前传技术能够极大地提高信号频谱效率，并有望实现超低时延的前传接入。另外，模拟前传技术还拥有基础设施简单和成本低的特点，可以在很大程度上简化RU设备。这些特点对部署大量密集的小型单元天线站点至关重要。然而，模拟信号过程中容易出现信号失真，从而影响前传网络的性

能。但该方案仍是移动前传领域的有力竞争者，近年来得到了广泛的研究。

在信号处理过程中使用数字信号处理手段可以实现模拟信号的均衡，但常规的数字信号处理手段难以取得较好的效果，因此，关于模拟前传技术的研究大多集中于模拟信号的均衡方法。最新的研究中，业内分别尝试了使用神经网络数字预失真算法^[37]和支持向量机（SVM）^[38]来均衡模拟信号。奥尔堡大学提出了一种基于机器学习（ML）的数字预失真（DPD）解决方案^[39]，提出的支持向量回归（SVR）方法可以有效地缓解非线性，提高模拟信号信噪比，与未应用DPD方法相比，SVR-DPD方案的矢量幅度误差（EVM）降低了6.9%。与基于机器学习方案相比，阿尔斯特大学提出了一种新的基于幅度选择仿射（MSA）的DPD方法^[40]，在规范分段线性（CPWL）模型的基础上，通过引入MSA函数，减少乘法运算的次数，降低模型的复杂性。除了均衡手段外，还有人提出了将IFFT前的频域采样技术和IFFT后的时域采样技术相结合的模拟子载波复用技术，该技术可在一定采样率内灵活地复用和解复用^[41]。

此外，A-RoF波分复用技术中频光纤无线电（IFoF）也是A-RoF领域的研究热点之一，如图8所示。中频是指略低于射频的载波频率。比起RoF，IFoF有着更灵活的带宽分配优势，产生的较低频的信号光纤色散影响较小。但这一技术需要在RU中加入射频中频的变频器，这会增加RU的复杂度。关于IFoF技术，早在2017年，文献[42]就成功验证了在基于IFoF的移动前传技术下实现5G移动通信传输的可能性，例如：在进行4K视频流信号的实时传输时，每位用户的峰值数据速率高达1.5 Gbit/s，这符合IMT-2020关于5G愿景的要求^[42]。日本凯迪迪爱研究所（KDDI）使用并行强度调制/相位调制发射机在20 km单模光纤上传输了14 × 1.2 GHz



▲图8 模拟中频光纤无线电系统

OFDM 信号，实现了 CPRI 等效数据速率 1.032 Tbit/s^[43]。并行 IM/PM 发射机在面对不同的调制信号频率时，会根据光纤色散零频率来选择信号应该进行 IM 调制还是 PM 调制，从而有效避免光纤色散带来的影响，这为模拟信号的光纤传输提供了很好的解决方案。

4.3 数模结合前传技术

为了结合频谱高效的 A-RoF 和高保真 D-RoF 的优点，业界也对数模结合 RoF (DA-RoF) 进行了研究。2021 年，Futurewei Technologies 提出了一种类似概率整形的数模信号结合方案^[8]，如图 9 所示。该算法通过将信号与数字放大倍数 a 相乘后四舍五入将信号量化，之后用原信号与量化后的信号相减得到的模拟信号，模拟信号可以与模拟放大倍数 b 相乘，之后两段信号时分复用作为发射信号。这种方法通过补偿量化噪声来实现较高信噪比。对于数字信号部分，数字放大倍数决定了量化信号的阶数。阶数越高，量化噪声越小，但相应受到的信道噪声就越大。对于模拟信号部分，适当放大信号幅值有利于增强模拟信号部分的抗噪能力，但如果幅值过大，信号就会受到峰值平均功率比过大的影响，从而影响信号质量。对此，我们测试了在 IM/DD BiB 系统下传输 20 Gbaud 1024-QAM OFDM 信号时，不同数字放大倍数和模拟放大倍数情况下的信噪比。结果表明，信号在数字放大倍数 $a=4.5$ 和模拟放大倍数 $b=1.5$ 时信噪比最高可达 35.5 dB。上海交通大学在这一算法的基础上，通过对信号多次四舍五入数字化操作，对 3.2 GHz 1048576-QAM 的高阶调制信号进行 20 km 单模光纤传输，使接收信号具有高达 70.8 dB 的信

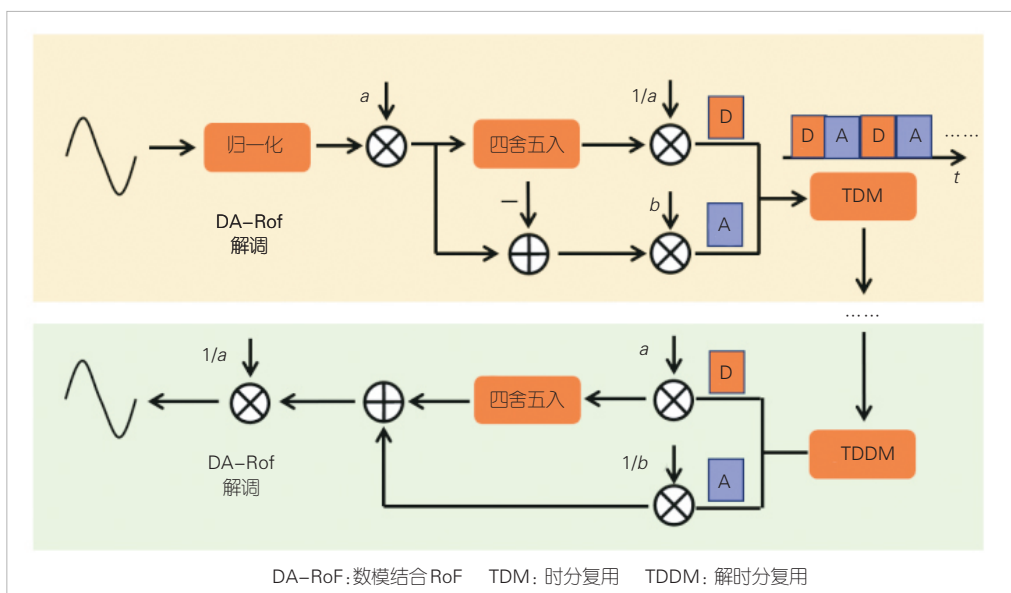
噪比^[44]。在相干检测中，传统频偏和相偏估计算法只针对有限个星座点信号进行跟踪，难以对模拟部分信号进行恢复。为解决这一问题，清华大学和上海交通大学利用光频梳谱线拥有间隔相等且稳定的特点，仅通过两条或三条旁频就可以异地再生一组相同的光频梳，同时接收端将克隆的光频梳作为本振光，在 WDM 的同时有效地解决 DA-RoF 模拟部分的频偏、相偏问题。该方法同时支持 14.1 Tbit/s 公共无线电接口等效数据速率和 1024-QAM，有助于实现基于光纤和自由空间的光前传，从而实现全频段的相干光接入网^[45]。在工程可行性方面，这种算法在调制解调每个符号时只需要线性地增加 22 次数字运算，就可以获得指数级信噪比的增长。每增加一倍带宽就可以获得接近 10 dB 的信噪比增益。该算法在未来低功耗、低时延网络中具有巨大的应用价值。

5 展望

尽管移动前传光网络在网络架构和具体信号调制与传输方面取得了一定的进展，但未来前传网络还存在一定的挑战。毫米波、太赫兹等新频谱通信的发展，深刻影响了前传网络的具体形式。此外，超低时延和超高灵活性等新需求也将促进未来前传网络的进一步发展。本文中，我们将从以下几个方面展望未来前传光网络：

1) 新型毫米波、太赫兹光无线基带前传与无缝融合技术。下一代移动通信的宏大发展愿景，离不开通信载体特别是物理层的深刻变革。针对 6G 超宽带、超低时延和极致覆盖的需求，新的频谱资源特别是太赫兹频段 (0.1~10 THz) 的通信技术，成为最受关注的 6G 核心技术之一，引起了全

球业界和学术研究机构的高度关注。太赫兹波段介于光和微波之间，以其丰富的频谱资源和独有特性，获得了 ITU 的大力支持，成为极具潜力的 6G 关键候选频谱技术。太赫兹通信具有极为丰富的应用场景，是实现超高速移动无线通信的关键技术，具有重要的战略和经济价值，成为全球科技竞争的制高点。然而，太赫兹波段频率高、带宽大，对相关器件的带宽、频率和工作效率方面提出了重大的挑战。此外，下一代移动通信网络



▲图 9 数模信号结合方案

对整体功耗的要求进一步加强，传统射频微波电子器件难以满足要求。纯电链路的太赫兹通信系统存在相噪恶化和杂波干扰的问题。光生太赫兹及光子太赫兹混频融合的系统不仅能有效克服这一问题，还具有带宽大、上下变频信号纯净和调控灵活的优点。因此，一种集成光纤传输，光子毫米波太赫兹产生、调制和传输的光无线融合架构具有重要的优势。如图 10 所示，光子毫米波、光子太赫兹通信系统可以作为基于光纤接入网的无线接入中继和扩展，为用户提供无缝的“最后一公里”连接。CU 实现下行信号的光调制和上行信号的相干探测，利用光纤网络实现基带信号前传的上下行通信。在远端的基站实现信号的上下变频。光子辅助的毫米波太赫兹信号产生和探测可通过宽带光电转化和电光转化完成。这种光无线无缝融合的架构能够实现宽带光信号的基带前传功能，具有高度集成、无缝融合和高度灵活的特点。

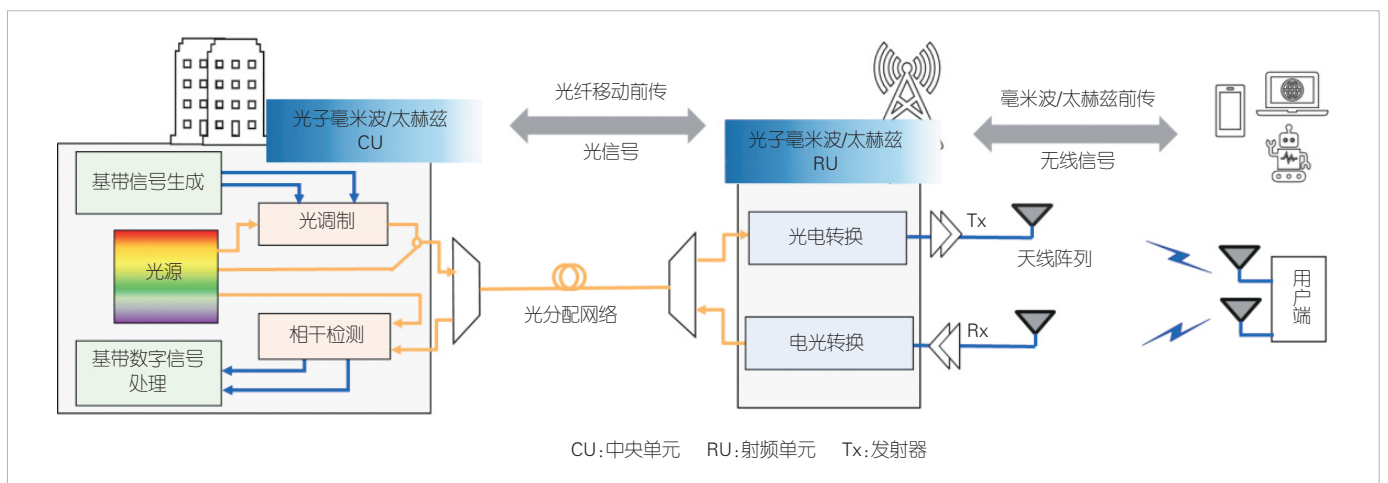
2) 超低时延、超高速和超高灵活性前传网络技术。未来 6G 网络将实现真实物理世界和虚拟数字世界的深度融合，面对沉浸式云扩展现实 (XR)、全息通信、感官互联等新技术，前传光网络将承载比今天多数十倍乃至百倍的数据容量。对于实现低时延高速前传网络，一方面，少 DSP 甚至无 DSP 前传通信技术对降低时延具有重要的意义；另一方面，先进的 DSP 算法可以进一步提高信号的信噪比，实现超高阶信号调制，从而提高传输速率。然而，过于复杂的 DSP 手段必然会导致时延的上升。性能和时延之间的权衡也是未来前传网络面临的问题之一。对于实现超高灵活性网络，一方面，现今不同设备商的光通信设备仍无法做到统一的接口，运营商只能采用单一设备商的产品来部署光网络，因此未来前传光网络需要灵活、可互操作、即插即用的前传光器件，

以降低成本、提高性能和灵敏度；另一方面，未来前传光网络需要高效精准的资源分配机制，这是因为当前固定带宽分配的前传网络分配机制容易带来资源浪费、成本提高以及延迟过高等诸多问题^[46]。为了解决这一问题，可进一步研究无线接入网的虚拟化，将深度学习、人工智能等先进算法用于资源分配，建立以流量为导向的频谱资源分配机制；此外，也可以调整前传网络架构，建立基站与 RU 间的灵活映射关系，同时开启 RU 之间的数据共享，开发协作多点 (CoMP) 的前传技术等。

3) 天地一体化异构前传网络。未来前传网络将进一步扩展网络覆盖的广度与深度。光纤网络、毫米波、太赫兹等陆基网络和以低轨卫星通信网络为代表的非陆基网络，将在未来走向融合。未来，随着卫星互联网、高速手机直连、天空地一体化的发展，天基低轨卫星通信网将成为地面有线和无线通信网络之外的新一代接入网，承载越来越多的无线互联网流量，与地面移动通信网络互为补充，共同构建覆盖全球天地一体化的无线接入网络。如何实现和应用天地一体化异构前传网络，成为一个重要的课题。一方面，多种网络形态对前传网络提出了重要的挑战，单一前传技术难以满足异构网络的不同物理传输链路需求；另一方面，天地一体化亟需高效的网络间协同技术，通过优化网络间的协同工作和切换策略，可以得到更高的数据容量和更低的传输时延，这对前传网络的融合性提出了更高的要求。

6 结束语

未来下一代移动通信高速率低时延的应用需求与日俱增，这对移动前传光网络提出巨大挑战。本文系统回顾了



▲图 10 毫米波/太赫兹移动前传网络

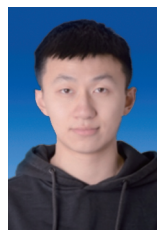
前传网络的发展,讨论了未来前传网络的接入方式和未来前传网络相干PON的应用需求,并以RoF技术为基础,调研了数字前传技术、模拟前传技术和数模结合前传技术3个方向的前传前沿技术。最后,我们给出了前传网络的未来发展方向。移动前传网络将是下一代移动通信网络实现高速率、低时延通信的关键一环。稳定、高效、无缝接入的前传光网络将为下一代移动通信的成功落地奠定重要基础。

参考文献

- [1] NTT DOCOMO. 5G evolution and 6G [EB/OL]. [2023-07-23]. https://www.nttdocomo.ne.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperEN_20200124.pdf
- [2] RANAWEEERA C, WONG E, NIRMALATHAS A, et al. 5G C-RAN with optical fronthaul: an analysis from a deployment perspective [J]. Journal of lightwave technology, 2018, 36(11): 2059-2068. DOI: 10.1109/JLT.2017.2782822
- [3] WELCH D, NAPOLI A, BÄCK J, et al. Point-to-multipoint optical networks using coherent digital subcarriers [J]. Journal of lightwave technology, 2021, 39(16): 5232-5247. DOI: 10.1109/JLT.2021.3097163
- [4] ZHANG J W, JIA Z S. Coherent passive optical networks for 100 G/λ-and-beyond fiber access: recent progress and outlook [J]. IEEE network, 2022, 36(2): 116-123. DOI: 10.1109/MNET.005.2100604
- [5] LAGÉN S, GIUPPONI L, HANSSON A, et al. Modulation compression in next generation RAN: air interface and fronthaul trade-offs [J]. IEEE communications magazine, 2021, 59(1): 89-95. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000453
- [6] XU M, LU F, WANG J, et al. Key technologies for next-generation digital RoF mobile fronthaul with statistical data compression and multiband modulation [J]. Journal of lightwave technology, 2017, 35(17): 3671-3679. DOI: 10.1109/JLT.2017.2715003
- [7] LIU S M, ALFADHLI Y M, SHEN S Y, et al. A novel ANN equalizer to mitigate nonlinear interference in analog-RoF mobile fronthaul [J]. IEEE photonics technology letters, 2018, 30(19): 1675-1678. DOI: 10.1109/LPT.2018.2865529
- [8] LIU X. Hybrid digital-analog radio-over-fiber (DA-RoF) modulation and demodulation achieving a SNR gain over analog RoF of >10 dB at halved spectral efficiency [EB/OL]. [2023-07-23]. <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2021-Tu5D.4>
- [9] HASABELNABY M A, SELMY H A I, DESSOUKY M I. Joint optimal transceiver placement and resource allocation schemes for redirected cooperative hybrid FSO/mmW 5G fronthaul networks [J]. Journal of optical communications and networking, 2018, 10(12): 975-990
- [10] ZHANG L, CHEN Z F, ZHANG H Q, et al. Hybrid fiber - THz fronthaul supporting up to 16384-QAM-OFDM with the delta-sigma modulation [J]. Optics letters, 2022, 47(17): 4307. DOI: 10.1364/ol.466080
- [11] RANAWEEERA C, KUA J, DIAS I, et al. 4G to 6G: disruptions and drivers for optical access [J]. Journal of optical communications and networking, 2022, 14(2): A143-A153. DOI: 10.1364/JOCN.440798
- [12] SALIOU F, CHANCLOU P, NETO L A, et al. Optical access network interfaces for 5G and beyond [J]. Journal of optical communications and networking, 2021, 13(8): D32-D42
- [13] LARRABEITI D, CONTRERAS L M, OTERO G, et al. Toward end-to-end latency management of 5G network slicing and fronthaul traffic (Invited paper) [J]. Optical fiber technology, 2023, 76: 103220. DOI: 10.1016/j.yofte.2022.103220
- [14] JIANG M L, CEZANNE J, SAMPATH A, et al. Wireless fronthaul for 5G and future radio access networks: challenges and enabling technologies [J]. IEEE wireless communications, 2022, 29(2): 108-114. DOI: 10.1109/MWC.003.2100482
- [15] DAS S, RUFFINI M. PON virtualisation with EAST-WEST communications for low-latency converged multi-access edge computing (MEC) [EB/OL]. [2023-7-30]. <https://arxiv.org/abs/2004.06138.pdf>
- [16] SALIOU F, NETO L A, SIMON G, et al. 5G & optics in 2020 - where are we now? what did we learn? [EB/OL]. [2023-07-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9333337>
- [17] XIE C J, CHENG J C. Coherent optics for data center networks [C]// Proceedings of 2020 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series (SUM). IEEE, 2020: 1-2. DOI: 10.1109/SUM48678.2020.9161052
- [18] KUMAR S, PAPAN G, SCHMIDTKE K, et al. Intra-data center interconnects, networking, and architectures [C]//Optical Fiber Telecommunications VII. Elsevier, 2020: 627-672
- [19] Infinera. Innovation details: XR optics [EB/OL]. [2023-07-23]. <https://www.infinera.com/innovation/xr-optics>
- [20] FARUK M S, LI X, NESSET D, et al. Coherent passive optical networks: why, when, and how [J]. IEEE communications magazine, 2021, 59(12): 112-117. DOI: 10.1109/MCOM.010.2100503
- [21] ZHANG J W, JIA Z S. Coherent passive optical networks for 100 G/λ-and-beyond fiber access: recent progress and outlook [J]. IEEE network, 2022, 36(2): 116-123. DOI: 10.1109/MNET.005.2100604
- [22] CAMPOS L A, JIA Z S, ZHANG H P, et al. Coherent optics for access from P2P to P2MP [J]. Journal of optical communications and networking, 2023, 15(3): A114-A123
- [23] ZHU Y X, YI L L, YANG B, et al. Comparative study of cost-effective coherent and direct detection schemes for 100 Gb/s/λ PON [J]. Journal of optical communications and networking, 2020, 12(9): D36. DOI: 10.1364/jocn.390911
- [24] KOMA R, FUJIWARA M, KANI J I, et al. Burst-mode digital signal processing that pre-calculates FIR filter coefficients for digital coherent PON upstream [J]. Journal of optical communications and networking, 2018, 10(5): 461-470
- [25] LI G Q, XING S Z, JIA J L, et al. Local oscillator power adjustment-based adaptive amplification for coherent TDM-PON with wide dynamic range [J]. Journal of lightwave technology, 2023, 41(4): 1240-1249. DOI: 10.1109/JLT.2022.3216763
- [26] ZHANG J W, JIA Z S, XU M, et al. Efficient preamble design and digital signal processing in upstream burst-mode detection of 100G TDM coherent-PON [J]. Journal of optical communications and networking, 2021, 13(2): A135-A143
- [27] SHEN W W, XING S Z, LI G Q, et al. Demonstration of beyond 100G three-dimensional flexible coherent PON in downstream with time, frequency and power resource allocation capability [C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2023. Optica Publishing Group, 2023: 1-3. DOI: 10.1364/ofc.2023.w1i.5
- [28] XING S Z, LI G Q, SUN A L, et al. Demonstration of PS-QAM based flexible coherent PON in burst-mode with 300G peak rate and ultra-wide dynamic range [J]. Journal of lightwave technology, 2023, 41(4): 1230-1239. DOI: 10.1109/JLT.2022.3208575
- [29] LI G, YAN A, XING S, et al. Pilot-aided continuous digital signal processing for multi-format flexible coherent TDM-PON in downstream [C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2023: 1-3
- [30] ZHANG J, JIA Z, ZHANG H, et al. Rate-flexible single-wavelength TFDM 100G coherent PON based on digital subcarrier multiplexing technology [EB/OL]. [2023-07-23]. <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2020-W1E.5>
- [31] XU M, JIA Z S, ZHANG H P, et al. Intelligent burst receiving control in 100G coherent PON with 4 × 25G TFDM upstream transmission [C]// Proceedings of 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2022: 1-3
- [32] WANG H D, ZHOU J, XING S P, et al. Fast-convergence digital signal processing for coherent PON using digital SCM [J]. Journal of lightwave technology, 2023, 41(14): 4635-4643. DOI: 10.1109/JLT.2023.3243828
- [33] LUO S Y, LI Z X, FAN C, et al. Digital mobile fronthaul based on delta-sigma modulation employing a simple self-coherent receiver [J]. Optics express, 2022, 30(17): 30684. DOI: 10.1364/oe.459976
- [34] ZOU Y, ZHONG L S, ZHANG S M, et al. A hierarchical modulation enabled SNR allocable delta-sigma digital mobile fronthaul system [J]. IEEE photonics journal, 2021, 14(1): 1-6. DOI: 10.1109/JPHOT.2021.3135148

- [35] ZHONG L S, ZOU Y, ZHANG S M, et al. Experimental demonstration of delta-sigma modulation supported 65536-QAM OFDM transmission for fronthaul/WiFi applications [C]//Proceedings of 2021 European Conference on Optical Communication (ECOC). IEEE, 2021: 1-3. DOI: 10.1109/ECOC52684.2021.9606072
- [36] ZHAO L, XU S C, WANG M X, et al. Probabilistic shaping-based delta sigma modulation [J]. Optics letters, 2023, 48(6): 1450-1453
- [37] HADI M U, MURTAZA G. Enhancing distributed feedback-standard single mode fiber-radio over fiber links performance by neural network digital predistortion [J]. Microwave and optical technology letters, 2021, 63(5): 1558-1565. DOI: 10.1002/mop.32774
- [38] HADI M U. Mitigation of nonlinearities in analog radio over fiber links using machine learning approach [J]. ICT express, 2021, 7(2): 253-258. DOI: 10.1016/j.icte.2020.11.002
- [39] HADI M U, BASIT A. Machine learning for performance enhancement in fronthaul links for IOT applications [C]//Proceedings of 2021 International Conference on Digital Futures and Transformative Technologies (ICoDT2). IEEE, 2021: 1-5. DOI: 10.1109/ICoDT252288.2021.9441542
- [40] HADI M U, SOIN N, KAUSAR S. Enhancing 5G multi-band long haul optical fronthaul links performance by magnitude-selective affine digital predistortion method [J]. Microwave and optical technology letters, 2022, 64(4): 827-834. DOI: 10.1002/mop.33169
- [41] ASSIMAKOPOULOS P, NOOR S, WANG M Q, et al. Flexible and efficient DSP-assisted subcarrier multiplexing for an analog mobile fronthaul [J]. IEEE photonics technology letters, 2021, 33(5): 267-270. DOI: 10.1109/LPT.2021.3056511
- [42] SUNG M, CHO S H, KIM J, et al. Demonstration of IFoF-based mobile fronthaul in 5G prototype with 28-GHz millimeter wave [J]. Journal of lightwave technology, 2018, 36(2): 601-609. DOI: 10.1109/JLT.2017.2763156
- [43] ISHIMURA S, BEKKALI A, TANAKA K, et al. 1.032-Tb/s CPRI-equivalent rate IF-over-fiber transmission using a parallel IM/PM transmitter for high-capacity mobile fronthaul links [J]. Journal of lightwave technology, 2018, 36(8): 1478-1484. DOI: 10.1109/JLT.2017.2787151
- [44] ZHU Y, ZHUGE Q, HU W. Efficient SNR scaling at >10 dB per extra bandwidth using cascaded hybrid digital-analog radio-over-fiber for fronthaul [C]//2022 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC). IEEE, 2022: 1-3
- [45] ZHANG C, ZHU Y, HE B, et al. Clone-comb-enabled high-capacity digital-analogue fronthaul with high-order modulation formats [EB/OL]. (2023-08-31) [2023-09-05]. <https://www.nature.com/articles/s41566-023-01273-2>.
- [46] ZHANG J W, JI Y F. 5G optical fronthaul: key issues, features and goals [J]. Scientia sinica informationis, 2017, 47(10): 1435-1442. DOI: 10.1360/n112017-00136

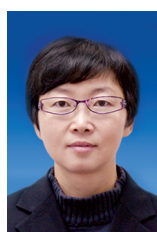
作者简介



赵俊皓，复旦大学在读硕士研究生；主要从事6G高速光接入网和光子无线融合的研究工作，包括超高速光通信算法与系统、智能光子信号处理与机器学习智能光网络等。



张俊文，复旦大学通信科学与工程系研究员、马可尼青年学者、国家特聘青年专家、上海市特聘专家、OFC 2022 N4 SC主席、2018年美国光学学会数字系统光学技术组主席、2019年IEEE SUM会议接入网分会主席，连续多年担任OFC、SPIE-PW等国际大会技术委员，并担任《IEEE Photonics Journal》《Frontiers in Communications and Networks》副编辑；长期从事高速光传输、光无线融合和光接入网的研究，在下一代高速光传输、光接入以及无线融合方面取得突出成就；先后获得马可尼青年学者奖、第三届全国光学工程学会优秀博士论文提名奖、IEEE光子学会博士奖、王大珩光学奖等奖项；发表论文200余篇，出版英文专著1部，申请美国专利/PCT专利22项、中国专利1项。



迟楠，复旦大学教授、信息科学与工程学院院长，教育部2006年度新世纪优秀人才，2007年度湖北省杰出青年基金获得者，2008年上海市曙光学者，日本大川情报基金获得者，2009年上海市浦江人才，2019年国家杰出青年科学基金获得者，美国光学学会OSA Fellow，中国电子学会女科学家俱乐部轮值主席，中国光学学会纤维与集成光学专委会常委委员，中国通信学会光通信专委会委员；主要研究方向是高速调制光传输机制与技术、光与无线融合网络和光电子集成器件；在可见光通信研究方面，研制了中国首个高速实时可见光通信系统样机，该样机在第15届国际工业博览会展出并获得创新奖。