



综述

50 Gbit/s 前传光模块关键技术研究与应用展望

盛夏¹, 马涛², 刘昊¹, 冯佳³

(1. 中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209;

2. 中国电信股份有限公司, 北京 100045;

3. 华为技术有限公司, 上海 201206)

摘要: 随着全球5G网络的规模化商用及移动互联网流量的迅猛增长, 更为丰富的无线频谱资源得以释放, 高速率光模块在无线前传网络中的需求日益凸显。聚焦于50 Gbit/s前传光模块的关键技术, 深入剖析了前传网络的两种主要组网方式, 分析了前传链路的典型传输距离及链路损耗情况, 探讨了10 km场景下粗波分复用(coarse wavelength division multiplex, CWDM)中各波长的最大色散值和最小色散值, 并研究了相应的色散补偿策略, 通过实验验证了不同多径干扰(multi-path interference, MPI)强度下系统光功率代价的变化, 详细分析了多径干扰噪声对系统误码性能的潜在影响, 为前传光模块参数的优化提供了重要的理论依据。此外, 深入研究了50 Gbit/s前传光模块的光电芯片技术方案, 对多种不同类型光模块的参数性能进行了严格的测试, 提出了针对50 Gbit/s前传光模块光电接口参数的标准化建议, 详细介绍了当前50 Gbit/s前传光模块在国内外的标准现状, 并展望了未来应用的发展趋势。

关键词: 5G网络; 50 Gbit/s前传光模块; 色散; 多径干扰; 光电接口参数

中图分类号: TN919

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024148

Research and application prospects on key technologies of 50 Gbit/s front-haul modules

SHENG Xia¹, MA Tao², LIU Hao¹, FENG Jia³

1. Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Beijing 102209, China

2. China Telecom Corporation, Beijing 100045, China

3. Huawei Technologies Co., Ltd., Shanghai 201206, China

Abstract: With the large-scale commercial use of the global 5G network and the rapid growth of mobile Internet traffic, more abundant wireless spectrum resources can be released, and the demand for high-speed optical modules in wireless front-haul networks is increasingly prominent. Focusing on the key technologies of 50 Gbit/s front-haul optical modules, two main networking methods were deeply analyzed, the typical transmission distance and link loss were analyzed, the maximum and minimum dispersion values of coarse wave division multiplexing (CWDM) wavelengths in a 10 km scenario were explored, and the corresponding dispersion compensation strategies were studied.

收稿日期: 2024-03-11; 修回日期: 2024-04-01



Through experiments, the changes in optical power penalty of different multi-path interference (MPI) were verified, and the potential impact of MPI noise on error performance was analyzed in detail. In addition, deep research on the optoelectronic chip scheme of 50 Gbit/s modules was conducted, the parameters of various types of optical modules were rigorously tested, standardized suggestions for the optoelectronic interface parameters of 50 Gbit/s front-haul modules were proposed, the current standard status of 50 Gbit/s modules at home and abroad was detailed, and the development trend of future applications was prospected.

Key words: 5G network, 50 Gbit/s front-haul optical module, dispersion, multi-path interference, optoelectronic interface parameter

0 引言

面对持续增长的业务接入需求,发展5G移动通信以及下一代通信技术迫在眉睫。2019年6月6日,我国工业和信息化部向中国移动、中国电信、中国联通和中国广电正式发放了5G商用牌照,这标志着我国5G技术的商业化应用正式拉开了序幕;2020年,我国更是将5G网络、人工智能、数据中心等确定为新型基础设施,并强调了加快这些新型基础设施建设进度的重要性;2022年的政府工作报告也提到要推进5G规模化应用。在技术进步与政策的双重推动下,5G及相关产业得到了迅猛发展^[1]。截至2023年年底,我国5G基站总数达337.7万个,网络底座进一步夯实,网络应用不断丰富。

前传光网络在5G网络的发展中发挥着不可或缺的作用,其重要性随着5G技术的深入推广和应用场景的不断拓展而日益凸显^[2-3]。前传光模块作为前传光网络的核心组件,肩负着连接基带处理单元(base band unit, BBU)与远端射频单元(remote radio unit, RRU)或有源天线处理单元(active antenna unit, AAU)之间物理链路的重任。在5G时代初期,AAU的天线数量实现了从8T/8R至64T/64R的显著升级,同时最大空口带宽也由最初的20 MHz大幅提升至100 MHz,若继续沿用传统的通用公共无线接口(common public radio interface, CPRI)切分方案,带宽需求将出现几何级数的增长。为了有效缓解带宽压力,业

界已经转向采用增强型通用公共无线接口(enhanced common public radio interface, eCPRI)方案,将5G前传接口带宽下降至25 Gbit/s的量级。近年来,随着第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)标准组织Rel-17版本的圆满完成以及Rel-18版本的深入推进,5G技术持续演进。当前,Sub 10 GHz和毫米波频段成为研究重点,预示着未来空口带宽将进一步扩大,更为丰富的无线频谱资源将被释放。在此背景下,25 Gbit/s前传光模块已逐渐难以满足日益增长的带宽需求,因此,研究50 Gbit/s或更高速率的前传光模块关键技术显得尤为迫切,这将对5G承载网的未来发展产生深远的影响^[4]。

首先,本文对5G前传网络的组网方式进行了介绍。通过对现网链路的深入调研,本文分析了前传灰光和彩光链路的典型传输距离和传输损耗情况。由于色散代价和多径干扰(multi-path interference, MPI)噪声是影响前传链路预算和信号质量的关键因素,因此本文对不同波长在10 km场景下的最大色散量和最小色散量进行了细致研究,并探讨了相应的色散补偿方案。同时,本文通过实验验证了MPI噪声强度对光功率代价的影响,详细分析了不同MPI强度下,系统误码性能的变化情况,并提出了有效的MPI抑制方案。其次,本文聚焦50 Gbit/s前传光模块的光电芯片技术方案,介绍了50 Gbit/s前传光模块的主要类型,并对不同厂商的50 Gbit/s前传光模块 β 样品的各项参数进行了全面测试,其中,样品研

制分为 α 阶段、 β 阶段和规模量产等阶段。基于测试结果,本文对各类50 Gbit/s前传光模块的光电指标提出了标准化建议。最后,本文梳理了50 Gbit/s前传光模块国内外标准化方面的进展情况,并展望了其在未来的应用前景。

1 前传网络典型组网场景

5G时代的无线接入架构日趋灵活,两种组网架构的3种连接方案如图1所示,前传组网架构可以分为分布式无线电接入网(distributed radio access network, DRAN)和集中式无线电接入网(centralized radio access network, CRAN) [5-7]。

DRAN组网架构中,AAU与分布单元(distributed unit, DU)通常采用共站部署的策略,使得两者之间的传输距离相对较短,因此通常使用短距灰光模块进行连接。然而,DRAN架构也存在一些固有的局限性。首先,由于每个站点需要独立部署机柜,因此DRAN架构在很大程度上受到站点资源的限制,特别是在站点资源相对匮乏的情况下,实现大规模的5G网络部署将变得异常困难。此外,每个机柜需要独立配置并维护相应的配套设备,这无疑增加了运维的复杂性,进而导致运维成本相对较高。其次,尽管AAU与DU共站部署策略有助于减少单个站点对光纤

的需求,但在大规模网络部署中,整体光纤资源的需求量仍然十分庞大。更为关键的是,DRAN架构在组网时难以实现集中控制和管理,这也增加了管理和协调的难度,降低了网络的灵活性和可扩展性[8]。

CRAN组网架构中,DU通常集中部署于特点节点或汇聚机房内,采用堆叠安装方式,从而能够显著地节省机房空间[9]。由于天线射频单元实现了远程拉远,因此在此场景下,DU与天线单元之间采用了长距光纤连接,通过长距灰光或彩光模块实现通信。在CRAN架构中,单纤双向(bi-directional, BiDi) [10]或波分复用[11]技术被广泛应用,这两种方案均能有效减少光纤资源的使用。

CRAN架构中波分复用的3种实现方案如图2所示,波分复用方案进一步细分为无源、有源和半有源3种架构。其中,无源架构中DU和AAU侧均使用无源合分波器,由于前传业务采用透传方式传输,因此无源方案表现出低时延的优势。然而,无源方案在设计时需预先进行波长规划,确定无源合分波器每个端口的输出波长,无法按需配置波长,缺乏灵活性。此外,无源方案虽然建设成本较低,但缺乏保护机制以及操作管理与维护(operation administration and maintenance, OAM)能力,导致故障定位困难,增加了运维

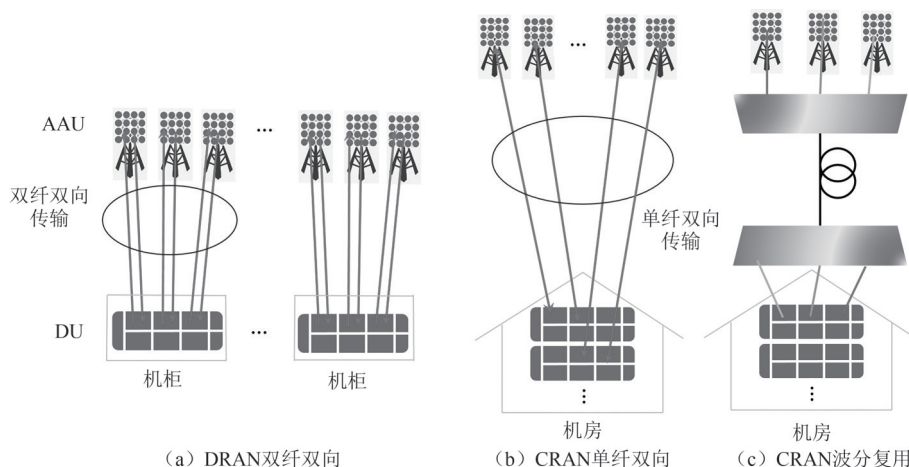


图1 两种组网架构的3种连接方案

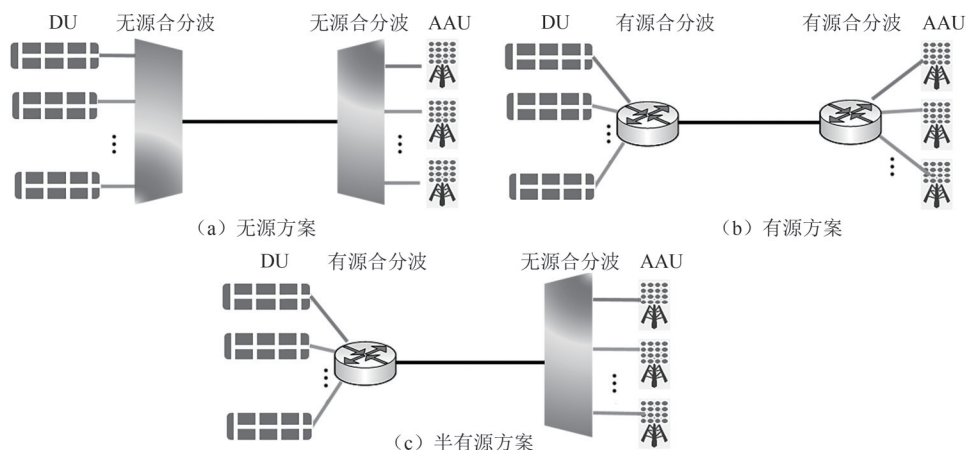


图2 CRAN架构中波分复用的3种实现方案

难度。有源方案在AAU和DU侧分别引入了有源设备,两侧设备均能提供丰富的OAM功能,并支持多种保护方案。然而,这种方案的设备和部署成本相对较高。半有源方案则折中了上述两种方案的优缺点,仅在DU侧部署有源设备,AAU侧仍使用无源合分波器,这样,有源设备能够转发不同波长信号,并对远端AAU侧光模块进行运维。综合来看,半有源方案不仅具备OAM和保护功能,能够实现无线网管与传输网管的协同,还在建设部署成本方面具有优势。随着5G在国内的大规模部署和应用,前传光网络运行质量变得至关重要,网络健康度作为保障网络运行质量的关键指标,要求在5G前传系统的建设过程中,必须综合考虑经济性、运维性等多重因素。

2 前传现网链路分析

2.1 前传链路长度和损耗

本文选取了中国电信前传链路的部分局点,对灰光和彩光场景下的现网链路进行了详尽的统计,包括典型的传输距离分布和链路损耗大小。现网部分局点灰光和彩光模块光纤传输距离统计如图3所示,本文通过精确计算链路传输时延的方法,有效估算出了光纤链路的实际传输距离。从组网方式来看,灰光直驱场景下,光模块的传输距离主要集中在0~2 km范围内,占比约70%。

这一数据表明,短距灰光模块在DRAN和部分CRAN组网中得到了广泛应用。相对而言,彩光模块的应用场景则以CRAN为主,其链路传输距离大多分布在2~6 km范围内。从传输距离进一步分析,无论是灰光还是彩光模块,前传链路的传输距离基本都在10 km范围内,仅在极少部分特定场景下,光纤的传输距离会超过10 km,因此可以认为10 km是前传链路的一个典型传输距离。基于这一结论,前传光模块的光电性能指标应满足10 km场景下的应用需求,以确保网络的稳定性和高效性。

本文详细测量了现网部分局点中,灰光和彩光场景下光纤链路的传输损耗,现网部分局点平均传输损耗分布情况如图4所示。从图4可以看出,在相同的光纤链路长度条件下,彩光链路的平均传输损耗普遍高灰光链路约3 dB。这一差异主要源于彩光链路需引入合分波器,导致接头数量增加,进而产生了一定的插入损耗。结合上述对灰光和彩光模块的典型传输距离的分析,以灰光链路为例,当拉远距离至2 km时,链路的平均传输损耗为4 dB左右。与之相对,彩光链路在拉远距离为6 km时的平均传输损耗接近9 dB。这一对比凸显了在不同应用场景下,灰光和彩光链路在传输损耗方面的显著差异。

由于彩光链路相较于灰光链路引入了更高的

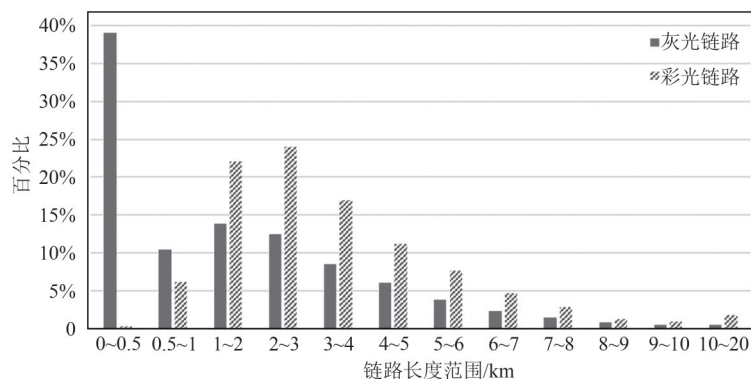
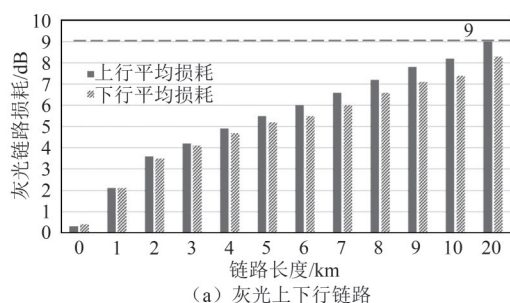
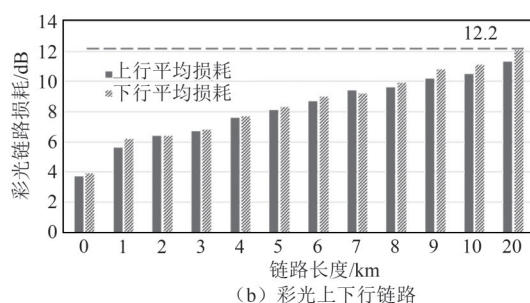


图3 现网部分局点灰光和彩光模块光纤传输距离统计



(a) 灰光上下行链路



(b) 彩光上下行链路

图4 现网部分局点平均传输损耗分布情况

传输损耗, 因此研究不同传输距离下彩光链路损耗分布情况显得尤为重要。彩光2~3 km和7~8 km链路长度范围下的传输损耗分布变化如图5所示。由图5可以看出, 在相同的传输距离范围内, 不同链路的损耗表现出显著的差异。对于那些传输损耗较大的链路, 尽管尚未触发收光功率告警门限, 但明显暴露出链路存在潜在的隐患。因

此, 必须及时分析链路损耗过大的原因, 防止光链路异常状况进一步恶化, 以避免前传链路中断, 确保业务的稳定运行。

2.2 色散分析

前传链路中的色散现象, 其核心成因在于材料色散和波导色散的共同作用, 其中, 材料色散占据主导地位^[12-13]。光信号在光纤中传输时, 色

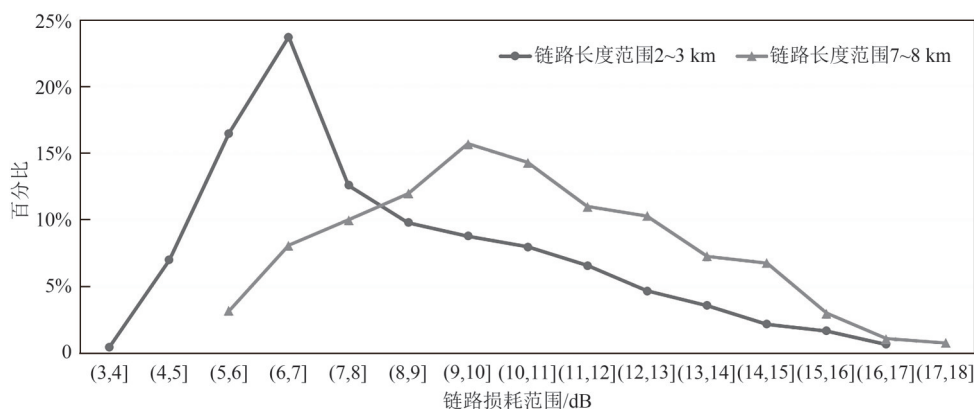


图5 彩光2~3 km和7~8 km链路长度范围下的传输损耗分布变化



散效应会导致信号脉冲在时域上发生展宽,进而造成峰值功率下降。这种变化不仅会导致消光比减小,还会加剧信噪比恶化,对前传网络的性能构成了不容忽视的负面影响。为确保前传链路的性能稳定,光缆布线必须严格遵循ITU-T G.652^[14]规定的色散标准。针对目标距离为10 km的典型通信场景,前传10 km场景下粗波分复用(coarse wavelength division multiplex, CWDM)各波长色散量见表1。表1详细列出了CWDM中不同波长^[15]的色散量,不同波长的色散量存在显著的差异。以CWDM的6波长中色散量最大的1 371 nm波长为例,在10 km的传输距离下,其色散量范围为36.0~66.2 ps/nm。因此,在实际应用中,必须深入考虑前传链路的色散特性,并采取相应的色散补偿^[16]措施,以减少其对信号质量的负面影响。此外,针对不同波长的光信号,还需要根据其独特的色散特性进行精细的优化和调整,从而确保整个前传链路的稳定性和可靠性。

为了有效应对色散对前传链路信号质量带来的不利影响,业界积极探索并发展出了多样化的色散补偿技术,4种主流色散补偿方案见表2。当前,主流的色散补偿手段主要包括采用色散光纤/光栅、数字信号处理(digital signal processing, DSP)补偿、外调无啁啾和微环色散补偿4种方法。首先,色散光纤/光栅方案是一种基于物理器

件的补偿方法^[17-18]。这种方案在实际部署前,需对不同前传链路的色散特性进行精确的测量。根据测量结果,精准地定制色散光纤或光栅的长度、折射率等参数,从而实现对色散的精确补偿。然而,这种方案在工程实施上颇具挑战性,因为它不仅需要精确的测量和定制,而且对光纤或光栅的制造和安装工艺都有较高的要求。其次,DSP补偿方案是一种在电域进行色散补偿的技术^[19-22]。通过接收端对接收到的光信号进行数字处理,有效地消除色散引起的信号失真。这种方案的优势在于可以在不改变光路硬件的情况下,通过DSP算法升级来实现色散补偿的灵活调整。然而,不同厂商的DSP算法在补偿能力上可能存在差异,因此在实际应用中需要通过测试来验证具体的补偿效果。此外,50 Gbit/s前传光模块中光源一般采用直接调制激光器(directly modulated laser, DML),DML虽然具有结构简单、成本低的优点,但其啁啾效应较为明显,高速传输时容易产生色散。为了降低色散代价,业界提出了采用外置调制的方案,如结合电吸收调制激光器(electro-absorption modulated laser, EML)^[23-24]和马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder modulator, MZM)来实现光信号的外部调制。通过这种方式,可以减少激光器的啁啾效应,进而有效地降低色散代价。最后,微环色散补偿方案是一种基于微纳光

表1 前传10 km场景下CWDM各波长色散量

色散量/(ps·nm ⁻¹)	CWDM的6波长					
	1 271 nm	1 291 nm	1 311 nm	1 331 nm	1 351 nm	1 371 nm
10 km色散最小值	-59.4	-38.5	-18.5	0.5	18.6	36.0
10 km色散最大值	-21.5	-2.3	16.0	33.4	50.2	66.2

表2 4种主流色散补偿方案

方案	色散光纤/光栅	DSP补偿	外调无啁啾	微环色散补偿
补偿量	定制补偿量	约10 ps/nm(不同厂商有差异,需实测评估)	约15 ps/nm	约720 ps/nm
尺寸	大	中(集成到DSP)	小	小
光插入损耗	1~3 dB	无	约1 dB	约1 dB
成熟度	成熟	成熟	50 Gbit/s MZM方案可量产	研究阶段

学结构的补偿方法^[25-27]。微环是一种具有微小尺寸的光学谐振腔,可以实现对光信号的高灵敏度调控。研究表明,微环色散补偿方案的补偿量可以达到 720 ps/nm,显示出极高的补偿能力。然而,尽管该方案已经取得了显著的进展,但仍然处于研究阶段,离实际应用仍存在一定的差距。

2.3 MPI 分析

前传光纤链路中,连接点数量通常为5~10个。一些连接点可能因为熔接不当或光纤断裂等原因,光纤的折射率发生变化。此外,当连接端面脏污或接触不良时,会产生菲涅尔反射现象。当光信号在前传链路中通过这些连接点时,反射干扰信号随之产生。这些反射干扰信号再次返回到发生反射的端面时,产生一个与原始信号相同传输方向的干扰信号。这种干扰信号在接收端与未经反射的主信号叠加,导致主信号受到严重干扰,信号眼图质量下降,系统信噪比性能明显降低,这种现象被称为MPI^[28-29]。MPI强度受多种因素的影响,其中最为关键的是连接点反射率、连接点数量和干扰信号与原信号的偏振方向。具体而言,连接点反射率越高、连接点数量越多且干扰信号与原信号偏振越一致,信号受到的MPI影响就越大。值得一提的是,50 Gbit/s前传光模块采用的四电平脉冲幅度调制(4 pulse amplitude modulation, PAM4)相较于传统的非归零(not return to zero, NRZ)码,其抗MPI噪声性能更弱,这意味着PAM4信号对MPI的容忍度更低。因此,降低MPI对于保障PAM4信号的传输性能至关重要,在实际应用中,需要采取一系列措施来抑制MPI的影响。

为了深入探究MPI噪声对前传链路性能的影响,

本文搭建了相应的实验装置,用于测试不同的MPI强度下,系统误码率与接收光功率的动态关系,MPI实验装置如图6所示。实验装置的发射端分别选用工作波长为1 311 nm和1 371 nm的50 Gbit/s光模块,以验证色散对MPI传输代价的影响。光衰减器1的主要作用是调节接收端接收光功率的大小。光信号经过光衰减器1后被分为两路,其中99%的光信号沿主路径到达接收端,另外1%的光信号进入模拟MPI路径。在这条模拟MPI路径中,光信号首先经过5 km G.652单模光纤,从而产生与主路径光信号之间的时延。随后通过光衰减器2和偏振控制器后与主路径光信号合成一路。光衰减器2负责调节MPI强度的大小,以便观察和分析不同MPI强度下的系统性能变化。因为在偏振态一致的条件下,MPI噪声将达到最大值,所以使用偏振控制器来确保两路光信号的偏振态一致。最后,经过合成的一路光信号,99%的光信号被另一个50 Gbit/s光模块接收,另外1%的光信号进入光功率计用于监控接收端光功率。

实验结果如图7所示。图7(a)展示了不同MPI噪声强度下光功率代价的变化趋势。光功率代价定义为主路径光信号与模拟MPI路径光信号之间的功率差。由图7(a)可以看出,随着MPI噪声强度的增加,光功率代价呈现逐渐增大的趋势,并且呈现出指数增长的特性。G.652光纤的零色散波长在1 310 nm附近,该实验结果表明,同一实验系统中,工作波长分别为1 311 nm和1 371 nm的两种光模块在相同MPI噪声强度下,表现出了相近的光功率代价。这一实验结果证明了MPI噪声对色散的敏感性较低,无法通过降低



图6 MPI实验装置

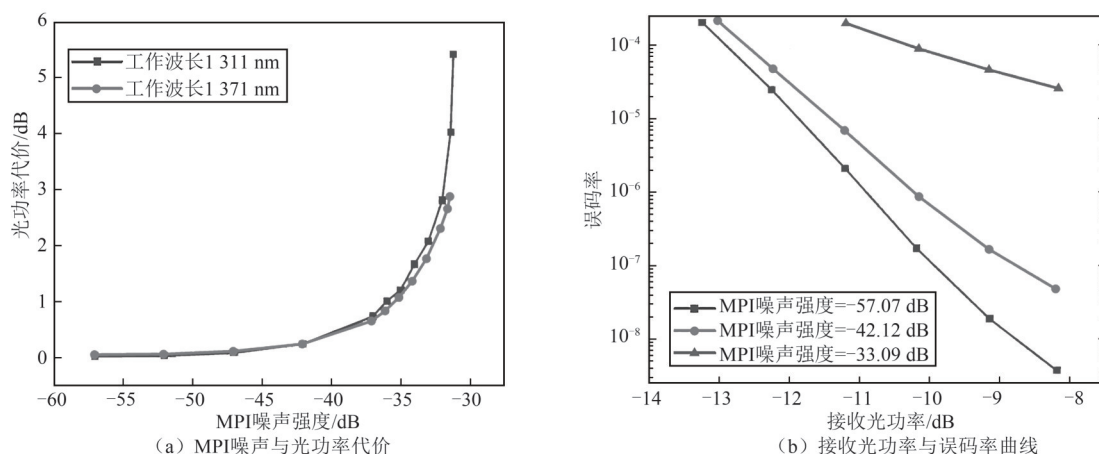


图7 实验结果

或增加色散的方式抑制MPI噪声对系统性能的不利影响。图7(b)为不同MPI噪声强度下,接收光功率与误码率之间的变化曲线。随着MPI噪声强度的增加,光模块的接收灵敏度逐渐下降。MPI噪声强度在-42.12~-33.09 dB存在明显的间隙,根据本实验结果可以看出,当MPI噪声强度低于-33.09 dB时,系统性能获得了大幅度提升。

针对MPI风险,IEEE 802.3^[30]以太网标准建议采用通用链路模型仿真的方式,将MPI噪声带来的光功率代价折算为链路损耗,从而更直观地评估其对系统性能的影响。同时,标准还提出通过前向纠错编码来提升系统的容限,以增强前传链路对MPI噪声的鲁棒性。在50 Gbit/s光模块10 km的应用场景中,以6个连接点为例,IEEE 802.3标准明确规定了每个连接点的最大反射率为-35 dB。通过计算得知,在连接点数量为6、反射率为-35 dB的条件下,所能容忍的最大MPI噪声强度为-58 dB。然而,本文对中国电信现网链路中的183个连接点的反射率进行统计后发现,实际的连接点反射率远高于标准值。数据显示,有23.5%的连接点反射率大于-26 dB,32.8%的连接点反射率大于-35 dB,最大的反射率甚至达到-14.4 dB,这一数值远远高于IEEE 802.3标准中规定的-35 dB的标准值。这表明,在实际的

前传链路中,MPI风险不容忽视,必须采取有效措施来降低MPI噪声对系统性能的影响。

MPI噪声的抑制问题一直是学术界的研究热点,目前研究者们已经提出了多种MPI抑制方法。由于MPI噪声属于低频噪声,因此,当前主流的MPI抑制方法依赖高通滤波器,并采用与DSP算法协同工作的方式实现^[31]。然而,当实际网络环境中的MPI噪声较为微弱或可忽略时,高通滤波器的应用反而降低了传输信号的质量,这无疑是一个需要权衡的问题。另外,由于高通滤波器通常拥有大量抽头,与之配合的DSP算法复杂度提升,进而增加了模块的生产成本与功耗。另一种抑制方法是引入误差信号产生电路,该电路能够基于前传链路参数和采样的MPI受损信号,生成一个估计的误差信号。随后,接收到的光信号减去误差信号,即可实现MPI噪声的滤除^[32]。由于误差信号是通过链路参数估计得出的,因此MPI抑制效果在很大程度上取决于模型的准确性。虽然以上两种方法均能有效地抑制MPI噪声,但同样要求对现有已部署的模块或网络架构进行改动,这无疑会增加光模块和5G建设的成本。除了上述两种方法外,还有一种可行的MPI抑制策略,即通过调整光模块内部调制器工作点的方式来实现MPI噪声的抑制。通常情况

下,模块在出厂时,其调制器的工作点会被设置在正交点附近,可通过上位机调节的方式,将调制器工作点调至正交点以下,调节后的高电平信号的判决范围会相应增大,从而在接收端进行判决时,能够一定程度上降低MPI噪声对高电平信号的影响。这种方法虽然降低了发送信号的发送功率,但考虑到前传链路通常具有较高的余量,因此不会对系统的整体性能造成影响。

3 50 Gbit/s 前传光模块技术方案

3.1 光电芯片方案

单通道50 Gbit/s技术方案已经在中回传和数据中心市场得到了一定的应用实践^[33],然而,这些应用大多采用4通道或更多通道数的方式,因此封装相对较大。另外,这些应用场景在温度范围、传输距离和组网方式等方面,与无线前传场景有明显区别。在无线前传这一特定场景应用下,需充分考虑其独特的规格要求,并进行针对性设计。

目前,50 Gbit/s前传光模块拥有多样化的光电组合方案,50 Gbit/s光模块的3种不同光电方案如图8所示。电芯片的技术方面,50 Gbit/s前传光模块主要借助时钟和数据恢复(clock and data recovery, CDR)或DSP芯片来实现PAM4调制。当前市场,25 Gbit/s光模块大多采用CDR+驱动器(driver, DRV)的Combo芯片方案^[34]。50 Gbit/s前传光模块CDR芯片已有实际样品,并通过了严格的测试。从测试数据来看,这种芯片能够很好地满足灰光300 m短距应用场景和部分10 km的拉远场景需求,具有广泛的应用潜力。在中回传场景下,50 Gbit/s光模块主要通

过DSP芯片实现。这种方案不仅能够应对灰光10 km及BiDi 10 km全温场景应用,而且在CWDM 10 km拉远场景下,DSP方案的性能同样突出。值得注意的是,DSP芯片的性能很大程度依赖先进制程工艺和算法复杂度。目前,业界普遍采用16 nm/12 nm工艺,但随着速率和应用场景需求的进一步提升,未来可能向7 nm等更为先进的工艺演进^[35]。当然,这种技术升级势必会带来新的挑战。与CDR芯片方案相比,DSP芯片方案的光模块功耗高出0.3~0.5 W。因此,芯片性能和可靠性还需要进一步的优化和完善^[36]。

50 Gbit/s光模块光芯片的研发方案可有效地复用现有的25 Gbit/s分布式反馈激光器(distributed feedback laser, DFB)技术,这种激光器可实现约19 GHz的带宽。此外,光发射子组件(transmitter optical subassembly, TOSA)、光接收子组件(receiver optical subassembly, ROSA)和光收发子组件(bi-direction optical subassembly, BOSA)等关键光组件亦可沿用,这有助于降低光模块的研发成本,同时提高光模块的兼容性和可靠性^[37]。考虑前传设备工作环境的复杂多变,光模块必须具备适应广泛气候条件的特点。因此,本文建议光模块的工作温度设定为-40~85 °C。这样的温度范围能够确保光模块在各种极端气候条件下都能稳定工作,满足前传设备的实际需求。然而,部分WDM激光器受限于管芯能力,无法在更宽泛的温度范围内正常工作。针对这种情况,可以考虑适当放宽这些激光器的工作温度,将工作温度设定为-20~85 °C。

3.2 50 Gbit/s光模块主要类型和性能测试

目前,我国4G/5G基站的主流前传光模块为

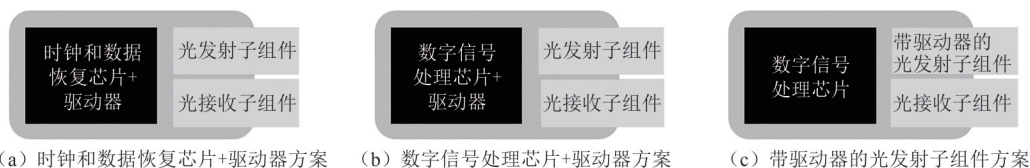


图8 50 Gbit/s光模块的3种不同光电方案



灰光双纤双向和单纤双向光模块。未来随着CRAN逐渐成为5G部署的主流方案,预计xWDM彩光模块的比例将会大幅度增加^[38]。在无线前传光模块应用场景中,综合考虑各光模块厂商的技术能力,灰光双纤双向和单纤双向光模块在基本要求上呈现出一定的相似性。这两种模块均需采用小型可插拔(small form-factor pluggable 56, SFP56)封装形式,具备同时支持CPRI和兼容eCPRI的能力,并同时适配NRZ和PAM4速率。结合第3.1节的分析,前传现网链路应用大多数场景的传输距离在10 km以内,因此光模块的传输距离应支持2~10 km范围,工作温度应满足-40~85 °C,湿度应满足≤95%,最大功耗不超过2 W。

25 Gbit/s彩光光模块在技术上存在CWDM、细波分复用(LAN wavelength division multiplex, LWDM)^[39]、中等波分复用(medium wavelength division multiplex, MWDM)^[40]、DWDM等多元化解决方案。当前现网中,CWDM方案已成为前传彩光模块的主流选择。考虑到现有网络中已部署的CWDM合分波器的利旧问题,本文建议在探索50 Gbit/s彩光光模块时,优先考虑CWDM方案,工作波长选择1 271 nm、1 291 nm、1 311 nm、1 331 nm、1 351 nm和1 371 nm,这些波长差异将直接影响合分波器损耗和色散代价。研究表明,CWDM前四波的合分波器损耗会高于后两波,后两波的色散代价会更高。因此,前四波需具备充足的链路预算,后两波需提升发端性能来补偿色散代价。在50 Gbit/s彩光模块的研究中,后两波性能的提升是研究的重点。从发射端和接收端的角度看,当前主要有硅光和DSP两种解决方案,硅光方案通过优化发射端的啁啾和色散代价性能,展现了出色的色散补偿能力。然而,相比传统的DML方案,目前硅光方案的产业链尚不成熟,仍需进一步发展。DML方案虽然技术相对成熟,但存在发射端正啁啾影响的缺

点,导致色散代价较大。此外,后两波DML资源相对稀缺,通常需要提升接收端DSP性能来增强模块的抗色散能力。截至目前,50 Gbit/s彩光模块解决方案和光电性能的优化仍在进行中,除了继续深化对CWDM方案的研究,产业界还需密切关注50 Gbit/s LWDM、MWDM和DWDM前传光模块的技术进展。

随着单通道速率50 Gbit/s产业链的日趋成熟,50 Gbit/s前传光模块将迎来更多光模块供应商与器件商积极参与的局面。目前,我国几家主流的光模块厂商已在灰光双纤双向、灰光单纤双向和CWDM光模块生产方面取得了显著的进展,这些厂商生产的光模块已进入了β样品测试阶段。为全面评估不同厂商生产的50 Gbit/s前传光模块性能,本文选取了5个不同厂商生产的3种类型的50 Gbit/s前传光模块,分别在常温、低温和高温3种温度下,对模块发射端和接收端的参数性能进行了详尽的测试。多厂商50 Gbit/s前传光模块β样品测试数据范围见表3,表3中的数值范围代表5家厂商模块在相同测试用例下测得的最小和最大值,对于其他处于该范围内的数值,暂不列出。

3.3 光电指标特性

在全面考虑前传链路功率预算需求以及发射端与接收端器件技术水平的基础上,本节详细列出了双纤双向、单纤双向光模块发射/接收端的可参考的光电指标,双纤双向、单纤双向光模块发射端参考规格见表4,接收端参考规格见表5。CWDM彩光模块作为50 Gbit/s前传光模块的主要方案,光接口指标可参考25 Gbit/s CWDM标准,光电性能仍在研究中。

4 50 Gbit/s前传光模块标准化进展

国际标准方面,自2021年9月,国际光电委员会(International Photonics & Electronics Committee, IPEC)已正式启动了MFH50下一代前传标准研究项目。该项目聚焦单通道50 Gbit/s光模块

表3 多厂商 50 Gbit/s 前传光模块β样品测试数据范围

测试用例 (覆盖常温、低温和高温3种场景)	双纤双向光模块 1 310 nm	单纤双向光模块 1 271/1 331 nm	彩光模块	
			1 271/1 291/1 311/1 331 nm	1 351/1 371 nm
中心波长偏移/nm	1.0~7.0	-1.0~5.0	-1.0~3.0	0~5.0
发射平均功率/dBm	1.3~3.0	1.2~1.8	2.2~4.8	2.5~5.0
接收灵敏度/dBm	-13.5~-12.4	-13.5~-12.4	-14.0~-12.7	-14.5~-12.2
功耗/W	1.4~1.5	1.4~1.5	1.8~1.9	1.9~2.0
色散代价/dB	近似无代价	近似无代价	-1.0~1.0	1.0~2.0
PAM4 信号发送眼闭合度/dB	0.4~1.4	1.4~2.8	1.5~2.5	0.5~0.8
消光比/dB	4.1~4.3	3.8~4.2	3.8~3.9	4.5~4.8

表4 双纤双向、单纤双向光模块发射端参考规格

参数	双纤双向光模块	单纤双向光模块
信号波特率范围/GBd	26.562 50±100 ppm	26.562 50±100 ppm
	25.067 52±100 ppm	25.067 52±100 ppm
调制格式	PAM4	PAM4
波长范围/nm	1 295~1 325	1 270±10
		1 330±10
最小边模抑制比/dB	30	30
最大平均发射功率/dBm	4.5	4.9
最小平均发射功率/dBm	-2.3	-1.9
最大外眼调制幅度/dBm	4.0	4.4
最小外眼调制幅度 ^a /dBm	-1.5	-1.1
最大 PAM4 信号发送眼闭合度/dB	3.2	3.2
最小外眼光调制幅度扣除发送色散眼闭合度/dBm	-3.5	-3.1
关闭激光器后，最大平均发送光功率/dBm	-40	-40
最小消光比/dB	3.5	3.5
最大发射机转移时间/ps	34	34
最大相对强度噪声光调制幅度/（dB·Hz ⁻¹ ）	-132	-132
最大回波损耗/dB	15.6	15.6
最大发射光反射率/dB	-26	-26

a. 即使 PAM4 信号发送眼闭合度<2 dB，该项也必须满足

注：ppm 表示百万分之一。

光电组件技术及其工程部署中的应用，目前已经完成了 50 Gbit/s 灰光模块的标准初稿，并计划深入研究 CWDM 的 50 Gbit/s 光模块标准^[41]。MFH50 项目已得到运营商、设备商、光模块厂商、电芯片厂商和科研院所等在内的众多 IPEC 会员单位的广泛参与和积极推动。面向未来，MFH50 项目将继续致力于解决前传场景中的技术问题和挑战，推动前传光模块领域的标准化创新进程。另外，移

动光可插拔联盟（Mobile Optical Pluggables Alliance，MOPA）发布的技术白皮书^[42]明确指出，50 Gbit/s 双纤双向和单纤双向光模块在 2 km 和 10 km 应用场景下的标准应遵循 IEEE 802.3-2022 的规定。MOPA 表示，为了支撑长距离传输并解决色散问题，50 Gbit/s 前传彩光方案和技术方向已不再延续 LWDM 12 波方案，而是转向采用 DWDM 48 波，对 O 波段进行更精细的 48 波细分。



表5 双纤双向、单纤双向光模块接收端参考规格

参数	双纤双向光模块	单纤双向光模块
信号波特率范围/GBd	26.562 50±100 ppm 25.067 52±100 ppm	26.562 50±100 ppm 25.067 52±100 ppm
调制格式	PAM4	PAM4
波长范围/nm	1 295~1 325	1 330±10 1 270±10
光功率损伤阈值/dBm	5.5	5.9
收光异常时最大平均接收功率/dBm	-30	-30
最大平均接收功率/dBm	4.5	4.9
最小平均接收功率/dBm	-10.8	-10.8
最大接收光反射率/dB	-26	-26
外眼光调制幅度最大接收灵敏度 ^a /dBm	-8.9	-8.9
最大PAM4信号压力眼闭合度/dB	3.2	3.2

a. 如果最大PAM4信号压力眼闭合度<3.2 dB，同时在包含光纤链路损伤的条件下，该项也需要满足。

国内标准方面，2021年和2022年中国通信标准化协会（China Communications Standards Association, CCSA）分别发布了关于50 Gbit/s光模块灰光双纤双向和灰光单纤双向的标准^[43-44]，规定了用于中回传的50 Gbit/s灰光光模块的技术规格。2022年12月，CCSA立项前传50 Gbit/s光模块研究课题，聚焦于彩光技术、双通道设计、管理增强和测试标准的深入探索。目前，该课题处于技术方案的研究阶段，亟待运营商及产业链各方的共同参与和深入讨论。根据中国现有的前传光模块标准^[45-48]，随着从10/25 Gbit/s向50 Gbit/s技术的演进，前传光模块的性能参数呈现出明显的趋势性变化。这些变化主要体现在前传光模块发送和接收光功率范围、光调制幅度（optical modulation amplitude, OMA）接收灵敏度和链路预算等方面的优化。其中，链路预算的确定尤为关键，它依赖发送光功率和OMA接收灵敏度的精确匹配，新的标准修订方向旨在通过调整发送光功率的具体数值来进一步增强链路预算的稳健性。同时，为确保50 Gbit/s前传光模块与上一代技术的顺利过渡和兼容，新标准还需对其波长范围、传输距离、速率和温度等关键参数进行细致的规定。除此之外，为了拓宽50 Gbit/s前传光模块标准的适用范

围，新标准还需对CWDM合分波器的技术规格进行补充，并对双通道扩展的适用场景进行修订和完善。通过这一系列举措，未来可以构建一个更加全面、细致且具备前瞻性的50 Gbit/s前传光模块标准体系。

5 结束语

本文深入探讨了前传网络的组网架构和现网链路的典型参数，系统分析了传输距离、链路损耗、色散以及MPI效应等关键因素对50 Gbit/s前传光模块的影响。同时，结合当前网络面临的挑战和实际需求，对50 Gbit/s前传光模块光电芯片技术方案进行了详尽的技术分析和标准化调研。最终得出以下结论。

（1）随着业务接入需求的不断增多和网络部署灵活性的提升，CRAN凭借其高集成度、高灵活性、低经济成本和良好的可运维性4个显著优势，正逐渐成为5G/6G时代的主流网络架构方式。

（2）无论是灰光链路还是彩光链路，前传网络典型的传输距离一般都在10 km范围内。在相同的光纤链路长度条件下，彩光链路的平均传输损耗相较于灰光链路高出约3 dB。鉴于不同波长

下色散量的显著差异,为确保前传链路的整体稳定性和可靠性,需根据各类波长的色散特性进行精细化的优化和调整。此外,50 Gbit/s PAM4信号对MPI噪声的容忍度较低,MPI噪声对50 Gbit/s前传网络的误码性能影响显著,因此研究MPI的抑制措施显得尤为重要。

(3) 50 Gbit/s前传光模块可以充分利用现有的产业链资源,从而实现成本的有效控制。目前,50 Gbit/s双纤双向和单纤双向光模块方案已经相当成熟,收发光电指标在产业界已初步达成共识,而彩光光模块则以CWDM方案为主,各种技术方案仍在进一步评估中。

(4) 本文测试了不同模块厂商生产的双纤双向、单纤双向以及CWDM彩光50 Gbit/s前传光模块在不同温度下的发射端和接收端参数性能,并提出了光电接口指标的标准化建议,旨在推动前传网络技术的规范化和标准化发展。

随着全球5G网络规模化商用以及3GPP Rel-18研究项目的深入推进,未来无线频谱资源将更加丰富。5G网络天线数和空口带宽的持续增长,迫切要求无线前传承载光模块向更高速率发展,以满足日益增长的高速数据互联需求。前传光模块的速率亟须从25 Gbit/s向50 Gbit/s乃至更高速率进行升级,目前50 Gbit/s前传光模块产业链已逐步走向成熟,无线侧主设备的开发工作也趋于完善。未来,中国电信将继续深入开展50 Gbit/s前传光模块的研究工作,推动其标准化进程,并力争早日开展50 Gbit/s前传光模块的试商用工作,为5G网络的进一步发展奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] IMT-2020(5G)推进组. 5G承载光模块白皮书[R]. 2020. IMT-2020(5G) Promotion Group. 5G transport optical transceiver module white paper[R]. 2020.
- [2] PIZZINAT A, CHANCLOU P, SALIOU F, et al. Things you should know about fronthaul[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(5): 1077-1083.
- [3] BARTELT J, ROST P, WUBBEN D, et al. Fronthaul and backhaul requirements of flexibly centralized radio access networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(5): 105-111.
- [4] 王胡成, 徐晖, 程志密, 等. 5G网络技术研究现状和发展趋势[J]. 电信科学, 2015, 31(9): 156-162.
WANG H C, XU H, CHENG Z M, et al. Current research and development trend of 5G network technologies [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(9): 156-162.
- [5] PFEIFFER T. Next generation mobile fronthaul architectures[C]// Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference. Washington, D.C.: OSA, 2015: M2J. 7.
- [6] 王凯辉, 张俊文, 迟楠. 基于光纤传送网的5G移动通信前传关键技术[J]. 光通信研究, 2016(4): 52-55.
WANG K H, ZHANG J W, CHI N. Critical technology for fronthaul based on OTN in 5G mobile communication[J]. Study on Optical Communications, 2016(4): 52-55.
- [7] 赵春华. 5G承载网的架构演进及带宽分析[J]. 电信科学, 2019, 35(2): 79-83.
ZHAO C H. Architecture evolution and bandwidth analysis of 5G bearer networks[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(2): 79-83.
- [8] 扶奉超, 王鹏, 毛宇, 等. 5G前传方案研究和部署策略[J]. 电信科学, 2019, 35(8): 147-151.
FU F C, WANG P, MAO Y, et al. Key technology and deployment strategy of 5G fronthaul transport networks[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(8): 147-151.
- [9] 霍晓莉, 荆瑞泉. BBU集中部署时CPRI链路承载方案[J]. 电信科学, 2015, 31(8): 167-171.
HUO X L, JING R Q. CPRI transport scheme for centralized BBU deployment[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(8): 167-171.
- [10] 杨春, 胡春琳. 5G无线前传网络中的单纤双向技术探讨[J]. 光通信研究, 2019(6): 27-34.
YANG C, HU C L. The discussion on single fiber bidirectional technology in 5G forward network[J]. Study on Optical Communications, 2019(6): 27-34.
- [11] 程明, 杜喆, 张德智. 面向5G前传的新型CWDM承载方案[J]. 电信科学, 2021, 37(9): 139-146.
CHENG M, DU Z, ZHANG D Z. A novel CWDM bearer scheme for 5G fronthaul network[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(9): 139-146.
- [12] GLIESE U, NORSKOV S, NIELSEN T N. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1996, 44(10): 1716-1724.
- [13] MESLENER G. Chromatic dispersion induced distortion of modulated monochromatic light employing direct detection[J].



- IEEE Journal of Quantum Electronics, 1984, 20(10): 1208-1216.
- [14] ITU.T. G.652 Characteristics of a single-mode optical fibre and cable[S]. 2016.
- [15] ITU.T. G.694.2 Spectral grids for WDM applications CWDM wavelength grid[S]. 2003.
- [16] 赵文玉, 赵继军, 纪越峰, 等. 高速光通信系统中的色散问题及其补偿研究[J]. 电信科学, 2002, 18(6): 15-18.
ZHAO W Y, ZHAO J J, JI Y F, et al. Research on the dispersion problem of high-speed fiber communication system and its compensation[J]. Telecommunications Science, 2002, 18(6): 15-18.
- [17] SHEN S, WEINER A M. Complete dispersion compensation for 400-fs pulse transmission over 10-km fiber link using dispersion compensating fiber and spectral phase equalizer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(7): 827-829.
- [18] SHARMA D, SINGH C, KAUR R. Multi-input single-output (MISO) all optical logic (ALG) AND/NOR gate using FWM in dispersion compensation fibers in Mach-Zehnder configuration (DCF-MZI) [J]. Journal of Optical Communications, 2024, 44(s1): s457-s463.
- [19] KODAMA T, MIYAZAKI T, HANAWA M, et al. Low-speed DSP assisted dispersion compensation-free IM/DD optical OFDM transmission over 100 km-SMF using time- and frequency-domain sparse-subcarrier multiplexing[C]//Proceedings of the 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-3.
- [20] LE S T, SCHUH K, CHAGNON M, et al. 1.72-Tb/s virtual-carrier-assisted direct-detection transmission over 200 km[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(6): 1347-1353.
- [21] YAN W Z, LIU B, LI L, et al. Nonlinear distortion and DSP-based compensation in metro and access networks using discrete multi-tone[C]//Proceedings of the European Conference and Exhibition on Optical Communication. Washington, D.C.: OSA, 2012. doi: 10.1109/ECOC.2012.6705902.
- [22] BORIBOON B, LUÍS R S, RADEMACHER G, et al. Polarization insensitive self-homodyne detection receiver for 360 Gb/s data center links[C]//Proceedings of the 2022 European Conference on Optical Communication (ECOC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-4.
- [23] CHAIBI M E, ANFRAY T, KECHAOU K, et al. Dispersion compensation-free IM/DD SSB-OFDM transmission at 11.11 Gb/s over 200 km SSMF using dual EML[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(23): 2271-2273.
- [24] KARINOU F, STOJANOVIC N, PRODANIUC C. 56 Gb/s 20-km transmission of PAM-4 signal employing an EML in C-band without in-line chromatic dispersion compensation[C]//Proceedings of the ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication. VDE2016: 1-3.
- [25] 高磊, 王涛. 基于 Kerr 效应的微环谐振腔色散补偿器件[J]. 光通信研究, 2014(2): 21-24.
GAO L, WANG T. Study on Kerr effect-based micro-ring resonator dispersion-compensation devices[J]. Study on Optical Communications, 2014(2): 21-24.
- [26] CRISTOFORI V, ROS F D, OZILINS O, et al. 25-Gb/s transmission over 2.5-km SSMF by silicon MRR Enhanced 1.55- μm III-V/SOI DML[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(12): 960-963. DOI: 10.1109/LPT.2017.2700497.
- [27] MILIÁN C, SKRYABIN D V. Soliton families and resonant radiation in a micro-ring resonator near zero group-velocity dispersion[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3732-3739.
- [28] FLUDGER C R S, MAZZINI M, KUPFER T, et al. Experimental measurements of the impact of multi-path interference on PAM signals[C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference. Washington, D.C.: OSA, 2014. doi: 10.1364/OFC.2014.W1F.6.
- [29] HAHN C, CHANG J, JIANG Z P. Localization of reflection induced multi-path-interference over multi-span transmission link by receiver-side digital signal processing[C]//Proceedings of the 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-3.
- [30] IEEE. IEEE Standard for Ethernet IEEE 802.3-2022[S]. 2022.
- [31] HUANG C M, SONG H P, CHENG M F, et al. Optical multi-path interference noise mitigation for 56 Gb/s PAM4 IMDD transmission system[C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2022: W2A.27.
- [32] WEN Y J, CUI Y, BAI Y S. Mitigation of optical multipath interference impact for directly detected PAMn system[J]. Optics Express, 2020, 28(25): 38317-38333.
- [33] 张华, 黄卫平. 5G 无线光模块的需求分析和关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(4): 51-53.
ZHANG H, HUANG W P. Product definition and enabling technologies for 5G wireless transceiver[J]. ZTE Technology Journal, 2018, 24(4): 51-53.
- [34] 王光全, 沈世奎. 5G 前传的 25G WDM 技术方案探析[J]. 通信世界, 2019(25): 35-38.
WANG G Q, SHEN S K. Analysis of 25G WDM technical scheme for 5G pretransmission[J]. Communications World, 2019(25): 35-38.
- [35] 刘璐, 吴冰冰. 5G 承载光模块发展分析[J]. 通信世界, 2019(30): 41-42.
LIU L, WU B B. Development analysis of 5G carrier optical modules[J]. Communications World, 2019(30): 41-42.

- [36] 宋梦洋, 李岩, 蒋波, 等. 5G光模块技术及方案对比[J]. 信息通信技术与政策, 2020(5): 29-32.
SONG M Y, LI Y, JIANG B, et al. 5G optical module technologies and programs comparison[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2020(5): 29-32.
- [37] 赵家美, 孙长征, 熊兵, 等. 4×25 Gb/s电吸收调制器与DFB激光器集成光源阵列封装方案研究[J]. 半导体光电, 2017, 38(1): 12-15.
ZHAO J M, SUN C Z, XIONG B. Package design for 4×25 Gb/s electro-absorption modulated laser array[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017 38(1): 12-15.
- [38] 周楠, 吴昌冬, 张友全, 等. 5G前传xWDM技术方案及其应用建议[J]. 江苏通信, 2022, 38(2): 31-34.
ZHOU N, WU C D, ZHANG Y Q, et al. 5G front-haul xWDM technology solution and its application suggestions[J]. Jiangsu Communication, 2022, 38(2): 31-34.
- [39] 唐建军, 李俊杰, 闫飞. 面向5G前传的LWDM技术方案和产业进展[J]. 通信世界, 2020(16): 33-35.
TANG J J, LI J J, YAN F. LWDM technology solutions and industry progress for 5G front-haul[J]. Communications World, 2020(16): 33-35.
- [40] 胡婷, 乐欢, 高建河, 等. 基于MWDM的25 Gbit/s TOSA设计与开发[J]. 光通信研究, 2021(2): 59-62.
HU T, LE H, GAO J H, et al. Design and development of 25 Gbit/s TOSA based on MWDM[J]. Study on Optical Communications, 2021(2): 59-62.
- [41] IPEC. White paper on survey of optical modules in wireless front-haul[R]. 2023.
- [42] MOPA. Mobile optical pluggables alliance technical paper[R]. 2023.
- [43] 中华人民共和国工业和信息化部. 50 Gb/s PAM4调制光收发合一模块: YD/T 3713-2020[S]. 2020.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. 50 Gb/s PAM4 modulation pluggable transceiver: YD/T 3713-2020[S]. 2020.
- [44] 中华人民共和国工业和信息化部. 单纤双向光收发合一模块第3部分: 50 Gb/s: YD/T 2759.3-2021[S]. 2021.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Single fiber bi-directional (BiDi) optical transceiver module-Part 3: 50 Gb/s: YD/T 2759.3-2021[S]. 2021.
- [45] 中华人民共和国工业和信息化部. 无线基站BBU与RRU互连用SFP/SFP+光收发合一模块[S]. 2016.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. SFP/SFP+ optical transceiver module between BBU and RRU for base station interconnecting[S]. 2016.
- [46] 中华人民共和国工业和信息化部. 通信用增强型SFP光收发合一模块(SFP+)第2部分: 25 Gbit/s[S]. 2019.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Enhanced SFP transceiver (SFP+) used in communication -Part 2: 25 Gbit/s[S]. 2019.
- [47] 中华人民共和国工业和信息化部. 单纤双向光收发合一模块第2部分: 25 Gb/s[S]. 2020.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Single fiber bi-directional (BiDi) optical transceiver-Part 2: 25 Gb/s[S]. 2020.
- [48] 中华人民共和国工业和信息化部. 25Gb/s波分复用(WDM)光收发合一模块第2部分: LWDM[S]. 2022.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. 25Gb/s Wavelength division multiplexing (WDM) optical transceiver-Part 2: LWDM[S]. 2022.

[作者简介]



盛夏 (1995-), 男, 博士, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为光纤通信技术和光模块技术。



马涛 (1982-), 男, 中国电信股份有限公司云网发展部高级项目经理, 主要研究方向为光纤通信技术、光网络建设。



刘昊 (1988-), 男, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为光传输系统与光模块、传输网管控技术等。



冯佳 (1977-), 男, 华为技术有限公司无线技术规划专家, 主要研究方向为无线基站产品研发、基带领域规划、无线基站光领域技术规划和对外技术合作等。