

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240175.

光纤光缆技术

常彦彪,沈世奎,张贺,等.反谐振空芯光纤技术研究进展[J].光通信研究,2026(1):240175.

Chang Y B, Shen S K, Zhang H, et al. Research Progress in Anti-Resonant Hollow-Core Fiber Technology[J]. Study on Optical Communications, 2026(1): 240175.

反谐振空芯光纤技术研究进展

常彦彪¹,沈世奎¹,张贺¹,王泽林¹,王光全¹,唐雄燕¹,高然²,李志沛²,王斐²,黄帅洛¹

(1. 中国联通研究院 下一代互联网宽带业务应用国家工程研究中心,北京 100033;

2. 北京理工大学 信息与电子学院,北京 100081)

摘要:随着全球数据总量的指数级增长,对传统通信系统的传输容量提出了更高需求。随着光纤制作工艺不断提升,传统实芯单模光纤可承载容量已逼近其极限,而空芯光纤(HCF)利用空气芯导光,拥有全波段低损耗、超低非线性、超低色散和超低时延等优良性能,是未来光纤通信产业升级的强力候选之一。因此,文章介绍了HCF的发展历程,阐述了HCF各项技术如性能检测技术和传输技术的发展前沿,期冀为下一代光通信系统的大容量、长距离和低时延升级提供参考。

关键词:空芯光纤;非线性;结构检测;后向散射;传输技术

中图分类号:TN818

文献标志码:A

Research Progress in Anti-Resonant Hollow-Core Fiber Technology

CHANG Yanbiao¹, SHEN Shikui¹, ZHANG He¹, WANG Zelin¹, WANG Guangquan¹, TANG Xiongyan¹,

GAO Ran², LI Zhipei², WANG Fei², HUANG Shuailuo¹

(1. State Engineering Research Center of Next Generation Internet Broadband Service Applications, China Unicom Research

Institute, Beijing 100033, China; 2. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology (BIT), Beijing

100081, China)

Abstract: With the exponential growth of global data, a higher requirement for traditional communication capacity is proposed. With the continuous improvement of fiber manufacturing technology, the capacity of traditional solid core single-mode fiber has approached its limitation. Hollow-Core Fiber(HCF) uses air core to guide light and has excellent properties, such as full-band low loss, ultra-low nonlinearity, ultra-low dispersion and ultra-low latency, which make it become one of the strong candidates for the upgrading of the fiber communication industry. Therefore, this article introduces the development of HCF and corresponding technologies such as parameter testing and transmission technology. It may provide reference for the high-capacity, long-distance, and low latency upgrade of the next generation optical communication systems.

Key words: HCF; nonlinearity; structure test; back scattering; transmission technology

0 引言

随着信息时代新型网络通信业务井喷式发展,传统实芯硅基玻璃材料光纤由于其本征缺陷,如色散、非线性、功率承载能力弱以及通信波段较窄等,制约了光纤通信技术的进一步发展。空芯光纤(Hollow-Core Fiber, HCF)的纤芯采用空气作为导光介质,大大降低了光纤材料特性对光纤性能的影响,展现出全波段低损耗、超低非线性、超低色散和超低时延等优良性能。在高功率激光传输、生物医学传感、非线性光学、量子光学以及光纤通信等领域研究火热。

在通信领域,HCF在大容量数据传输、低时延分布式数据中心以及无线电接入等领域具备极高的

应用潜力。随着HCF制作工艺水平的不断提升,其中反谐振空芯光纤(Anti-Resonant Hollow-Core Fiber, AR-HCF)真正实现了低损耗传输与应用,全球范围内基于AR-HCF的通信应用也有了长足的发展,本文将对这些发展进行回顾与总结,第1部分介绍AR-HCF的发展历程;第2部分介绍AR-HCF的导光原理;第3部分介绍AR-HCF的性能表征技术;第4部分总结AR-HCF的传输技术发展;第5部分作出对AR-HCF通信应用发展的展望。

1 AR-HCF的发展历程

AR-HCF的结构发展以降低传输损耗为目的,

收稿日期:2024-08-15; 修回日期:2024-09-04; 纸质出版日期:2026-02-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2024YFB2908705)

作者简介:常彦彪(1993-),男,甘肃定西人。研究员,博士,主要研究方向为新型光通信光纤和器件。

通信作者:常彦彪,研究员。E-mail:changyb10@chinaunicom.cn

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

总体上经历了从复杂到极简再到较简的转变过程。2007年,英国巴斯大学报道了竹篮型 Kagome 结构 HCF^[1],如图 1(a)所示,其典型特征为包层由复杂的二维光子晶体结构组成。而该光纤传输损耗极高,达 1 000 dB/km。HCF 由此走上了降低损耗的发展历程。2011年,俄罗斯科学院提出了单层圆管包层结构 HCF^[2],但其损耗依旧将近 1 000 dB/km,如图 1(b)所示;2013年,俄罗斯科学院提出单层圆管无节点 AR-HCF^[3],如图 1(c)所示,该光纤的损耗为 50 dB/km@3 390 nm;2016年,优化后的单层圆管无节点 AR-HCF 损耗降到了 7.7 dB/km^[4]。至此,AR-HCF 结构完成了从复杂光子晶体结构包层到极简圆管结构包层的转变。

显然,单层圆管无节点 AR-HCF 的损耗无法满足通信传输要求。后来,经过研究发现,在单层圆管中再嵌入一个小圆管,组成嵌套管结构包层,可以

大幅降低损耗^[5]。2018年,国内暨南大学报道了连体管 AR-HCF,最低损耗为 2 dB/km,如图 1(d)所示^[6];同年,英国南安普顿大学报道了嵌套反谐振无节点光纤(Nested Anti-resonant Nodeless Fiber, NANF)^[7],如图 1(e)所示,该光纤的传输损耗降低到 1.3 dB/km;随后,南安普顿大学的研究人员,在 NANF 的结构基础上,持续优化光纤参数与拉制工艺,于 2021年成功实现了 0.22 dB/km 的超低传输损耗^[8],如图 1(f)所示;2024年,微软联合南安普顿大学采用双嵌套反谐振无节点光纤(Double Nested Anti-resonant Nodeless Fiber, DNANF)结构,通过优化光纤制作工艺,实现了 0.11 dB/km 的传输损耗,刷新了 AR-HCF 传输损耗记录^[9],微软 DNANF 结构示意图如图 1(g)所示。以上就是 AR-HCF 结构从极简再到较简的发展过程。

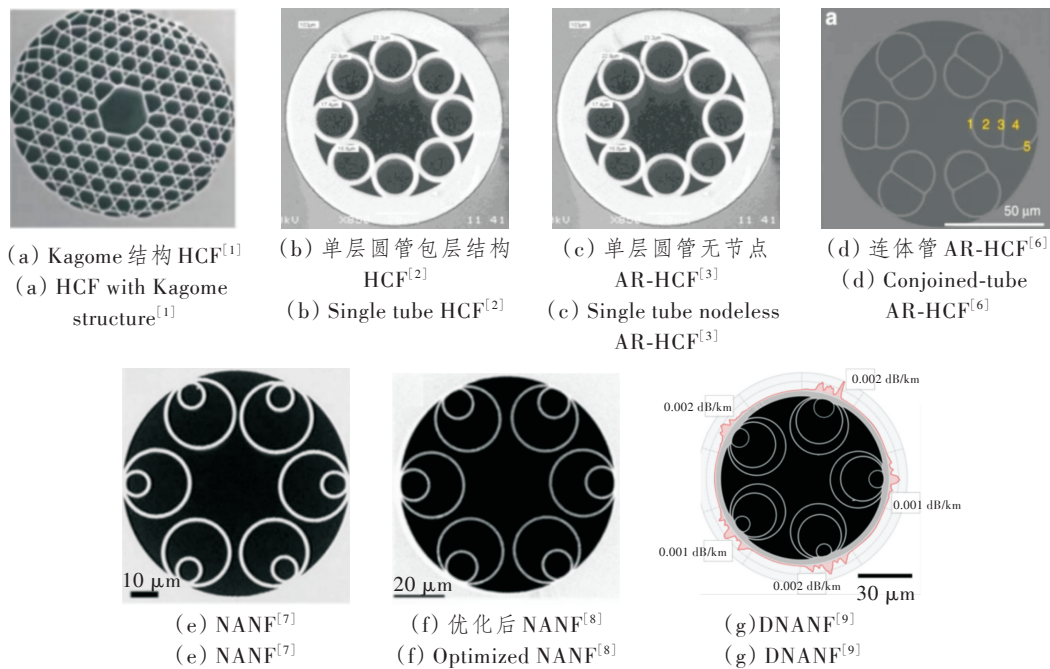


图 1 不同 HCF 截面图

Figure 1 The cross-sections of different HCF

2 AR-HCF 的导光原理

以最简单的 AR-HCF 结构为例,即单个空芯薄壁管,来说明其导光原理,如图 2 所示。其中,玻璃层的折射率为 n_1 ,厚度为 t ;空气芯的折射率为 n_0 ;纵向和横向传播常数分别为 K_L 和 K_T 。在空气芯区域,其 K_L 接近 $n_0 k_0$, k_0 为自由空间波数, K_T 为 0。在玻璃壁区域的横向传播常数 K_T 为 $k_0 \sqrt{n_1^2 - n_0^2}$ 。设 AR-HCF 中的光直接透传玻璃壁的相位变化为

ϕ_0 ,而经过在玻璃壁表面发生两次反射到达玻璃壁另一侧的光相位变化为 ϕ_1 ,则二者之间的相位差 $\Delta\phi$ 为 $2tk_0 \sqrt{n_1^2 - n_0^2}$ 。当 $\Delta\phi$ 为 π 的偶数倍时,光在玻璃层的外侧相干增强,不能被限制在光纤内,这种状态就为谐振状态,此时相位差满足谐振条件。当 $\Delta\phi$ 为 π 的奇数倍时,光在玻璃层的外侧相干相消,玻璃层能将光限制在光纤内,达到反谐振状态,此时相位差满足反谐振条件,有利于 AR-HCF 导光的,就是反谐振状态。

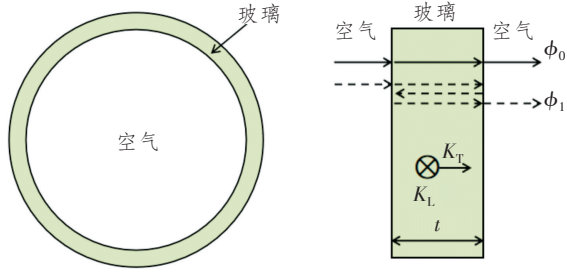


图 2 单个薄壁管 AR-HCF 理论模型

Figure 2 Theoretical model of the single thin tube AR-HCF

3 AR-HCF 的性能表征技术

AR-HCF 其各项本征物理参数如非线性以及后向散射系数都远低于实芯光纤,使得传统实芯光纤性能测量方法不适用或者测量不准确。因此,AR-HCF 性能的新型测量表征方法也是目前的研究热点。

3.1 非线性系数

暨南大学实现了一种测量 AR-HCF 克尔非线性系数的新方法^[10]。该方法采用高阶正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)星座图中的星座点非线性相移推算得到克尔非线性系数。高功率调制信号在经过光纤后受非线性影响,会引起星座图中的星座点旋转,每个星座点的相移可以通过测量旋转角度得到,非线性相移 φ_{NL} 与信号强度的关系为 $\varphi_{NL} = \gamma L_{eff} |A(0, t)|^2$, 式中: γ 为非线性系数; L_{eff} 为光纤有效长度; A 为信号复振幅。通过线性拟合非线性相移与信号强度,得到拟合曲线斜率 $k(k = \gamma L_{eff})$, 即可得到非线性系数 γ , 如图 3 所示。

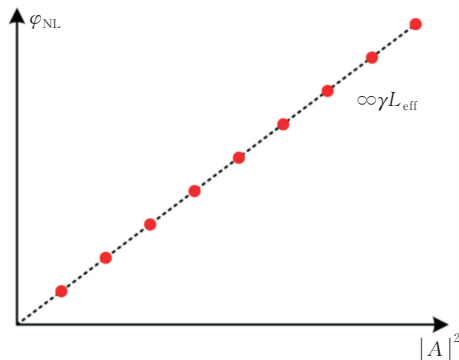
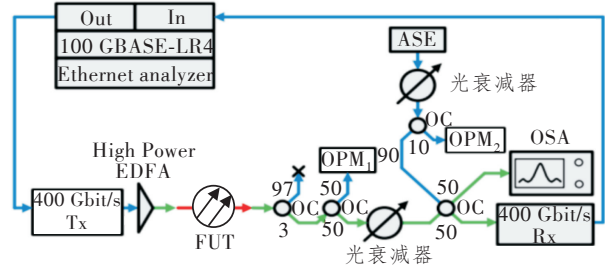


图 3 信号的非线性相移与输入功率的线性拟合^[10]

Figure 3 Linearly fitting of signal nonlinear phase shifts with the input power^[10]

实验结构如图 4 所示,测量所得 AR-HCF 克尔非线性系数为 $2.2 \times 10^{-23} \text{ m}^2/\text{W}$ @1 550 nm, 与已发表

文献测量的 $2.3 \pm 0.3 \times 10^{-23} \text{ m}^2/\text{W}$ 大约一致^[11]。



注: Ethernet analyzer 为网络分析仪; OPM 为光功率计; FUT 为待测光纤; EDFA 为掺铒光纤放大器; Tx 和 Rx 为信号发送和接收器; ASE 为自发辐射光源; OSA 为光谱仪。

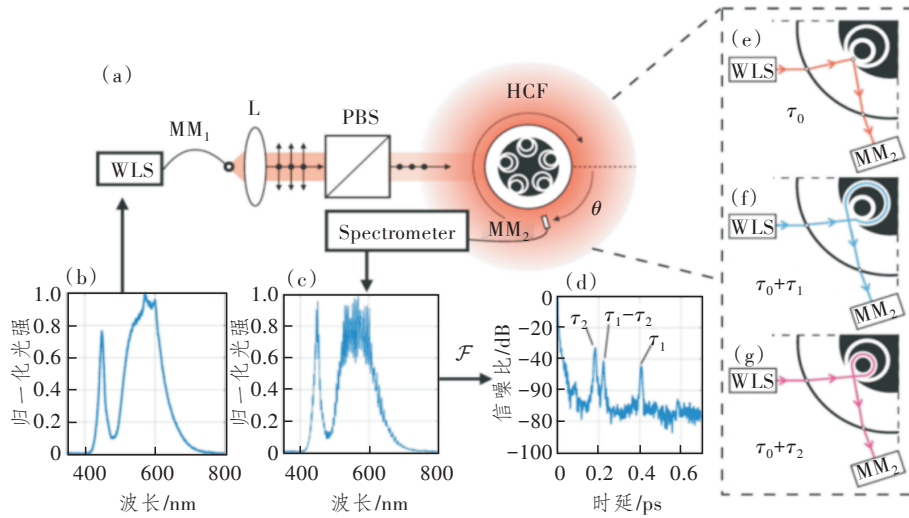
图 4 AR-HCF 非线性系数测量结构^[10]

Figure 4 AR-HCF nonlinearity coefficient measurement setup^[10]

3.2 结构检测

南安普顿大学提出了一种横向无损检测 AR-HCF 内部结构的技术^[12], 并成功对 NANF 和 DNANF 的结构进行了测量。该技术原理如图 5 所示。白光光源(White Light Source, WLS)经透镜 L 准直穿过偏振分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)照射到 AR-HCF 侧面, 部分散射光会被多模光纤 MM₂ 接收, 进而传输到频谱仪(Spectrometer)进行分析。在 AR-HCF 中, ①部分偏振光从纤芯和包层之间的空气-包层分界面反射, 如图 5(e)所示, 记到达 MM₂ 的消耗时间为 τ_0 ; ②其他部分偏振光分别从嵌套管外层(图 5(f))和内层(图 5(g))环绕一圈而出, 记额外到达 MM₂ 的消耗时间分别为 τ_1 和 τ_2 。最终在 OSA 得到不同路径光干涉谱, 如图 5(c)所示; 对其进行逆傅里叶变换得到时域图, 其中不同的脉冲峰代表不同路径传输的时延, 如图 5(d)所示。再将时延值进行几何分析即可得到 AR-HCF 的几何结构。

NANF 和 DNANF 的横截面测量结果如图 6 所示。图 6(a)所示为 NANF 的横截面, 其中, 外嵌套管平均直径 d_1 为 $26.6 \mu\text{m}$, 内嵌套管平均直径 d_2 为 $12.1 \mu\text{m}$ 。图 6(b)所示为非破坏(Non Destructive, ND)测量法和显微法得到的 5 个内外嵌套管的直径, 两种技术拥有良好的测量一致性, 内外管的测量差异分别为 0.7% 和 1.2%。DNANF 的横截面如图 6(c)所示, 其中, 3 个嵌套管中外嵌套管平均直径 d_1 为 $29.9 \mu\text{m}$, 中嵌套管平均直径 d_2 为 $25.4 \mu\text{m}$, 内嵌套管平均直径 d_3 为 $8.0 \mu\text{m}$ 。同样, 图 6(d)展示了两种技术的测量差异, 外、中 and 内嵌套管平均差异分别为 0.3%、0.6% 和 3.0%。



注： \mathcal{F} 为逆傅里叶变换； θ 为 MM_2 的旋转角度。

图5 AR-HCF内部结构测量技术原理图^[12]

Figure 5 Schematic of AR-HCF internal structure measurement technology^[12]

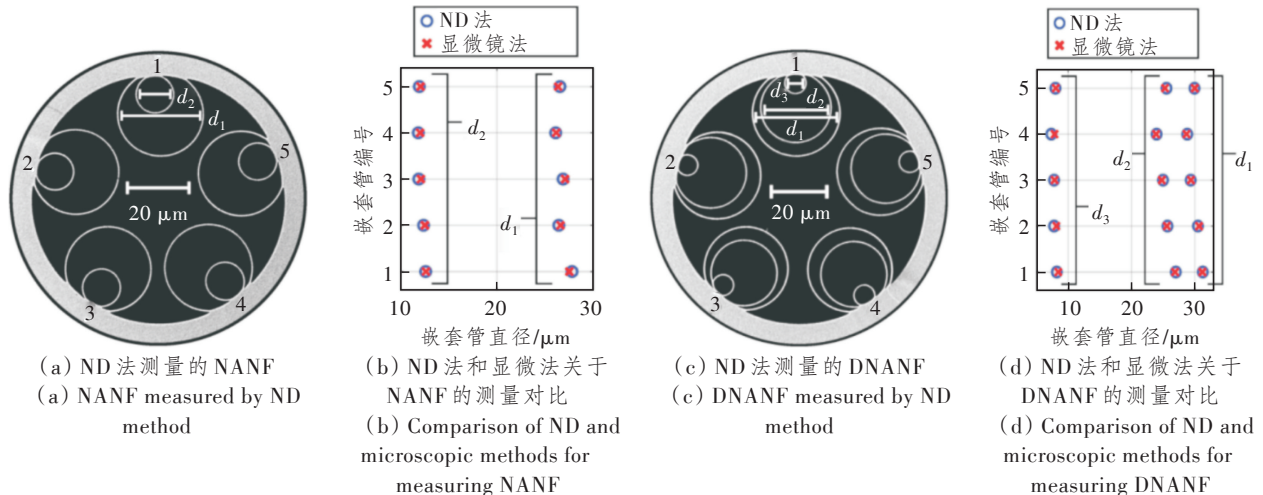
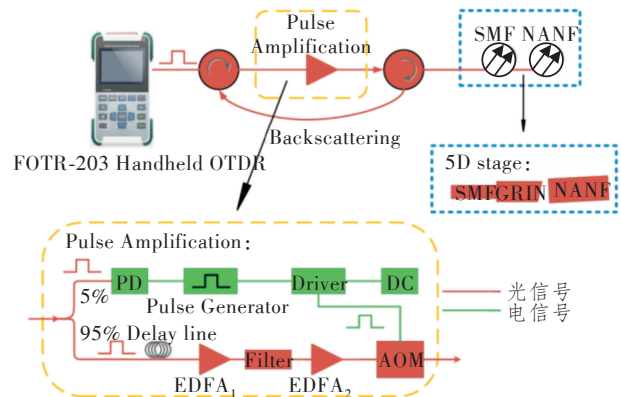


图6 NANF和DNANF的测量结果^[12]

Figure 6 Measurement results of NANF and DNANF^[12]

3.3 后向散射

南安普顿大学基于低成本普通光时域反射仪(Optical Time Domain Reflectometer, OTDR)采用二阶EDFA放大的技术实现NANF的分布式测量^[13],突破了由于AR-HCF后向散射系数过低而无法用普通OTDR测量的难题。传统实芯单模光纤的后向散射系数一般为 -72 dB/m,采用普通OTDR即可实现分布式测量。而AR-HCF如NANF和DNANF的后向散射系数还要再低大约30 dB,普通OTDR无法实现测量。因此,采用二阶EDFA来放大探测脉冲功率,同时用滤波器(Filter)和声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)抑制噪声,成功增强了AR-HCF内部后向散射功率并实现探测,该技术原理如图7所示。

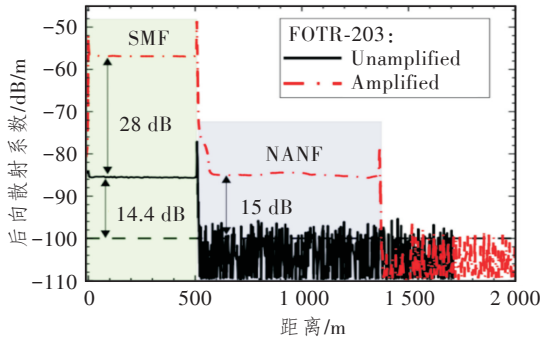


注:PD为光电探测仪;Pulse Generator为脉冲发生器;Pulse Amplification为脉冲放大器;DC为直流电源;Driver为驱动器;GRIN为渐变折射率光纤;SMF为单模光纤。

图7 OTDR二阶EDFA放大探测技术原理^[13]

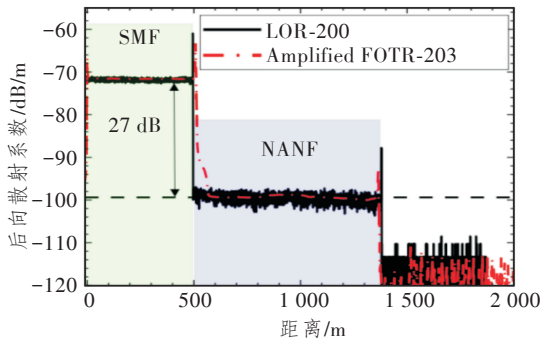
Figure 7 Principle of second-order EDFA detection technology for OTDR^[13]

FUT 采用了 SMF+NANF 的方式,主要用于测量结果的对比较证与后向散射系数的计算。测量结果如图 8 所示。由图可知,普通 OTDR(型号:FOTR-203)在无放大单元时无法测量 NANF 的后向散射,而有放大单元的 FOTR-203 测量结果与高端 OTDR(型号:LOR-200)的基本一致,但有放大单元的 FOTR-203 的测量分辨率仅为 LOR-200 的 1/10,达到了 1.5 m。最终测得的后向散射系数接近-99 dB/m,比 SMF 低 27 dB/m。



(a) FOTR-203 测量结果

(a) Measured results of FOTR-203



(b) LOR-200 和 FOTR-203 测量结果对比

(b) Measured results comparison between LOR-200 and FOTR-203

图 8 SMF+NANF 测量结果对比^[13]

Figure 8 Measured results comparison of SMF+NANF^[13]

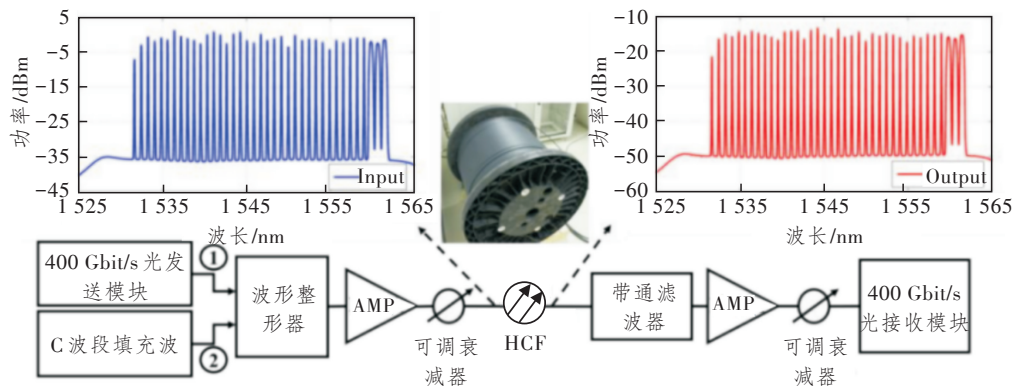
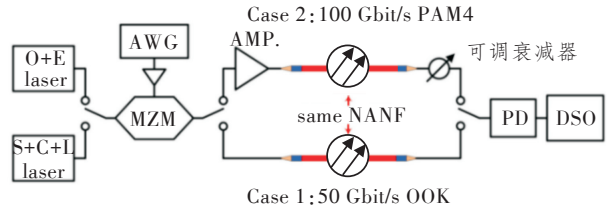


图 10 基于 NANF 传输系统实验结构^[15]

Figure 10 Transmission system based on NANF^[15]

4 AR-HCF 的传输技术

2020 年,南安普顿大学实现了短距离超宽带 AR-HCF 传输^[14]。6 嵌套管 NANF-6 提供 3 dB 带宽超过 700 nm (1 240~1 940 nm)。基于 NANF-6 的传输系统如图 9 所示。



注:AWG 为任意波形发生器;MZM 为马赫曾德尔调制器;AMP 为光放大器;OOK 为开关键控;PAM4 为 4 阶脉冲幅度调制;DSO 为数字处理模块。

图 9 短距离超宽带 AR-HCF 传输系统^[14]

Figure 9 Short-distance ultra-broadband AR-HCF transmission system^[14]

采用 1 km 长 NANF-6,50 Gbit/s 光 OOK 信号和 100 Gbit/s PAM4 信号在 1 291~1 631 nm 范围内均实现了无功率损失传输。

2021 年,英国电信运营商 BT 首次在现网环境进行了 10.25 km 的 NANF 38×400 Gbit/s 的密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)系统传输试验^[15]。该 10.25 km 长的 NANF 光缆由两段 NANF 熔接而成,长度分别为 4.10 和 6.15 km,基于 NANF 的传输系统实验结构如图 10 所示。

图 11 所示为 400 Gbit/s 单波速率下 NANF 传输系统的误码率(Bit Error Rate, BER)。随着入纤总功率的增加,10.25 km NANF 的 BER 变化不大,而 10 km SMF 传输试验的 BER 指数增大,说明了 NANF 的低非线性系数和高功率承载性能。

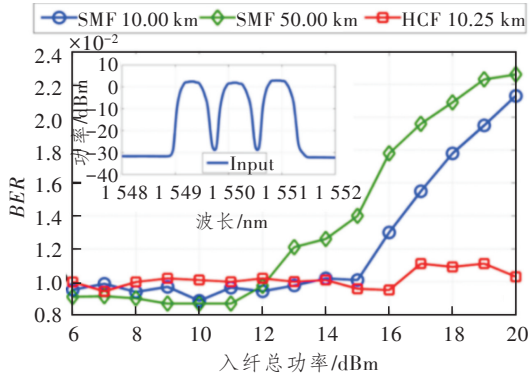
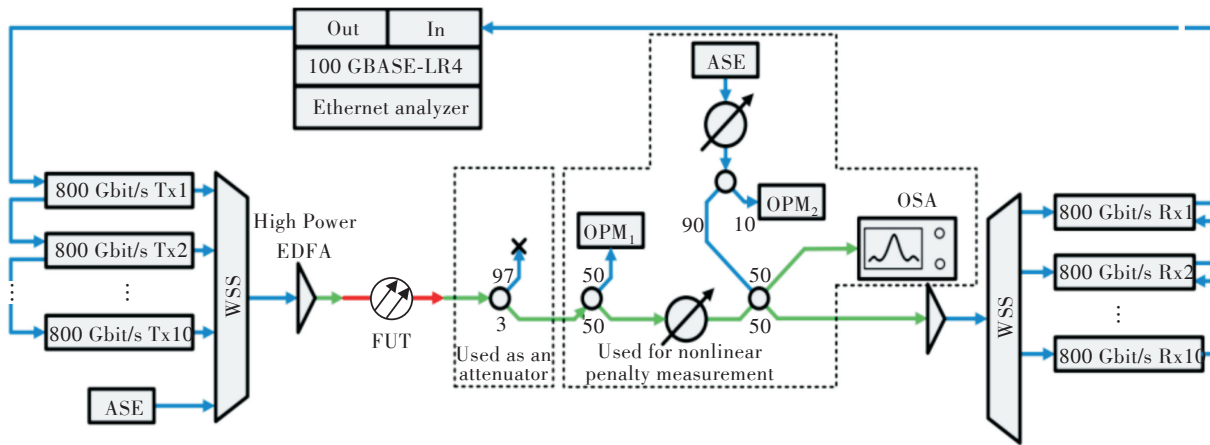


图 11 400 Gbit/s 系统传输 BER^[15]
Figure 11 The BER of 400 Gbit/s system^[15]

2023年,中国移动实现了基于嵌套管级联空芯光纤(Conjointed-tube HCF, CTF)的实时 40×800 Gbit/s 概率整形偏振复用 64QAM(Probabilistic Constellation Shaping Polarization Multiplexing 64QAM, PCS-PM-64QAM)信号传输系统^[16]。系统采用 CTF 长度为 190 m,在高入纤功率传输下(28 dBm),CTF 传输并无非线性损失,传输性能堪比背靠背传输,实验系统如图 12 所示。



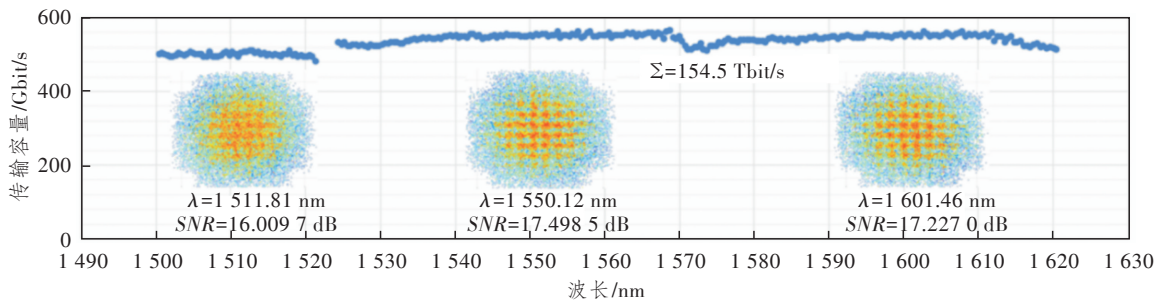
注:WSS为波长选择器 100 GBASE-LR4为 100 Gbit/s 长距光模块;FUT为待测光纤;OPM为光功率计;ASE为自发辐射光源;OSA为光谱仪。

图 12 实验系统结构^[16]

Figure 12 The experimental transmission system^[16]

同年,鹏城实验室实现了传输容量高达 154.5 Tbit/s 的 NANF 相干波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)传输系统^[17]。该系统利用 1.4 km 长的 NANF,传输波段覆盖 S+C+L

波段,调制信号为 PCS-PM-128QAM,波特率为 49 Gbaud,首次实现了 1 500.4~1 620.5 nm 范围内准连续偏振复用相干光传输,系统传输容量如图 13 所示,传输容量 Σ 为 154.5 Tbit/s。



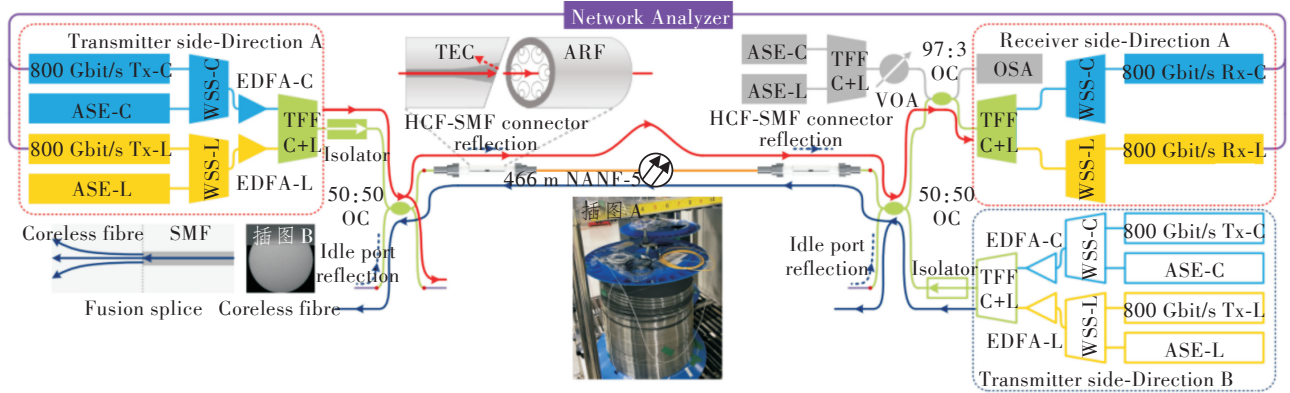
注:SNR为信噪比。

图 13 系统传输容量^[17]

Figure 13 The transmission capacity^[17]

2024年,中国移动、暨南大学和烽火实现了基于 5 嵌套管 NANF-5 的同频同时全双工(Co-frequency Co-time full-duplex, CCFD)传输实验,传输

容量为 202.1 Tbit/s^[18]。传输系统如图 14 所示,其中,插图 A 为 NANF-5 实物图,插图 B 为无芯光纤图。



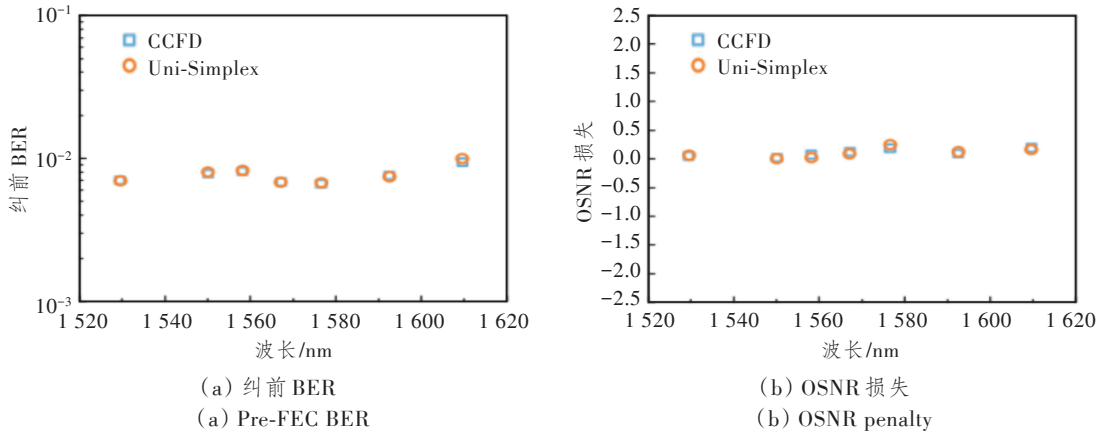
注：TFF为可调谐光滤波器；OC为光耦合器；TEC为热扩芯光纤；ARF为NANF-5。

图 14 基于 NANF-5 的传输系统^[18]

Figure 14 The transmission system based on NANF-5^[18]

系统采用新型 C6T+L6T EDFA 以及 C、L 波段的 WSS, NANF 长度为 466 m, 收发光模块采用 842.065 Gbit/s PCS-PM-64QAM 实时光模块, 传

输性能如图 15 所示。CCFD 双向传输性能几乎一致。



注：OSNR为信噪比。

图 15 CCFD 和单向传输性能对比^[18]

Figure 15 Performance comparison between CCFD and unidirectional transmission^[18]

2024 年 5 月, 中国联通首次开展在 C 波段的单波 1.2 Tbit/s AR-HCF 传输技术研究实验, 采用

10.2 km 长 AR-HCF, 实现了 32×1.2 Tbit/s 传输容量, 实验系统如图 16 所示。

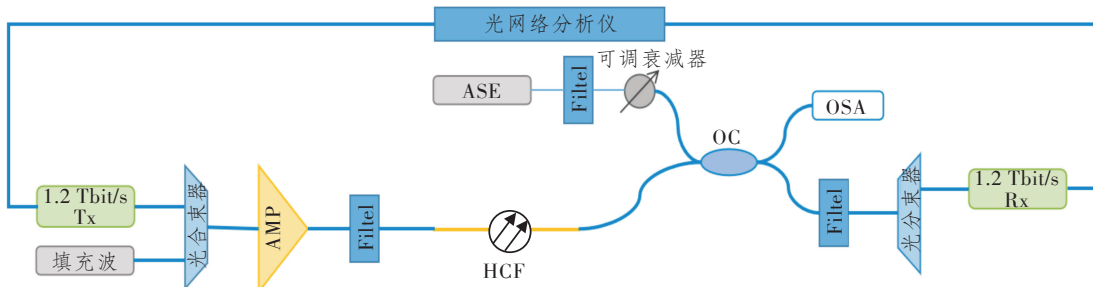


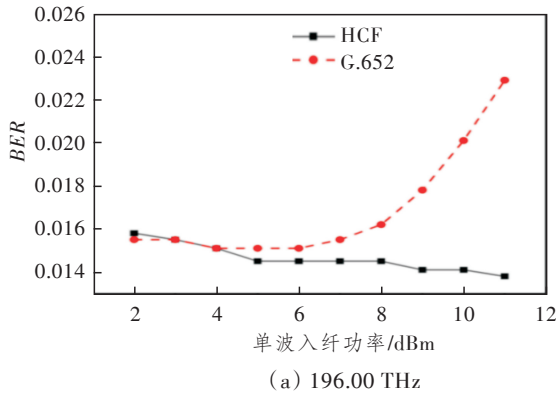
图 16 单波 1.2 Tbit/s WDM AR-HCF 传输系统

Figure 16 1.2 Tbit/s per wavelength WDM transmission system based on AR-HCF

采用上海诺基亚贝尔公司提供的具备自主知识产权芯片的超相干光传输模块, 支持波特率为 130 Gbaud 的 PCS-PM-64QAM 信号传输, 并创新性地采用基于常规光纤熔接机的低损耗熔接技术实

现了 SMF 与 AR-HCF 的有效熔接。最终测量的信号频率分别为 196.00 和 191.35 THz 的传输结果如图 17 所示。结果显示, 随着入纤功率的逐步增大, G. 652 光纤上信号传输 BER 呈指数型上升

趋势,而 AR-HCF 上信号传输 BER 保持平稳下降



趋势。

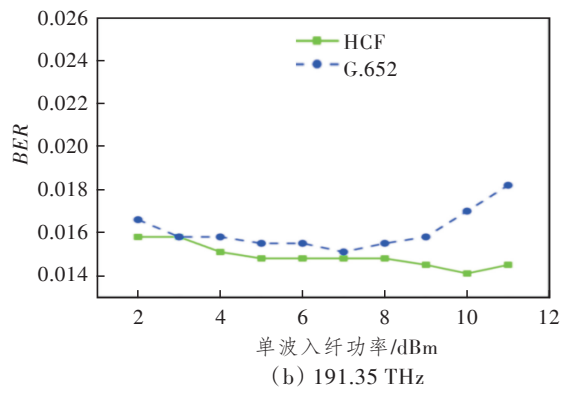


图 17 不同频率信号在 AR-HCF 和 G.652 光纤中传输时的 BER 随单波功率的变化

Figure 17 BER vs. Input power of single wavelength in AR-HCF and G.652

HCF 光缆方面,国内外也相继实现了试验进展。2024 年 2 月,lyntia Networks、Nokia、OFS 和 Digital Realty 等联合在西班牙马德里进行了 HCF 光缆传输试验。该光缆由 OFS 公司制造生产,内部包含 4 根 HCF,实际损耗为 3 dB/km。光缆部署在 lyntia 和 Digital Realty 公司的数据中心之间,全长 1.4 km。

2024 年 6 月,中国移动联合国内光纤光缆、设备厂商开通深圳-东莞金融专线 800 Gbit/s AR-HCF 光缆传输技术试验网。该光缆全长 20 km,其中 AR-HCF 之间的熔接损耗 0.05 dB、空芯-实芯连接损耗小于 0.3 dB 以及铺设后光缆损耗为 0.6 dB/km,均达到国际一流水准。本次试验采用单波 800 Gbit/s 传输系统,实现了单芯光纤双向 128 Tbit/s 的传输容量,证明了 AR-HCF 具备在复

杂管网环境部署的可行性。

2024 年 6 月,中国电信联合长飞公司和中兴公司完成全球首个单波 1.2 Tbit/s、单向超 100 Tbit/s 的 HCF 光缆传输系统现网试点。AR-HCF 光缆全长 10 km,一期部署在杭州智算中心-义桥数据中心之间,由长飞公司制作生产,采用 2 芯空芯+2 芯 G.652 光纤的混合缆,AR-HCF 熔接损耗小于 0.05 dB,AR-HCF 转 SMF 连接损耗小于 0.25 dB,回波损耗小于-54 dB。本次试验基于 WDM 技术,在扩展 C 波段,传输 1.2 Tbit/s×41 波长,在扩展 L 波段,传输 800 Gbit/s×64 波长,最终实现单向 100.4 Tbit/s 的超大容量传输系统。

对上述基于 AR-HCF 的传输系统性能进行总结,如表 1 所示。

表 1 近年 AR-HCF 传输系统性能统计

Table 1 Performance comparisons of AR-HCF transmission systems in recent years

时间	信号格式	AR-HCF 长度	传输容量(单向)	传输波段	完成单位	研究场景
2020 年	OOK/PAM4	1 km	50/100 Gbit/s	O、E、S、C、L	南安普顿大学	实验室
2021 年	PM-16QAM	10.25 km	15.2 Tbit/s	C	英国 BT	现网
2023 年	PCS-PM-64QAM	190 m	32 Tbit/s	C	中国移动	实验室
2023 年	PCS-PM-128QAM	1.4 km	154.5 Tbit/s	S+C+L	鹏城实验室	实验室
2024 年	PCS-PM-64QAM	466 m	101 Tbit/s	C+L	中国移动	实验室
2024 年	PAM4	1.4 km	1.8 Tbit/s	C	鹏城实验室	实验室
2024 年	PCS-PM-64QAM	10.2 km	38.4 Tbit/s	C	中国联通	实验室
2024 年	---	1.4 km	1.2 Tbit/s	C	lyntia	现网
2024 年	---	20 km	64 Tbit/s	C	中国移动	现网
2024 年	---	10 km	100.4 Tbit/s	C+L	中国电信	现网

5 结束语

随着数据流量指数级增长,传统实芯 SMF 通信系统容量逼近其传输瓶颈。而 HCF 以空气代替石英纤芯,有望从根本上突破该限制。本文重点研

究了 AR-HCF 参数的新型表征技术以及 AR-HCF 传输技术进展。其中,AR-HCF 的非线性系数、光纤结构以及后向散射系数等参数都能通过相关先进技术来精确测量。传输技术方面,基于 AR-HCF 的传输系统覆盖了 O、E、S、C 和 L 波段,AR-HCF

光缆长度突破 20 km, 传输容量突破 100 Tbit/s, 展现出了强大的光通信系统升级潜力。

对于通信产业链而言, 基于 AR-HCF 的 S 波段通信技术应受到高度重视。AR-HCF 在 S+C+L 大带宽传输技术中无需考虑受激拉曼效应造成的功率转移和非线性效应造成的光信噪比损失, 具备优良的大带宽传输技术基础。因此, S 波段光器件开发以及标准化工作需提上日程, 新型 EDFA 支持高入纤功率需研究规范, 充分利用 AR-HCF 低损耗窗口以及优良非线性特性, 实现大容量、低时延和长距离传输的新型光网络。

参考文献:

- [1] Pearce G J, Wiederhecker G S, Poulton C G, et al. Models for Guidance in Kagome-Structured Hollow-Core Photonic Crystal Fibres[J]. *Optics Express*, 2007, 15(20): 12680–12685.
- [2] Pryamikov A D, Biriukov A S, Kosolapov A F, et al. Demonstration of a Waveguide Regime for a Silica Hollow-Core Microstructured Optical Fiber with a Negative Curvature of the Core Boundary in the Spectral Region > 3.5 [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1441–1448.
- [3] Kolyadin A N, Kosolapov A F, Pryamikov A D, et al. Light Transmission in Negative Curvature Hollow Core Fiber in Extremely High Material Loss Region[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9514–9519.
- [4] Debord B, Amsanpally A, Chafer M, et al. 7.7 dB/km Losses in Inhibited Coupling Hollow-Core Photonic Crystal Fibers [C]//2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose, CA, USA: IEEE, 2016: 7788138.
- [5] Wang Y, Ding W. Confinement Loss in Hollow-Core Negative Curvature Fiber: a Multi-Layered Model[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33122.
- [6] Gao S F, Wang Y Y, Ding W, et al. Hollow-Core Conjoined-Tube Negative-Curvature Fibre with Ultralow Loss [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2828.
- [7] Bradley T D, Hayes J R, Chen Y, et al. Record Low-Loss 1.3 dB/km Data Transmitting Antiresonant Hollow Core Fibre [C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC). Rome, Italy: IEEE, 2018: 8535324.
- [8] Sakr H, Bradley T D, Jasion G T, et al. Hollow Core NANFs with Five Nested Tubes and Record Low Loss at 850, 1 060, 1 300 and 1 625 nm [C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2021: 9489469.
- [9] Chen Y, Petrovich M N, Fokoua E N, et al. Hollow Core DNANF Optical Fiber with < 0.11 dB/km Loss [C]// Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024, Technical Digest Series. San Diego, CA, USA: Optica Publishing Group, 2024: Th4A. 8.
- [10] Ge D, Gao S, Zuo M, et al. Estimation of Kerr Nonlinearity in an Anti-Resonant Hollow-Core Fiber by High-Order QAM Transmission [C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: 10117045.
- [11] Nibbering E T J, Grillon G, Franco M A, et al. Determination of the Inertial Contribution to the Nonlinear Refractive Index of Air, N₂, and O₂ by Use of Unfocused High-Intensity Femtosecond Laser Pulses [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1997, 14(3): 650.
- [12] Budd L, Taranta A, Fokoua E N, et al. Non-Destructive Characterization of Hollow Core Fiber [C]//2024 Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024. San Diego, CA, USA: Optica Publishing Group, 2024: 10526693.
- [13] Wei X, Shi B, Richardson D J, et al. Distributed Characterization of Low-Loss Hollow Core Fibers Using EDFA-Assisted Low-Cost OTDR Instrument [C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: 10117143.
- [14] Sakr H, Hong Y, Bradley T D, et al. Interband Short Reach Data Transmission in Ultrawide Bandwidth Hollow Core Fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(1): 159–165.
- [15] Iqbal M A, Wright P, Parkin N, et al. First Demonstration of 400 ZR DWDM Transmission through Field Deployable Hollow-Core-Fibre Cable [C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2021: 9489552.
- [16] Ge D, Gao S, Zuo M, et al. Nonlinear-Penalty-Free Real-Time 40×800 Gb/s DP-64QAM-PCS Transmission with Launch Power of 28 dBm over a Conjoined-Tube Hollow-Core Fiber [C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: 10117338.
- [17] Chen H, Zhang X, Liu Z, et al. First Demonstration of Quasi-Continuous S+C+L 154.5 Tbit/s Coherent Transmission in Hollow-Core Anti-Resonant Fiber [C]//2023 Asia Communications and Photonics Conference/2023 International Photonics and Optoelectronics Meetings (ACP/POEM). Wuhan, China: IEEE, 2023: 10368952.
- [18] Ge D, Xiong Y, Wu Y, et al. First Penalty-Free Real-Time Co-Frequency Co-Time Full-Duplex Optical Fiber Transmission with 202.1 Tb/s Net Capacity Enabled by Hollow-Core 5-Element NANF [C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024. San Diego, CA, USA: Optica Publishing Group, 2024: M3J. 2.