



智能可重构多芯光纤空分复用 通信与光信号处理

Intelligent Reconfigurable Multicore-Fiber-Based Space Division Multiplexing Communication and Optical Signal Processing

摘要: 基于自研高性能多芯光纤 (MCF) 及器件, 结合可编程拉锥处理技术, 提出并实现级联式和并联式无限冲激响应微波光子滤波器 (IIR-MPF), Q 值分别达到 143 和 136。基于 MCF 和长周期光栅 (LPG) 在波长和空间两个维度分别实现可重构的有限冲激响应微波光子滤波器 (FIR-MPF), 完成了 3 种两抽头滤波器的切换。此外, 将 MCF-LPG 和定向弯曲系统应用于空分复用相干光传输系统中, 实现可重构的芯间信号切换。实验结果表明该方案具有高达 39 dB 的切换消光比, 传输总容量达 1.344 Tbit/s。

关键词: 空分复用; 多芯光纤 (MCF); 光开关; 光信号处理

Abstract: Based on self-developed high-performance multicore fiber (MCF) and devices and combined with programmable tapering technique, cascaded and parallel infinite impulse response microwave photonic filters (IIR-MPFs) are proposed, with Q values of 143 and 136, respectively. Based on the MCF and long-period gratings (LPG), the reconfigurable finite impulse response microwave photon filter (FIR-MPF) is implemented in two dimensions of wavelength and space respectively, and three different two-tap filters are realized. In addition, MCF-LPG and a directional bending system are used in a space division multiplexing coherent transmission system to realize reconfigurable inter-core signal switching. The experimental results show that the scheme has a switching extinction ratio of up to 39 dB and the total transmission capacity is 1.344 Tbit/s.

Keywords: space division multiplexing; MCF; optical switch; optical signal processing

唐明 /TANG Ming
霍亮 /HUO Liang

(华中科技大学, 中国 武汉 430074)
(Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202005013
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200410.1549.013.html>

网络出版日期: 2020-04-10
收稿日期: 2020-02-20

随着光纤通信系统的不断发展, 人们对通信容量需求的不断增长, 以多芯光纤 (MCF) 为代表的空分复用 (SDM) 传输技术, 在长距离相干传输网络和短距离光接入网中都得到了广泛应用, 大大提升了系统的传输容量^[1-2]。然而, 随着 SDM 传输系统的不断发展, 人们对 SDM 网络提出了更高的要求。为了能够灵活实现

各种不同的网络拓扑结构, 提供更加丰富而又个性化的网络服务, SDM 技术需要能够实现智能可重构的空间信道间的信号耦合和切换, 从而在此基础上实现智能可重构的光通信与信号处理功能。以 MCF 为例, 为了实现在 MCF 芯间的信号耦合和切换, 支持空间维度上的单播、多播和组播等网络功能, 现有的解决方案一般可以归纳为 3 类。第 1 类为空间耦合方案, 如 2014 年, NELSON L. E. 等设计了复杂的空间光学透镜组, 利用微机械空间振镜, 实现了 7 芯光纤间的芯间

路由功能^[3]。与之类似, 在 2015 年, FONTAINE N. K. 等提出了一种基于液晶振镜的 MCF 芯间信号交换系统, 也是通过复杂的衍射光学系统实现不同芯间的信号切换^[4]。第 2 类为片上集成方案, 如在 2015 年, DING Y. 等通过在片上构建 7×7 马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 矩阵实现了硅基光子集成化的 7 芯光纤芯间功率交换, 这种方案虽然集成度高, 但其控制系统和耦合系统都极为复杂, 同时成本更高^[5]。第 3 类为全光纤方案, 如在 2015 年, FERNANDES G. M. 等提出通过压电陶

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年项目 (61722108)、国家自然科学基金重点项目 (61331010、61931010)、国家重点研发计划项目课题 (2018YFB1801205)

瓷在 MCF 中引入弯曲声场, 利用光纤声光效应形成的动态光栅来实现芯间信号耦合^[6]。在 2016 年, ALMEIDA T. 等在 4 芯光纤中刻写长周期光栅 (LPG), 实现了芯间光功率耦合, 并搭建了 200 Gbit/s 的单波长传输系统, 证明了芯间信号交换的可行性^[7]; 但是所刻 LPG 的带宽较窄, 仅能实现单波长芯间信号耦合和交换, 没有充分利用 MCF 大带宽的传输特性。相较于前两类方案, 全光纤方案更易实现高效耦合, 并且成本较低; 因此, 结合 MCF 在未来 SDM 网络中的需求, 我们研究了全光纤型智能可重构的芯间信号耦合与切换方案, 并在此基础上探索了可重构的光子信号处理应用和大容量的通信应用。

1 MCF 及其扇入扇出器件

随着相干光通信系统的发展, 单模光纤物理信道容量的终极限因素主要来自于光纤损耗与非线性效应, 特别是长距离光纤传输带来的非线性畸变限制了入纤功率的提升。为了突破单模光纤非线性香农极限带来的容量紧缩难题, 我们需要探索并开发光纤物理信道的空间维度, 研究 SDM 光信息处理技术与传输系统。因此, 我们开展了基于 MCF 的 SDM 技术的理论和实验研究, 在 MCF 相关的基础理论、制备工艺、参数测试与优化、关键器件与模块等方面取得了一系列突破。

1.1 MCF 设计与制备

通过在 MCF 光学性能优化、芯间串扰的波长相关性分析、性能测试方法以及制备工艺等方面详尽的理论与技术研究^[8-9], 我们在中国首次成功制备低损耗 7 芯光纤并具备规模化生产条件。7 芯光纤典型光学测试特性结果如表 1 所示, 从中可以看出我们拉

制的 7 芯光纤具备较好的芯间串扰抑制和优良的光学性质, 是替代传统单模光纤的理想传输介质。

1.2 MCF 扇入扇出器件设计与制备

MCF 扇入扇出器件是实现 SDM 通信系统高效传输的关键模块, 也是制约中国开展 SDM 光传输研究的瓶颈。为了打破其他国家科研机构的技术垄断, 我们提出采用光纤拉锥、腐蚀等微加工技术并结合光纤束冷接工艺来制备 MCF 扇入扇出器件。该方法有别于其他国家研究机构采用的熔融拉锥耦合法和透镜聚焦法。经过深入研究与长期摸索, 我们首次在中国成功研制出普通单模光纤与 7 芯光纤适配的低损耗扇入扇出模块, 其典型性能参数如表 2 所示。每个端口插入损耗在 1 dB 左右, 为系统级传输应用铺平了道路。在此基础上, 我们还提出基于微孔加工的工艺优化方法, 使扇入扇出器件性能得到优化, 为其端口扩容奠定了基础。同时, 为进一步提升 MCF 扇入扇出器件的插入损耗、可

重复性等重要性能, 我们还提出了基于自组装拉锥法制备 7 芯光纤扇入扇出器件新型制备工艺。为保证光纤在拉锥前后均可以匹配单模光纤模场, GAN L. 等设计了新型沟道辅助型-弱纤芯光纤 (TA-VCF)^[10], 其低折射率沟道用于抑制光纤间串扰并同时提升 TA-VCF 光纤宏弯损耗性能。

2 基于 MCF 的无限冲激响应微波光子滤波器 (IIR-MPF)

目前基于 SDM 光纤的微波光子信号处理的研究, 已经实现了利用在同质 MCF 中刻写光纤光栅来构造有限冲激响应微波光子滤波器 (FIR-MPF)^[11], 但是一般而言, FIR 滤波器的 Q 值较小, 而 IIR-MPF 则有较高的 Q 值。本文中, 我们基于 MCF 和可编程拉锥技术构造出级联式和并联式的 IIR-MPF 结构, 实现了较高的 Q 值, 并且同时使之具有可调谐性与可重构性。IIR-MPF 的原理为: 电光调制器 (EOM) 先将射频 (RF) 信号调制到光载波上, 然后该信号经过耦合器构成的环路结构将

▼表 1 7 芯光纤典型光学特性参数

纤芯编号	1 310 nm 下的损耗 / (dB/km)	1 550 nm 下的损耗 / (dB/km)	1 550 nm 下的色散 / (ps/(nm · km))	1 550 nm 下的模场直径 / μm	截止波长 / nm	1 550 nm 下的偏振模色散 / (ps/km ^{1/2})	1 550 nm 下的弯曲损耗 / (dB/turn@R=5 mm)
1	0.331	0.207	18.26	9.59	1204	0.135	0.049
2	0.335	0.213	18.12	9.57	1249	0.196	0.063
3	0.325	0.222	18.12	9.75	1263	0.208	0.056
4	0.329	0.185	18.10	9.78	1185	0.132	0.053
5	0.328	0.208	18.31	9.60	1236	0.168	0.062
6	0.301	0.243	18.02	9.71	1187	0.186	0.059
7	0.287	0.188	18.68	9.62	1301	0.188	0.061

▼表 2 7 芯光纤扇入扇出器件典型性能参数

纤芯编号	插入损耗 / dB	回波损耗 / dB	串扰 / dB
1	0.4	60.12	-50.65
2	0.9	53.45	-49.82
3	1.1	56.96	-51.29
4	0.6	54.87	-49.36
5	0.7	56.36	-50.72
6	0.5	52.17	-51.25
7	1.2	57.32	-49.68

产生具有相同时间延迟差 T 的多个抽头,即构成一个多抽头的滤波器结构,光信号最终将被光电探测器转换为 RF 信号^[12]。

本方案基于 MCF 的可编程拉锥技术以及 MCF 扇入扇出设备来实现环路结构^[13]。我们选择了以电弧放电方法为基础的可编程商用保偏光纤熔接机 (Fujikura FSM-100P+) 作为制作平台来对 MCF 进行拉锥处理。首先,我们将熔接机的 V 形槽进行初始化对准,以避免侧向应力对光纤锥区的影响;然后,剥去 MCF 的涂覆层,用两个夹具分别将 MCF 夹紧固定,防止拉锥时产生相对位移;接着,我们使用计算机程序控制熔接机开始电弧放电预热 MCF,并将 MCF 从加热区域以一定加速度从一侧拉出,同时从另一侧匀速送料,完成线性拉锥。经过拉锥后, MCF 各纤芯中的信号光将会不同程度地耦合到其他纤芯中,在不同纤芯中形成不同的功率分布。我们可以选择合适的输入、输出纤芯构成环路,降低系统整体的损耗。

2.1 系统结构

实验装置图如图 1 所示。图 1 (a) 中,扇入设备的纤芯 1 为信号光的输入纤芯,纤芯 2 为输出纤芯。扇入、扇出设备的纤芯 3 与纤芯 4 分别两两连接,构成环路结构,其中两端的纤芯 3 构成第 1 个环路,两端的纤芯 4 构成第 2 个环路。信号光从扇入设备的纤芯 1 输入后,经 MCF 拉锥区域时将同时耦合到扇出设备的纤芯 1 和纤芯 3 中,而纤芯 3 又经过掺饵光纤放大器 (EDFA) 与扇入设备的纤芯 3 相连,从而形成第 1 个 IIR-MPF。而扇出设备的纤芯 1 作为第 1 个 IIR-MPF 的输出纤芯,又和纤芯 2 相连,相当于扇出设备的纤芯 2 作为第 2 个 IIR-MPF 的输入纤芯,即完成 2 个 IIR-MPF 的级联结构。第 2 个 IIR-MPF 则是由纤芯 4 构成的环路形成的,最终由扇入设备的纤芯 2 作为输出纤芯。图 1 (b) 中,扇入、扇出设备的纤芯 1 分别是信号光的输入纤芯和输出纤芯。两个 IIR-MPF 的环路结构分别由扇入、扇出设备的纤芯 3 和纤芯 5 来

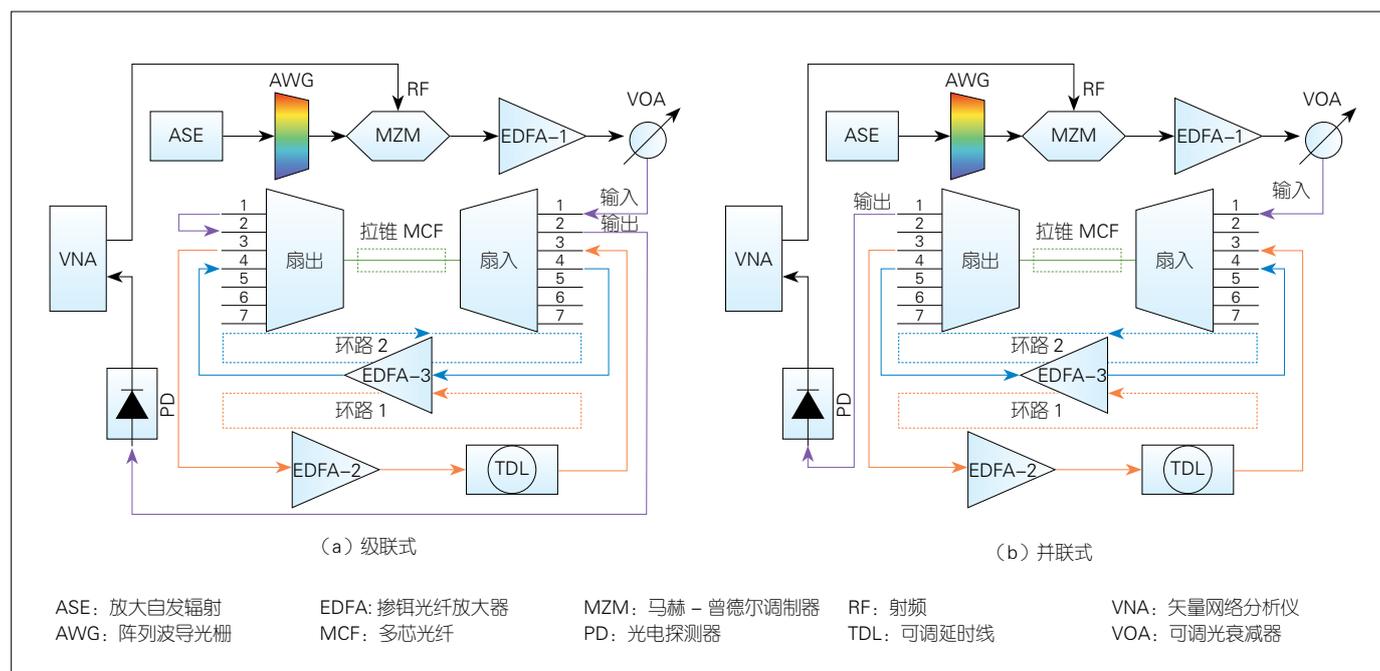
构成,它们共享同样的输入和输出,因此,两个 IIR-MPF 是并联结构。

2.2 实验结果

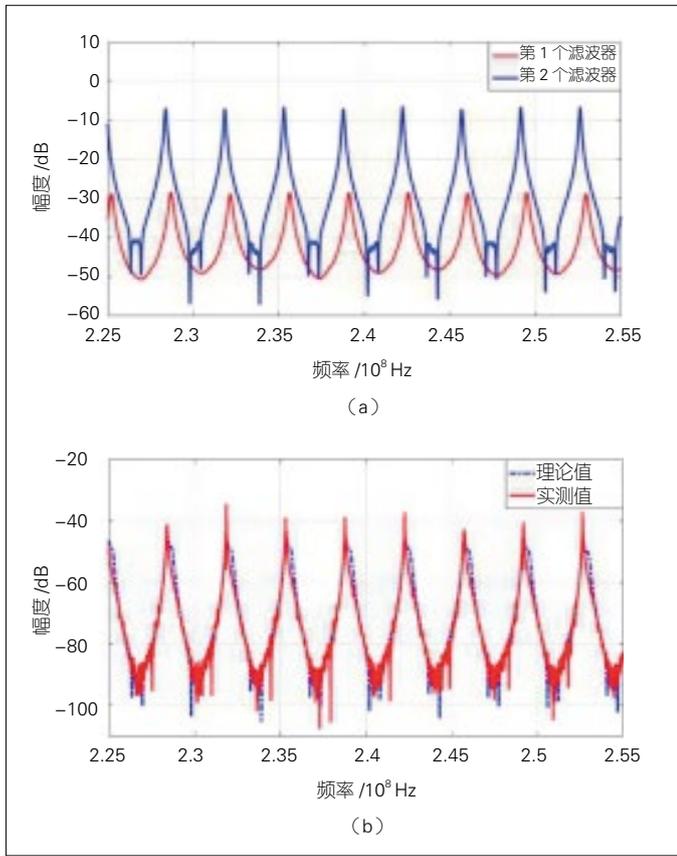
图 2 和图 3 分别展示了级联式和并联式 IIR-MPF 的幅频响应曲线。由图中可以看出,无论是级联式还是并联式 IIR-MPF,理论仿真得到的幅频响应曲线和实际测量所得曲线基本一致,且 Q 值分别达到了 143 和 136。同时通过改变环路延时 T 的大小以及每一路功率的大小可以完成 MPF 的调谐与重构,因此这两种结构均具有可调谐性与可重构性。理论上,利用更多的纤芯构成 IIR-MPF 可以获得更高的 Q 值。

3 基于 MCF 的有限冲激响应微波光子滤波器 (FIR-MPF)

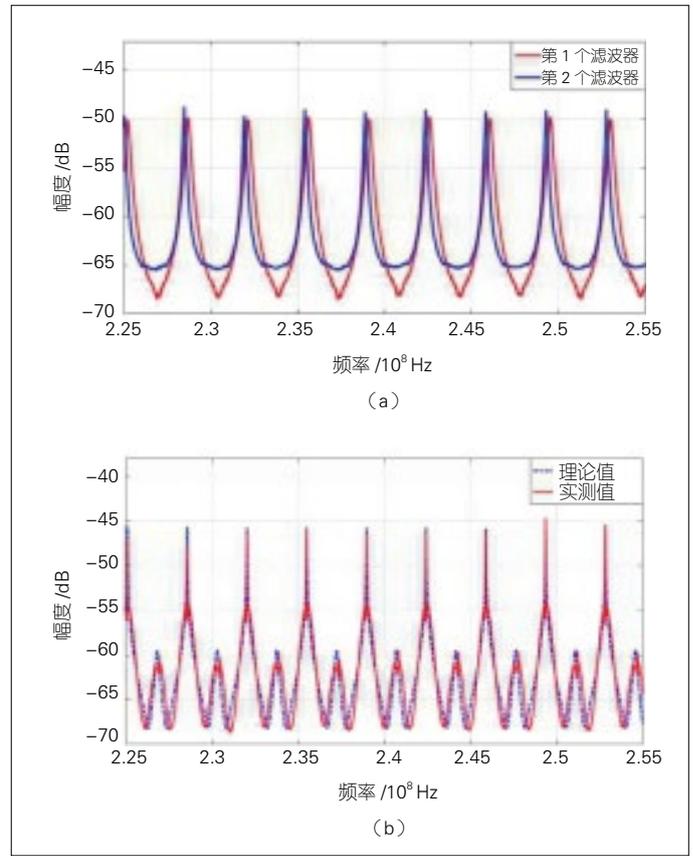
在上一节内容的基础上,为了拓宽光信号处理的可重构性和灵活性,我们将波长维度和空间维度同时引入光信号处理之中,能在两个维度分别实现相应的信号处理功能,因此,



▲图 1 种基于 MCF 的无限冲激响应微波光子滤波器实验装置图



▲图2 级联式无限冲激响应微波光子滤波器的幅频响应曲线



▲图3 并联式无限冲激响应微波光子滤波器的幅频响应曲线

我们提出将 LPG 和 MCF 结合在一起, 利用 LPG 的波长选择性和 MCF 的 SDM 特性分别在波长维度和空间维度实现可重构的 FIR-MPF^[14]。FIR-MPF 的原理为: 电光调制器先将射频信号调制到光载波上, 然后该光信号经过 $1 \times N$ 耦合器分成 N 路, 且两路之间具有相同时间延迟差 T , 即构成一个 N 抽头的滤波器结构, 再经过一个 $N \times 1$ 耦合器将 N 路信号叠加在一起, 最终经过光电探测器转换为 RF 信号^[15]。

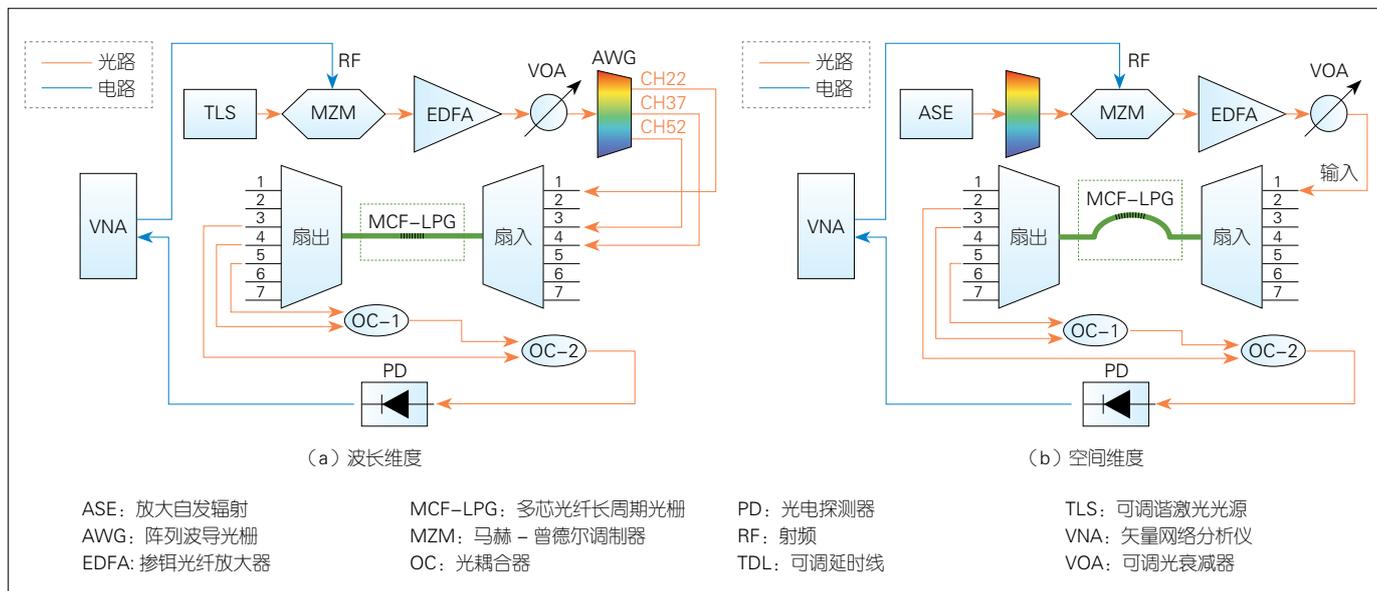
利用 MCF-LPG 能够实现信道间的功率耦合和切换, 从而完成基于 MCF 的 FIR-MPF 重构功能。其原理如下: 当工作波长处于 LPG 的谐振波段时, 功率耦合将发生在纤芯模和包层模之间。MCF 不同纤芯中的 LPG 可以将其各自的纤芯模与共享包层模式耦

合, 此时, 一个纤芯中的功率可以通过包层模式转移到另一个纤芯。而当温度、应力等外界物理量发生改变时, 光栅局部区域的折射率和光栅周期会发生改变, 光栅的光谱会发生漂移。当 MCF-LPG 发生定向弯曲时, 不同位置的外层纤芯将承受来自不同方向和曲率半径上的切向应力, 造成不同芯中的 LPG 实际弯曲半径并不相同, 受到的切向应力大小与方向角和芯间距有关。在 MCF-LPG 发生定向弯曲的情况下, 不同纤芯的透射谱会产生大小不同或者方向不同的漂移, 原本交叠的谐振波段会发生错位^[16], 而光谱的交叠程度和耦合系数的变化会影响芯间耦合功率的大小^[17]。通过定向弯曲 MCF-LPG, 我们可以控制芯间耦合通道的传输损耗。进一步地, 通

过精确控制弯曲方向和弯曲半径, 使 MCF-LPG 在平直和定向弯曲的两种状态进行切换, 可实现在不同纤芯中定向的功率分配并控制芯间耦合功率, 进而实现可重构的芯间信号切换。

3.1 系统结构

实验装置图如图 4 所示。图 4 (a) 中, 阵列波导光栅 (AWG) 输出通道的 CH22 (1 559.95 nm)、CH37 (1 547.72 nm) 和 CH52 (1 535.82 nm) 分别与扇入设备的纤芯 1、4 和 3 相连。扇出设备的纤芯 3、4 和 5 作为输出纤芯, 这 3 路输出光信号经过 2 个光耦合器 (OC) 合并为一路被光电探测器接收。图 4 (b) 中, CH45 (1 541.35 nm) 作为纤芯 1 的谐振波长, 输入到纤芯 1 中, 然后扇出设备的纤芯 2、3 和 5 作



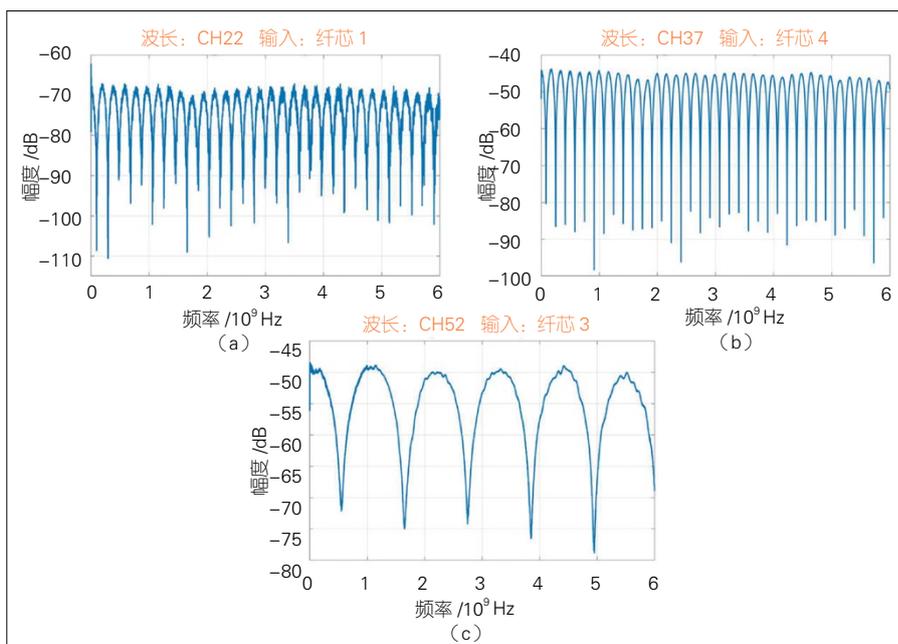
▲图 4 两种基于 MCF-LPG 的有限冲激响应微波光子滤波器实验装置图

为输出纤芯。对 MCF-LPG 进行定向弯曲后, 便可实现不同输出信道的切换。两个实验中都用到了矢量网络分析仪 (VNA) 来分析 MPF 的幅频响应曲线。

3.2 实验结果

图 5 展示了不同工作波长和输入纤芯下的 FIR-MPF 的幅频响应曲线。

图 6 展示了 MCF-LPG 不同弯曲曲率和方向下的 FIR-MPF 的幅频响应曲线。由图 5 和图 6 可以看出, 调整工作波长和改变定向弯曲 MCF-LPG 的曲率与方向, 都实现了基于 MCF 的可重构的两抽头 MPF, 分别得到了 3 条不同的幅频响应曲线, 因此通过实验证明了 3 个纤芯之间可以实现定向芯间信号切换, 从而达到空间信道分配的目标。此外, 我们希望通过使用 MCF 中更多的纤芯并提高调谐机制的可靠性来获得可重构的多抽头滤波器。MCF 固有的信道并行特性使其具有紧凑性、大带宽、功耗低等优势。我们相信这种方法为微波光子系统及网络中的可重构光子信号处理提供了一种新的解决方案, 因其具有低成本和高



▲图 5 不同工作波长和输入纤芯下的有限冲激响应微波光子滤波器的幅频响应曲线

效率的特点。

4 基于 MCF 的可重构空分信道交换通信系统

在前述方案的基础之上, 我们还尝试将 MCF-LPG 和定向弯曲系统运用于大容量通信系统, 在 SDM 相干传输系统中实现了可重构芯间信号切换,

消光比高达 39 dB, 传输总容量达到 1.344 Tbit/s^[18]。

4.1 系统结构

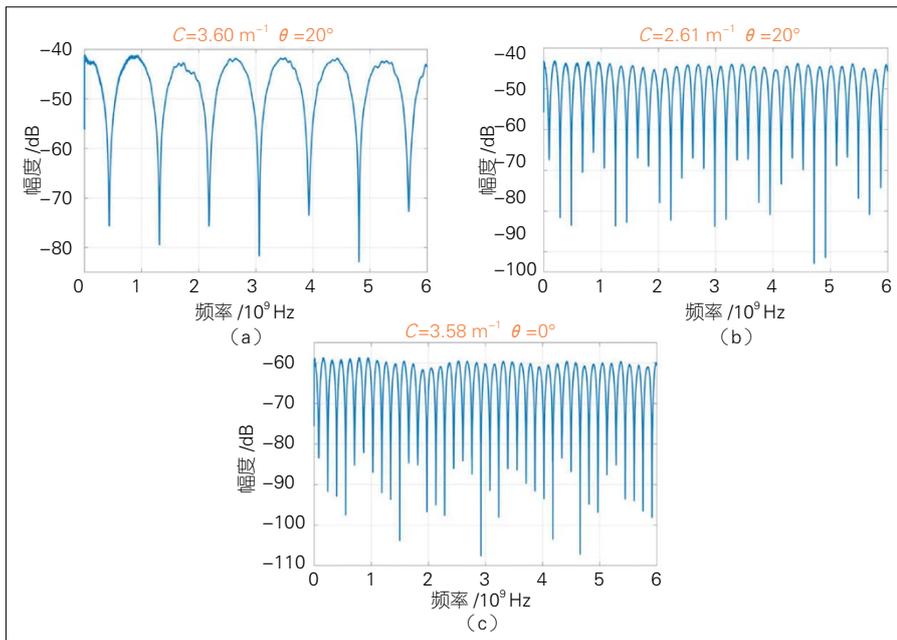
为了测试可重构芯间信号切换的传输性能, 我们搭建了大容量 SDM 相干传输系统, 系统结构如图 7 所示。将 6 个线宽低于 100 kHz 的窄线宽激

光器 (LD) 作为光源, 其波长分别为 1 553.33 nm、1 552.52 nm、1 551.72 nm、1 550.92 nm、1 550.12 nm 和 1 549.32 nm (CH30 到 CH35, 信道间隔为 100 GHz)。使用一个阵列波导光栅将 6 个波长信道同时送入双偏振同相

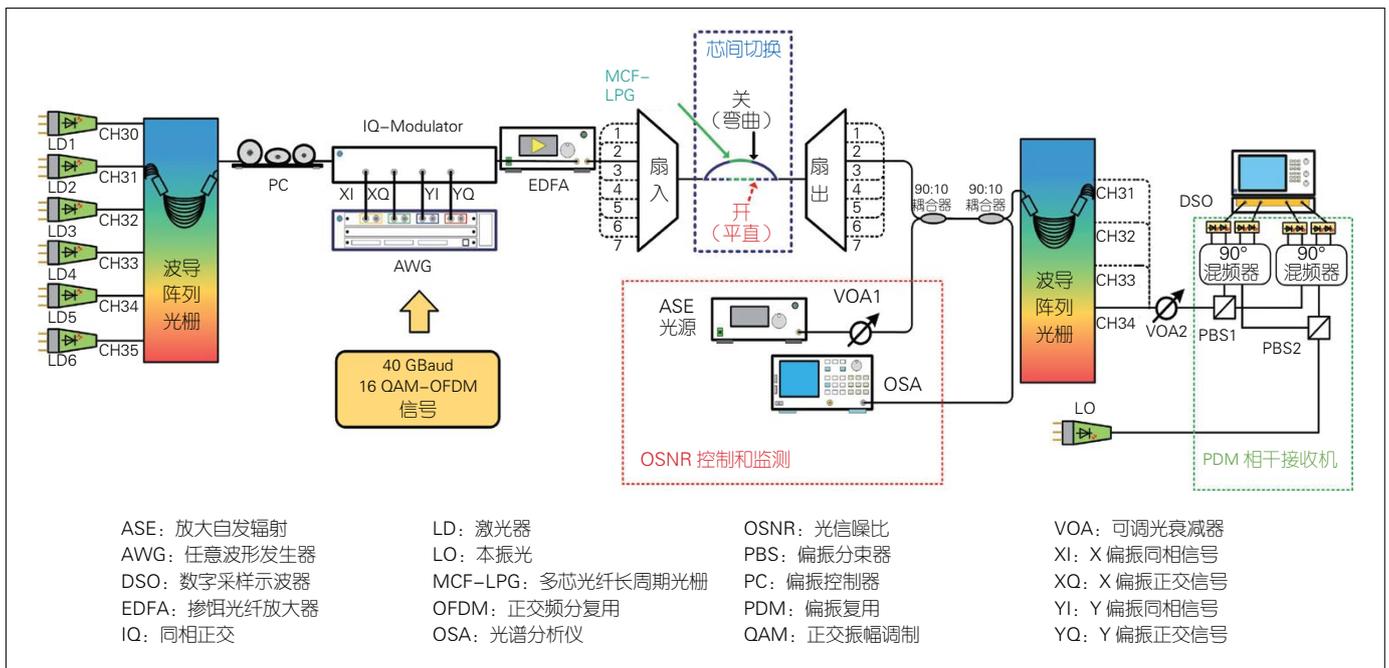
正交 (IQ) 调制器中, 调制信号为离线产生的正交频分复用 (OFDM) 信号, 长度为 $2^{15}-1$ 的随机比特序列 (PRBS) 映射入 100 个 16 QAM 子载波, 逆傅里叶变换 (IFFT) 的点数为 128, 循环前缀为 10%。通过 IFFT 之后的信号

实部和虚部再经过采样率为 28 GSam/s 的任意波形发生器 (AWG) 进行数模转换, 经过微波放大器放大后驱动双偏振 IQ 调制器, 单波长比特速率则为 28 GSam/s \times 4 \times 2=224 Gbit/s, 6 个波长信道的系统总速率为 1.344 Tbit/s。调制信号经过 EDFA 放大之后, 通过扇入设备输入 MCF 的纤芯 6 中。经过 MCF-LPG 后, 在输出端由扇出设备输出的信号和放大自发辐射 (ASE) 噪声源耦合用于调节接收端光信噪比。阵列波导光栅将不同波长的光信号解调输出, 通过可调光衰减器衰减至 -12 dBm 的接收光功率后输入相干光接收机。最终, 信号由采样率为 80 GSam/s 的数字采样示波器接收并进行离线处理。为了提高相干传输系统的传输性能, 在数字域采用了恒幅度零自相关序列 (CAZAC) 预编码用于降低峰均比 (PAPR), 提升接收机灵敏度, 增强抗色散性能并实现子载波间的信噪比均衡^[19], 同时也采用了预失真技术降低微波放大器器件衰落的影响^[20]。

实验所用 MCF-LPG 的光栅周期



▲图 6 多芯光纤长周期光栅不同弯曲曲率和方向下的有限冲激响应微波光子滤波器的幅频响应曲线



▲图 7 可重构芯间信号切换测试系统装置图

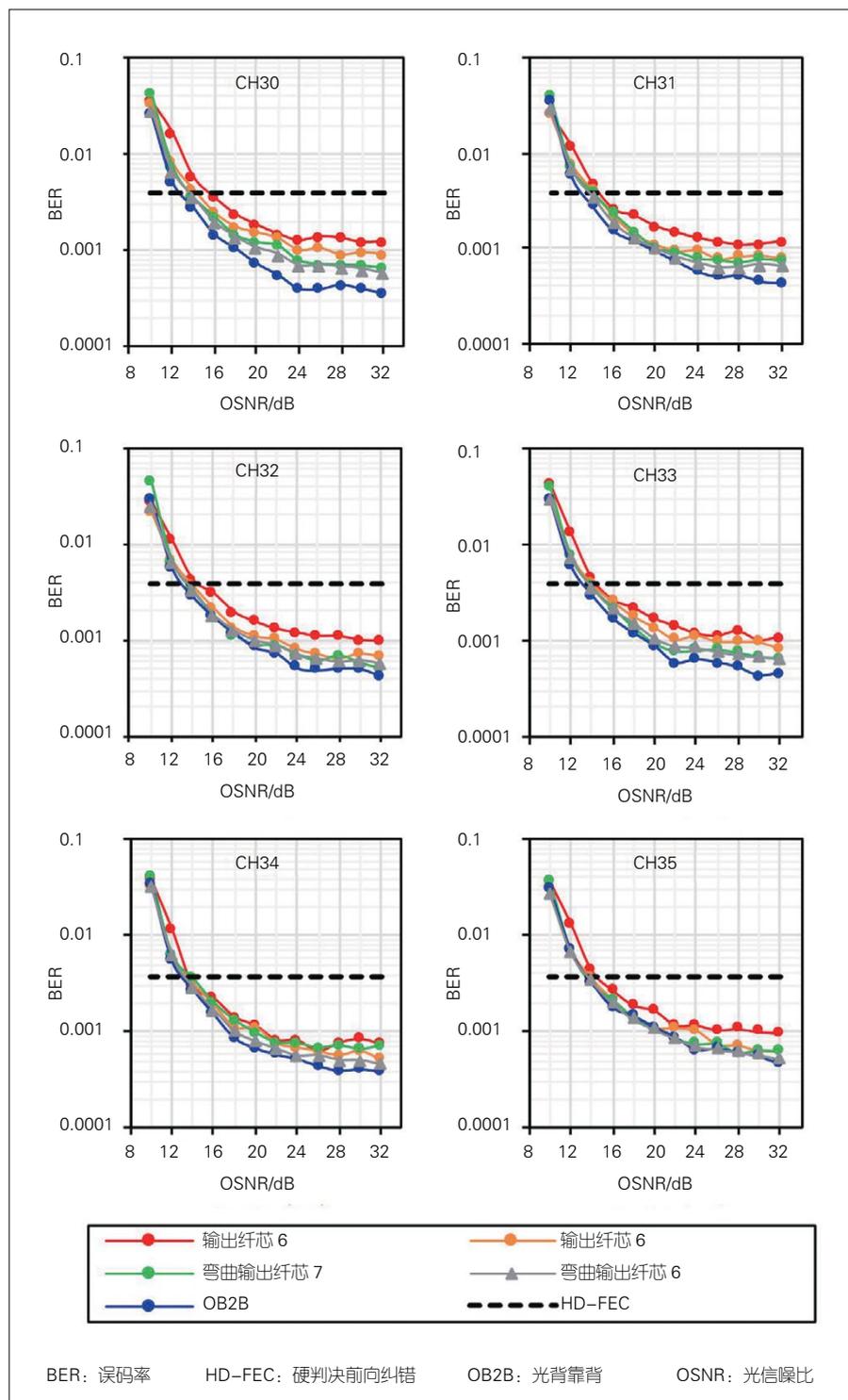
为 $505 \mu\text{m}$ 。我们分别在其保持平直和弯曲方向角为 30° 、弯曲半径为 15 cm 两种状态下，测量得到纤芯 5、6 和 7 的透射谱。结果表明，3 个不同芯的谐振波长发生了不同程度的漂移：纤芯 5 的 LPG 主谐振波长由 1528.6 nm 红移至 1542.7 nm ，纤芯 6 的 LPG 主谐振波长由 1547 nm 蓝移至 1542.4 nm ，纤芯 7 的 LPG 主谐振波长由 1543.4 nm 蓝移至 1533.6 nm 。同时，所有的谐振波长消光比均有 $3\sim 7 \text{ dB}$ 的降低，说明纤芯模与包层模之间的耦合变弱。对于从纤芯 6 输入、纤芯 5 和 7 输出的芯间耦合信道，我们分别在 MCF-LPG 平直和定向弯曲的情况下测量了其传输谱。结果表明，在 MCF-LPG 保持平直时，在整个 C 波段内，从纤芯 6 输入的光信号都能够高效地耦合至纤芯 5 和 7。在纤芯 6 到纤芯 7 的 1548.3 nm 处存在最低耦合损耗为 11.3 dB 。而当 MCF-LPG 发生弯曲方向角为 30° 、弯曲半径为 15 cm 的定向弯曲时，由于波长漂移和耦合系数减小，芯间耦合信道的传输损耗大大升高，纤芯 6 输入的光信号几乎不再耦合至其他纤芯。在 MCF-LPG 平直和定向弯曲两种状态下，最大切换消光比为 39 dB ，相应的空间信道从纤芯 6 切换至纤芯 7，波长为 1556.6 nm 。

4.2 实验结果

在 MCF-LPG 保持平直和定向弯曲状态下，我们分别测量了 6 个波长信道的误码率曲线，如图 8 所示。当 MCF-LPG 保持平直状态时，从纤芯 6 输入的光信号被切换至纤芯 5 和 7，此时芯间切换处于开通状态。当 MCF-LPG 发生弯曲方向角为 30° 、弯曲半径为 15 cm 的定向弯曲时，只有纤芯 6 输出的光功率能够达到接收机的灵敏度要求，而纤芯 5 和 7 输出的信号已经被完全淹没在噪声中，此时芯间切

换处于关断状态。与光背靠背 (OB2B) 传输结果相比，所有芯间切换的波长信道达到 7% 的前向纠错码门限的光信噪比差异仅为 1 dB 左右。实验结果

证明，当 MCF-LPG 保持平直状态时，MCF 不同纤芯中的 LPG 可以将其各自的纤芯模与共享包层模式耦合，一个纤芯中的信号功率可以通过包层模式



▲图 8 可重构芯间信号切换误码率曲线图

转移到其他多个纤芯, 光信号可以在 C 波段实现多个芯间的信号切换。当 MCF-LPG 发生定向弯曲时, 由于谐振波长的漂移和耦合系数的减小, 芯间耦合信道的传输损耗大大升高, 芯间切换被关断, 光信号几乎无耦合地在输入纤芯中继续传播, 因此, MCF-LPG 在这两种状态下可以有效地实现芯间信号切换, 同时不会降低 SDM 相干传输系统的信号质量, 并与现有波分复用系统完全兼容。我们相信, 这样一种全光纤型智能可重构的芯间信号耦合与切换方案, 能够给未来 SDM 通信网络提供更加灵活的网络配置功能。

5 结束语

面对 MCF 在未来 SDM 网络中更加丰富和灵活的网络配置需求, 我们研究全光纤型智能可重构的芯间信号耦合与切换方案, 并在此基础上探索可重构的光子信号处理应用和大容量的通信应用。在光子信号处理应用方面, 我们提出基于 MCF 和可编程拉锥技术实现的级联和并联式的 IIR-MPF, Q 值分别达到 143 和 136。同时, 我们也提出基于 MCF-LPG 在波长和空间两个维度分别实现了可重构 FIR-MPF, 完成了 3 种两抽头滤波器的切换。此外, 在大容量通信应用方面, 我们将 MCF-LPG 和定向弯曲系统应用于 SDM 相干光传输系统中, 实现了可重构的芯间信号切换。实验结果表明该方案具有高达 39 dB 的切换消光比, 传输总容量达 1.344 Tbit/s。

参考文献

- [1] SOMA D, WAKAYAMA Y, BEPPU S, et al. 10.16-Peta-B/s dense SDM/WDM transmission over 6-mode 19-core fiber across the C+L band [J]. Journal of lightwave technology, 2018, 36(6): 1362-1368. DOI: 10.1109/JLT.2018.2799380
- [2] FENG Z H, XU L, WU Q, et al. Ultra-high capacity WDM-SDM optical access network with self-homodyne detection downstream and 32 QAM-FBMC upstream [J]. Optics express, 2017, 25(6): 5951. DOI: 10.1364/OE.25.005951
- [3] NELSON L E, FEUER M D, ABEDIN K, et al. Spatial superchannel routing in a two-span ROADM system for space division multiplexing [J]. Journal of lightwave technology, 2014, 32(4): 783-789. DOI: 10.1109/JLT.2013.2283912
- [4] FONTAINE N K, HARAMATY T, RYF R, et al. Heterogeneous space-division multiplexing and joint wavelength switching demonstration [C]//Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2015: Th5C. 5. DOI: 10.1364/OFC.2015.Th5C.5
- [5] DING Y H, KAMCHEVSKA V, DALGAARD K, et al. Reconfigurable SDM switching using novel silicon photonic integrated circuit [J]. Scientific reports, 2016, 6(1): 39058. DOI: 10.1038/srep39058
- [6] FERNANDES G M, MUGA N J, ROCHA A M, et al. Switching in multicore fibers using flexural acoustic waves [J]. Optics express, 2015, 23(20): 26313. DOI: 10.1364/oe.23.026313
- [7] ALMEIDA T, SHAHPARI A, ROCHA A, et al. Experimental demonstration of selective core coupling in multicore fibers of a 200 Gb/s DP-16 QAM signal [C]//Proc. Optical Fiber Communication Conf. (OFC). 2016. DOI: 10.1364/OFC.2016.Tu3I.4
- [8] LI B, FU S, TANG M, et al. Role of wavelength dependent sensitivity in affecting the crosstalk mitigation of homogeneous multicore fiber: an analytical estimation approach [J]. Optics express, 2014, 22(12): 14127-14134. DOI: 10.1364/OE.22.014127
- [9] ZHAO Z, TANG M, FU S, et al. All-solid multicore fiber-based multipath Mach-Zehnder interferometer for temperature sensing [J]. Applied physics B: lasers & optics, 2013, 112(4): 491-497. DOI: 10.1007/s00340-013-5634-8
- [10] GAN L, ZHOU J, SHEN L, et al. Ultra-low crosstalk fused taper type fan-in/fan-out devices for multicore fibers [C]//Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2019: Th3D. 3. DOI: 10.1364/OFC.2019.Th3D.3
- [11] GASULLA I, BARRERA D, HERVAS J, et al. Spatial division multiplexed microwave signal processing by selective grating inscription in homogeneous multicore fibers [J]. Scientific reports, 2017, 7: 41727. DOI: 10.1038/srep41727
- [12] JIN Y B, FENG X H, LI F, et al. Gigahertz single source IIR microwave photonic filter based on coherence managed multi-longitudinal-mode fiber laser [J]. Optics express, 2015, 23(4): 4277. DOI: 10.1364/OE.23.004277
- [13] HUO L, GAN L, SHEN L, et al. IIR microwave photonic filters based on homogeneous multicore fibers [J]. Journal of lightwave technology, 2018, 36(19): 4298-4304. DOI: 10.1109/JLT.2018.2830399
- [14] HUO L, GAN L, SHEN L, et al. Reconfigurable microwave photonic filter based on long period gratings inscribed in multicore fibers [J]. IEEE photonics journal, 2019, 11(1): 1-8. DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2890735
- [15] YAO J. Microwave photonics [J]. Journal of lightwave technology, 2009, 27(3): 314-335. DOI: 10.1109/JLT.2008.2009551
- [16] ZHANG H, WU Z, SHUM P P, et al. Fiber Bragg gratings in heterogeneous multicore fiber for directional bending sensing [J]. Journal of optics, 2016, 18(8): 085705. DOI: 10.1088/2040-8978/18/8/085705
- [17] SAFFARI P, ALLSOP T, ADEBAYO A, et al. Long period grating in multicore optical fiber: an ultra-sensitive vector bending sensor for low curvatures [J]. Optics letters, 2014, 39(12): 3508. DOI: 10.1364/OL.39.003508
- [18] HUO L, WANG R, TANG M, et al. Reconfigurable inter-core signal switching within multicore fibers based on long-period gratings [J]. Journal of lightwave technology, 2019, 37(24): 6025-6032. DOI: 10.1109/JLT.2019.2945178
- [19] FENG Z H, WU Q, TANG M, et al. Dispersion-tolerant DDO-OFDM system and simplified adaptive modulation scheme using CAZAC precoding [J]. Journal of lightwave technology, 2016, 34(11): 2743-2751. DOI: 10.1109/JLT.2016.2547443
- [20] GAO Y, YU J, XIAO J, et al. Direct-detection optical OFDM transmission system with pre-emphasis technique [J]. Journal of lightwave technology, 2011, 29(14): 2138-2145. DOI: 10.1109/JLT.2011.2154299

作者简介



唐明, 华中科技大学教授、博士生导师; 主要研究方向为高速光纤通信系统; 先后主持国家自然科学基金优秀项目、国家自然科学基金重点项目、国家“863”计划主题项目以及重点研发计划课题等; 发表论文 80 余篇(近 5 年 60 篇), Google Scholar 引用超过 2 500 次, H 指数为 24。



霍亮, 华中科技大学在读博士研究生; 研究方向为基于空分复用技术的微波光子信号处理与应用。