

引用本文: 杨林婕, 邵宇丰, 王安蓉, 等. 异构无源光接入网络中光纤传能技术的研究进展[J]. 光通信技术, 2025, 49(1): 107–112.

异构无源光接入网络中光纤传能技术的研究进展

杨林婕¹, 邵宇丰^{2*}, 王安蓉¹, 朱耀东², 柳海楠¹, 李文臣¹, 胡文光¹, 陈超¹

(1. 重庆三峡学院 电子与信息工程学院, 重庆 404100; 2. 嘉兴大学 信息科学与工程学院, 浙江 嘉兴 314001)

摘要: 为了提升信息接入容量和信号收发质量, 异构无源光接入网络中的远端基站单元越来越趋于微型化和密集化。光纤传能(PWoF)技术通过光纤将能量输送至远端单元, 有望成为接入端供电的首选方案。在无源光接入网络中集成 PWoF 技术, 可在单根光纤上同时传输信息与能量, 具有一定的实际应用价值。综述了在无源光接入网络中应用不同波分复用、空分复用结构的 PWoF 方案, 并比较分析了各技术方案的应用特点、实现功能和研究进展, 最后探讨了 PWoF 在其演进过程中遇到的挑战以及前景展望。

关键词: 无源光网络; 光纤传能; 远端单元; 传输效率; 研究进展

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)01-0107-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.01.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress on power over fiber technology in heterogeneous passive optical access networks

YANG Linjie¹, SHAO Yufeng^{2*}, WANG Anrong¹,

ZHU Yaodong², LIU Hainan¹, LI Wenchen¹, HU Wenguang¹, CHEN Chao¹

(1. College of Electronics and Information Technology, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China;

2. College of Information Science and Engineering, Jiaxing University, Jiaxing Zhejiang 314001, China)

Abstract: To enhance the information access capacity and signal reception and transmission quality, the remote base station units in heterogeneous passive optical access networks are increasingly becoming miniaturized and densely distributed. Photonic wireless power over fiber(PWoF) technology, which transmits energy via optical fiber to the remote unit, is expected to be the preferred solution for powering the access end. Integrating PWoF technology into passive optical access networks can transmit information and energy simultaneously on a single optical fiber, with certain practical application value. This paper reviews different wavelength-division multiplexing and space-division multiplexing structures of PWoF schemes in passive optical access networks, compares and analyzes the application features, functional realization, and research progress of each technology scheme, and finally discusses the challenges faced by PWoF in its evolution process and prospects.

Key words: passive optical network, power over fiber, remote unit, transmission efficiency, research progress

收稿日期: 2024-03-04。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61107064)资助; 重庆市教委科学技术研究计划重大资助项目(KJZD-M201901201)资助; 浙江省重点研发计划项目(2017C01043)资助; 重庆市高校创新团队建设计划项目(KJTD201320)资助; 重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0038、cstc2016jcyjA0246)资助; 重庆市三峡库区地质环境监测与灾害预警重点实验室开放基金重大项目(ZD2020A0104)资助。

作者简介: 杨林婕(1998—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 现就读于重庆三峡学院电子与信息工程学院电磁场与微波技术, 主要研究方向为光载无线通信、自由空间光通信等。

*** 通信作者:** 邵宇丰(1977—), 男, 湖南长沙人, 博士后, 教授, 主要研究方向为下一代宽带接入系统、光载无线通信、人工智能辅助高级信号处理。



0 引言

随着第五代(5G)移动通信时代的到来, 无线信号接入终端所使用的频率不断提高, 与此同时, 信号的穿透能力却相对减弱, 这直接导致了基站单元的有效覆盖范围显著减小。为了解决覆盖范围缩小的问题, 基站的部署逐渐趋向于更加密集和小型化, 这反过来又增加了为这些微基站铺设传统供电线路的难度与成本。为此, 一种结合了光纤数据信号与能源同传的技术——光纤传能(PWoF)技术, 成为了应对上述挑战的一种解决方案。PWof 技术的核心在于中心局(CO)能够利用单一光纤来同时传输信息与能量, 即所需的供电光能是由 CO 内部的高功率激光器(HPFL)提供

的;在接收端,PWoF系统将信号光与供电光分开处理。通过集成PWof技术,异构无源光接入网络^[1-2]得以实现从中心局向基站单元同时传送信息和能量(下文简称“信能”)的功能,形成了一种信能同步传递的工作模式^[3],这不仅有助于降低基站建设与运营的成本,同时也为通信行业提供了全新的能量传输应用途径^[4-5]。

实际应用中,随着各种光信号复用技术的发展,异构无源光接入网络的部署方案中主要涉及波分复用(WDM)、空分复用(SDM)这2种结构。本文分析异构无源光接入网络中几种基于WDM和SDM的关键技术的原理、应用特点、实现功能及其研究进展,并探讨PWof技术在发展过程中面临的挑战及其未来前景。

1 WDM-PWoF 技术原理与发展

1.1 采用多模光纤(MMF)的 WDM-PWoF 方案

2008年,WAKE D等人^[6]提出一种采用MMF的WDM-PWoF方案,如图1所示。在CO,HPFL产生的供电光与信号发生器(VSG)和激光器(LD)产生的载波光信号通过WDM设备耦合至MMF。在远端天线单元(RAU),WDM设备用于分离信号光与供电光;供电光通过光伏转换器(PVC)转换为电能后,经电压调节器(VR)送往3.3 V的双电压逆变器(VDI)及3/2降压电压转换器(VC),分别给光电二极管(PD)和低噪声信号放大器(LNA)供电。信号光则经PD和LNA转换为电信号,输出至信号分析仪(VSA)。在此过程中,当HPFL输出的功率为125 mW时,到达PVC的功率为60 mW,光功率传输效率达到了48%,而通过光/电转换效率为56%的PVC可产生33.6 mW的电能。尽管此方案中复用器的插入损耗较低,但在尾纤芯径为62.5 μm 的HPFL与WDM设备之间连接时,仍然产生了2 dB的能量损耗,整个传输路径中光能量的总损耗为3.2 dB。尽管如此,相比研究者在2007年提出的信能同传系统^[7],使用WDM-PWoF结构的系统具有更简洁、更安全并且易于维护的优点。

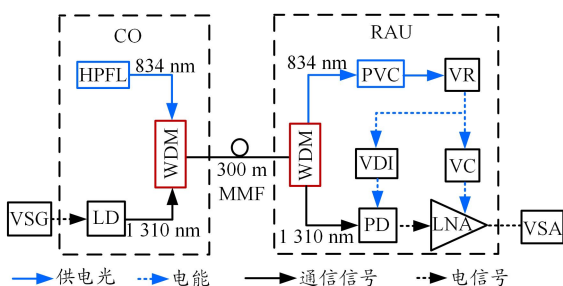


图1 采用MMF的WDM-PWoF方案结构图

1.2 家庭网络中的 WDM-PWoF 方案

2012年,LETHIN C等人^[8]利用MMF具备的高带宽特性,设计出一种适用于家庭网络环境下的多业务接入系统,该系统支持能量自给自足,其架构如图2所示。在CO,由VSG和垂直腔面发射激光器(VCSEL)生成中心频率为850 nm的射频(RF)信号光,而连续波(CW)激光器则产生中心频率为980 nm、功率达500 mW的能量光,另外,激光二极管(LD)还发出1 300 nm的数字信号。系统采用了粗波分复用(CWDM)结构,下行链路通过多模光纤同时向RAU传输数字信号、RF信号以及高强度光能;上行链路则由数字信号与基带信号构成。在RAU端,射频信号通过PD转换为电信号,并经过LNA放大后,通过天线发送到用户终端。能量光到达PVC时,其光功率为120 mW,其中一半被转化为电能。数字信号在转换成电信号后,与基带信号一起返回至CO端。尽管光能转换效率只有24%,但在能量与信息同时传输过程中,数字信号与射频信号几乎未遭受任何损失,误码率(BER)接近 10^{-12} 。由此可以看出,WDM-PWoF技术在宽带接入网中有巨大的应用潜力^[9]。

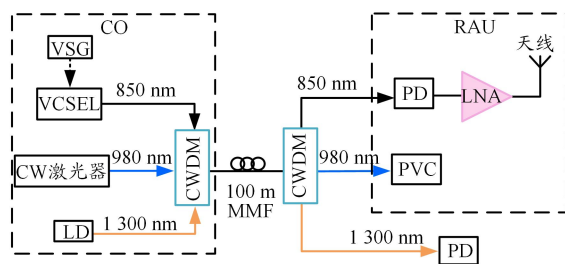


图2 家庭网络中的WDM-PWoF方案架构图

1.3 采用中心发射(OL)、偏移发射(CL)技术的 WDM-PWoF 实验系统

由于MMF具有较大的芯径,无需大规模地重新铺设新的光纤链路即可在实际应用中部署,因此,WDM-PWoF技术通常选择MMF作为传输介质。但是,模式色散和输入光信号间的串扰显著地降低了能量和信息传输的效率。为了解决这些问题,研究者们开发了CL^[10-11]与OL^[12]技术,即通过调整光信号进入MMF纤芯部的位置,来控制导出的模式为高阶模式或低阶模式。

2018年,KUBOKI H等人^[13]建立了一个采用OL、CL技术的WDM-PWoF实验系统,其结构如图3所示。他们使用铌酸锂调制器(LNM)对信号源(SG)提供的信号进行了调制,并将其加载到了分布反馈激光器(DFB-LD)上。经过调制的数据信号随后通过隔离器

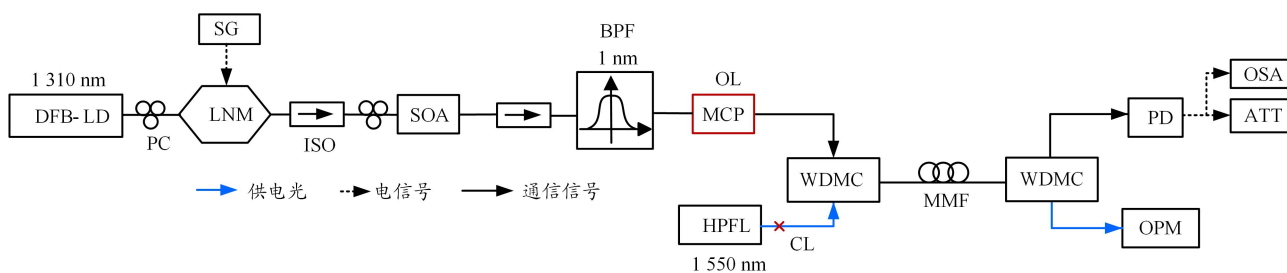


图3 采用OL、CL技术的WDM-PWoF实验系统结构图

(ISO)、偏振控制器(PC)、半导体放大器(SOA)、带通滤波器(BPF)处理后,被送入商用模式调节贴片(MCP)。借助 OL 技术,数据信号得以从 MCP 发射至光纤链路,并通过应用CL技术转接到多模输出,以此确保能量光以低阶模式的形式传输到多模链路中。数据信号与能量光通过 WDM 多模光耦合器(WDMC)整合在一起,随后传输至 2 km 或 4 km 长的 MMF 中。接收端的能量光功率由光功率计(OPM)测量,而数据信号则在通过 PD 转换为电信号之后,经衰减器(ATT)再由光谱分析仪(OSA)进行分析。当能量光功率设定为 9.7 W 时,经 2 km 和 4 km 的 MMF 传输后,WDMC 接收到的最大功率分别为 7.3 W 和 6 W。通过计算 HPFL 输出与 OPM 测量输入的功率比,得出 2 km 和 4 km 的功率传输效率分别高达 75% 和 61%。因此,无论是在 2 km 还是 4 km 的传输距离下,只要能量光功率超过 2 W,使用 OL 技术之后的数据信号接收质量都会有所提高,并且误差矢量幅度(EVM)始终低于 3%。

2 SDM-PWoF 技术原理与发展

2.1 采用多芯光纤(MCF)的 SDM-PWoF 方案

2017 年,UMEZAWA T 等人^[14-15]利用一种包含 7 根独立芯的光纤进行了点对点的信息和能量传输实验,实验方案如图 4 所示。在这项研究中,3 根纤芯用于传输总共 800 mW 的馈电光,而剩余的 4 根纤芯则用来传输信号光。通过这种方式,在 RAU 端成功获取了 50 mW 的电能,并且在 BER 为 1×10^{-3} 的情况下,实现了 12 Gb/s 的高速数据传输。

2.2 兼顾共享与专用的 SDM-PWoF 方案

2019 年,VAZQUEZ C 等人^[16-17]提出了 2 种不同的架构设计来处理馈电光和数据信号在共享以及专用核心场景下的传输问题,这些设计均基于七芯 MCF 技术。在此架构中,扇入设备负责向每一根光纤芯提供馈电光与数据信号,而扇出

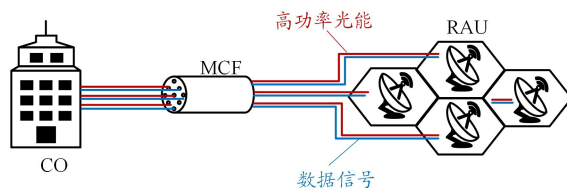


图4 采用MCF的SDM-PWoF方案

设备则负责从各芯中分离出相应的信号,并进一步将分离得到的能量通过 PVC 或 PD 转换成电能。经过 5 km 长的 MCF 传输后,对于共享核心场景而言,抵达远程射频头(RRH)处的光功率只保留了最初的 10%,相比之下,在专用核心场景中这一比例则提高到了 90%。

2021 年,LOPEZ-CARDONA J D 等人^[18]进一步发展了这一技术,设计了一种兼顾共享与专用的 SDM-PWoF 方案,其结构如图 5 所示。在该系统中,频率为 10.25 GHz 的本振信号(LO)首先由 LD 产生的光载波进行调制,此过程由 LNM₁ 完成,接着 LNM₂ 用于调制从基带处理单元(BBU)发出的 5 GHz 中频电信号。系统内还包含一个由微控制器管理的主板(MB),该 MB 具有一个内置辅助通信通道——中控信号通道。由 HPFL 产生的高功率光信号在经过分光器(sp₁)之后,会根据中控信号指令由开关(SW)导向至共享或专用场景。在共享模式下,数据信号与高功率光信号共同通过通道 C₇ 传播;而在专用模式下,C₁ 仅用于发送高功率光信号;与此同时,C₄ 则传送由 LNM₁ 调制到 LD 上载波信号的一个副本,该副本在远端站点执行下变

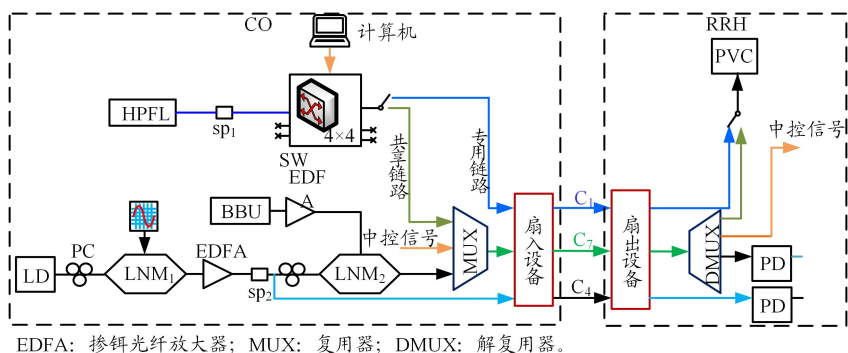


图5 兼顾共享与专用的SDM-PWoF方案

杨林婕,邵宇丰,王安蓉,等:异构无源光接入网络中光纤传能技术的研究进展

频操作。

当 HPFL 的发射功率设定为 1.26 W 时,在共享和专用场景下,远端站点接收到的光功率分别为 78.70 mW 和 132.74 mW,对应的光功率传输效率分别是 6.2% 和 10.5%。随后,这些光功率通过效率为 30% 的 PVC 转换为 23.61 mW 和 39.81 mW 的电能。

2.3 采用双包层光纤(DCF)的 SDM-PWoF 方案

除了 MCF 之外,DCF 也是 SDM 类型信能同传方案中常用的传输介质。传统的 DCF 由单模纤芯、内包层和外包层组成^[19],其中单模纤芯能够提供较宽的传输带宽,适合传输高速率的 RF 信号,而馈电光则可以通过光纤的内包层来进行传输。

2013 年,MATSUURA M 等人^[20]提出了一种将 DCF 应用于 PWoF 技术中的方案,如图 6 所示。在该方案中,2 个高功率激光二极管(HPLD)共同输出 4 W 的功率光,该光信号通过 MMF 传输并与 RF 信号一起通过光纤分束器(TFBC)耦合进入一段长达 100 m 的 DCF。在基站(BS)中,使用光纤分束器(TFBD)将携带的数据信号和高功率光信号分开。随后,RF 信号经过包层功率剥离器(CPS)、EDFA、BPF 的处理后,由 PD 转换为带有信息的电信号。另一方面,高功率光则通过一个

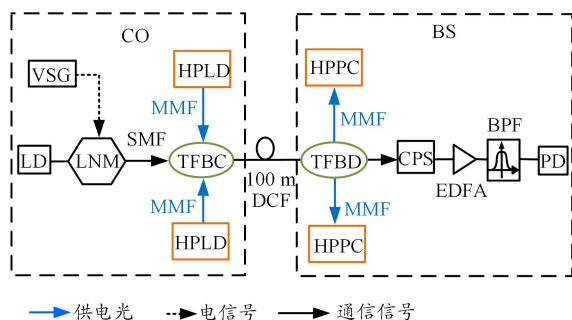


图 6 采用 DCF 的 SDM-PWoF 方案结构图

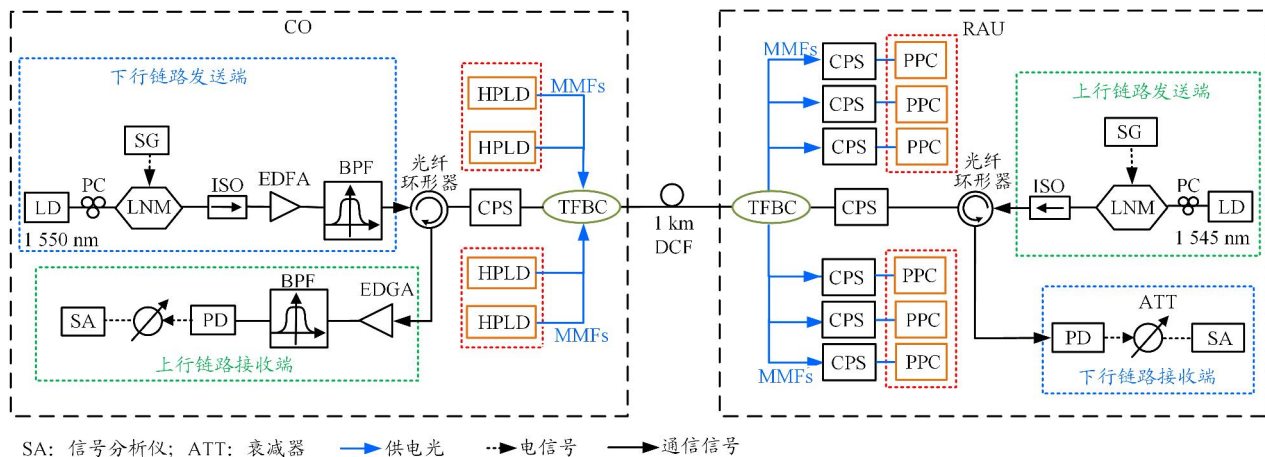


图 7 采用光纤环形器的 SDM-PWoF 方案结构图

转换效率为 44% 的高功率光/电转换器转化为 390 mW 的电能,但是,其光功率传输效率只有 22%。虽然这种配置下的光功率传输效率相对较低,但它成功地验证了利用 DCF 同时实现信能传输的可行性。

2.4 采用光纤环形器的 SDM-PWoF 方案

2015 年,文献[21-23]提出了一种利用光纤环形器构建 SDM-PWoF 方案,如图 7 所示。为提高光功率传输效率,研究人员设计出 $1 \times (6+1)$ 型 TFBC^[22-23],代替之前使用的 $1 \times (2+1)$ 型 TFBC。新型 TFBC 通过增加 MMF 纤芯数量增大了芯径面积,以匹配 DCF 的内包层面积,并减小了耦合损耗。应用上述方案不仅入纤光功率增加到了 60 W,光功率传输效率也提升至 44%。2019 年,MATSUURA M 等人^[24]采用 4 个 HPLD 共输出 150 W 光功率,通过 1 km DCF 传输至 RAU,光传输效率为 19.46%。出纤光功率在 RAU 端由 6 个转换效率为 24% 的光伏转换器(PPC)转换为 7 W 的电能。2022 年,研究人员将光纤分束器规格从 $1 \times (6+1)$ 替换为 $1 \times (18+1)$ ^[25],光功率传输效率提升至 52%,并获得 43.7 W 电能(PPC 的光/电转换效率为 56%)。

3 2 种不同结构系统的实验对比

2022 年,WANG S 等人^[26]探讨了弱耦合七芯光纤在 SDM-PWoF 中的应用潜力,通过 1 km 的弱耦合七芯光纤同时传输 1.5 Gb/s 的新一代射频(NR)信号和 60 W 能量光。YANG H 等人^[27]采用 WDM 设备,将信号光与 10 W 的能量光耦合输入到 1 km 的标准单模光纤上,与 SDM 结构进行对比。作为参考,研究人员记录了没有输入 60 W 能量光的情况下,在背靠背、只传输数据信号(经 1 km 七芯光纤传输)、信能同传(经 1 km 七芯光纤传输)后测得的 EVM 值。测试结果表明:3 种

表 1 各典型案例中 PWO_F 方案性能比较

文献	PWO _F 方案 复用方式	光纤类型	传输距离/m	HPLD 输出 功率/W	光传输 效率/%	光/电转换 效率/%	获得的 总电力/W
[6]	WDM	MMF	300	0.125	48	56	0.034
[8]	WDM	MMF	100	0.5	24	50	0.06
[13]	WDM	MMF	2 000/4 000	9.7	75/61	—	—
[14]	SDM	MCF	—	0.8	—	—	0.05
[18]	SDM	MCF	10 000	1.26	6.2/10.5	30	0.024/0.04
[20]	SDM	DCF	100	4	22	44	0.39
[23]	SDM	DCF	300	60	44	—	—
[24]	SDM	DCF	1 000	150	19.46	24	7
[25]	SDM	DCF	1 000	150	52	56	43.7
[26]	SDM/WDM	MCF/MMF	1 000	60/10	56/75	35	11.7/2.6

EVM 值几乎相同;WDM 结构与 SDM 结构下光功率传输效率分别为 75%和 56%;由于光电设备带来的损耗,SDM 结构总收集光功率是 WDM 结构的 4.6 倍;PVC 的转换效率为 35%,WDM 结构与 SDM 结构分别得到了 2.6 W 和 11.7 W 的电能。由于使用的 MCF 可等效于多个单模光纤并联,因此,在不使用 WDM 设备的情况下,SDM 结构利用 MMF 多通道特性即可将非线性大功率传输转换为线性传输,以获得更大入纤光功率。各典型案例中 PWO_F 方案性能对比情况如表 1 所示。可以看出,文献[25]采用 SDM-PWO_F 方案获得的总电力输出最高,达到了 43.7 W。

4 挑战与展望

目前,尽管 PWO_F 技术的应用在一定程度上克服了功率收发集成及传输损耗的问题,但在采用上述方案时,光功率传输效率仍然较低。因此,在异构无源光接入网中实现远距离传输高功率光信号方面仍需进行更多的研究和技术改进。由于单模光纤(SMF)的纤芯直径较小,可以传输的功率低于其它类型的光纤;而 MMF 由于模式色散的问题限制了传输距离,并且在不同工作波长上的信号光之间存在较大的串扰^[28]。因此,与 SMF、MMF 相比,MCF、DCF 与 PWO_F 具有更高的兼容性,在远距离传输高功率光信号时,虽然存在一定的传输损耗,但仍能保证在 5 km 范围内的高传输效率。

此外,无论采用何种复用技术,复用设备或耦合器件本身都会带来一定的耦合损耗。同时,光/电转换器的转换效率也直接影响系统中接收端最终获取的电力大小。因此,在未来设计并构建新型异构无源光接入网时,若要应用 PWO_F 技术,不仅要实现光网络单元(ONU)的无源化高效配置,还应该进一步研究如何

提高光/电转换效率。

尽管面临诸多挑战,PWO_F 技术仍然具有广泛的应用前景,因为其应用场景丰富多样,不仅可以应用于室内网络环境,还可以为军事、灾害救援等领域提供应急通信和供电^[29]。为了提高传输效率,满足不同应用场景的需求,在光网络中引入监控技术^[30-31],监测光功率在系统中的传输状况,将成为未来的一个重要研究方向。

5 结束语

本文分析了应用不同复用方式的 PWO_F 方案的通信性能和能耗特点,主要围绕数据信号接收质量和光功率传输效率比较了几种应用方案的优劣势。WDM-PWO_F 系统受制于输入功率的门限值,更适用于低功耗的接入应用;WDM 设备可通过隔离数据光与馈电光,避免串扰发生,从而能有效保障数据信号的接收质量。SDM-PWO_F 系统虽然扩大了光纤核心使用面积,提高了输入功率,但却易造成较大传输损耗。

在实际应用过程中,我们应当依据业务需求和具体场景来选择最佳适应方案;无论采用上述哪种方案,提高光功率传输效率、光电转换器转换效率以及保证收发及传输信号的质量和减少损耗仍然是 PWO_F 技术的研究重点。

参考文献:

- [1] BUDELMANN C. Opto-electronic sensor network powered over fiber for harsh industrial applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1170-1177.
- [2] NOVAK D, WATERHOUSE R B, NIRMALATHAS A, et al. Radio-over-fiber technologies for emerging wireless systems[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2015, 52(1): 1-11.
- [3] YANG L, YI X, HUANG Z, et al. Hybrid PWO_F-RoF-PON for next-gen-

杨林婕,邵宇丰,王安蓉,等:异构无源光接入网络中光纤传能技术的研究进展

- eration access network[C]//Optoelectronic Devices and Integration X, October 10–12, 2021, Nantong, China. Bellingham: SPIE, 2021: 65–68.
- [4] MONTERO D S, LOPEZ-CARDONA J D, AL-ZUBAIDI F M A, et al. The role of power-over-fiber in C-RAN fronthauling towards 5G[C]//22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 19–23, 2020, Bari, Italy. New York: IEEE, 2020: 1–4.
- [5] UMEZAWA T, KANNO A, DAT P T, et al. Multi-core based 94-GHz radio and power over fiber transmission using 100-GHz analog photoreceiver[C]//ECOC 2016 and 42nd European Conference on Optical Communication, September 18–22, 2016, Dusseldorf, Germany. Offenbach: VDE, 2016: 1–3.
- [6] WAKE D, GOMES N J, LETHIEN C, et al. An optically powered radio over fiber remote unit using wavelength division multiplexing[C]//International Topical Meeting on Microwave Photonics jointly held with the 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, September 30–October 3, 2008, Gold Coast, Australia. New York: IEEE, 2008: 197–200.
- [7] WAKE D, NKANSAH A, GOMES N. Optical powering of remote units for radio over fiber links[C]//International Topical Meeting on Microwave Photonics, October 2–5, 2007, Victoria, Canada. New York: IEEE, 2007: 29–32.
- [8] LETHIEN C, WAKE D, VERBEKE B, et al. Energy-autonomous picocell remote antenna unit for radio-over-fiber system using the multiservices concept[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(8): 649–651.
- [9] AL-ZUBAIDI F M A, MONTERO D S, VAZQUEZ C. SI-POF supporting power-over-fiber in multi-Gbit/s transmission for in-home networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 39(1): 112–121.
- [10] SIM D H, TAKUSHIMA Y, CHUNG Y C. High-speed multimode fiber transmission by using mode-field matched center-launching technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(8): 1018–1026.
- [11] HAAS Z, SANTORO M A. A mode-filtering scheme for improvement of the bandwidth-distance product in multimode fiber systems[J]. Journal of lightwave technology, 1993, 11(7): 1125–1131.
- [12] RADDATZ L, WHITE I H, CUNNINGHAM D G, et al. An experimental and theoretical study of the offset launch technique for the enhancement of the bandwidth of multimode fiber links[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(3): 324–331.
- [13] KUBOKI H, MATSUURA M. Optically powered radio-over-fiber system based on center-and offset-launching techniques using a conventional multimode fiber[J]. Optics Letters, 2018, 43(5): 1067–1070.
- [14] UMEZAWA T, DAT P T, KASHIMA K, et al. 100 GHz radio and power over fiber transmission through multicore fiber using optical-to-radio converter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 617–623.
- [15] UMEZAWA T, DAT P T, HASE E, et al. 100 GHz optical-to-radio converter module and its application in radio and power over fiber transmission through multi-core fiber[C]//Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, March 19–23, 2017, Los Angeles, US-A. New York: IEEE, 2017: W4B. 2-1–W4B. 2-3.
- [16] VAZQUEZ C, LOPEZ-CARDONA J D, LALLANA P C, et al. Multi-core fiber scenarios supporting power over fiber in radio over fiber systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 158409–158418.
- [17] VAZQUEZ C, MONTERO D S, AL-ZUBAIDI F M A, et al. Experiments on shared-and dedicated-power over fiber scenarios in multi-core fibers[C]//28th European Conference on Networks and Communications (EuCNC), July 18–21, 2019, Valencia, Spain. New York: IEEE, 2019: 412–415.
- [18] LOPEZ-CARDONA J D, ROMMEL S, GRIVAS E, et al. Power-over-fiber in a 10 km long multicore fiber link within a 5G fronthaul scenario[J]. Optics Letters, 2021, 46(21): 5348–5351.
- [19] KOPLOW J P, MOORE S W, KLINER D A V. A new method for side pumping of double-clad fiber sources[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(4): 529–540.
- [20] SATO J, MATSUURA M. Radio-over-fiber transmission with optical power supply using a double-clad fiber[C]//Optoelectronics and Communications Conference and Photonics in Switching, June 30–July 4, 2013, Kyoto, Japan. New York: Optica Publishing Group, 2013: TuPO_8-1–TuPO_8-8.
- [21] MATSUURA M, SATO J. Bidirectional radio-over-fiber systems using double-clad fibers for optically powered remote antenna units[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 1–9.
- [22] MATSUURA M, NOMOTO H, MAMIYA H, et al. Over 40 W electric power and optical data transmission using an optical fiber[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 4532–4539.
- [23] MATSUURA M, FURUGORI H, SATO J. 60 W power-over-fiber feed using double-clad fibers for radio-over-fiber systems with optically powered remote antenna units[J]. Optics Letters, 2015, 40(23): 5598–5601.
- [24] MATSUURA M, TAJIMA N, NOMOTO H, et al. 150 W power-over-fiber using double-clad fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 38(2): 401–408.
- [25] MATSUURA M. Power-over-fiber using double-clad fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(10): 3187–3196.
- [26] WANG S, YANG H, QIN Y, et al. Power-over-fiber in support of 5G NR fronthaul: space division multiplexing versus wavelength division multiplexing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(13): 4169–4177.
- [27] YANG H, PENG D, QIN Y, et al. 10-W power light co-transmission with optically carried 5G NR signal over standard single-mode fiber[J]. Optics Letters, 2021, 46(20): 5116–5119.
- [28] MATSUURA M, LKUKAWA A, KUBOKI H, et al. Investigation of crosstalk between data signals and feed light in power-over-fiber[J]. Photonics, 2022, 9(6): 369–369.
- [29] SAKANO T, FADLULLAH Z M, NGO T, et al. Disaster-resilient networking: a new vision based on movable and deployable resource units[J]. IEEE Network, 2013, 27(4): 40–46.
- [30] 兰子林, 邹喜华, 白文林, 等. 光载信息能量同传方案及其通信检测应用[J]. 电子学报, 2022, 5(1): 804–810.
- [31] ALTUNA R, LOPEZ-CARDONA J D, VAZQUEZ C. Monitoring of power over fiber signals using intercore crosstalk in ARoF 5G NR transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(23): 7155–7161.