

# 激光与光电子学进展

## 基于微波光子学的光纤无线电-无源光网络融合系统的研究进展

丁庆安<sup>1</sup>, 张丽君<sup>1</sup>, 李俊凯<sup>1</sup>, 杜刘革<sup>2\*</sup>, 郑丽<sup>1</sup>, 代振飞<sup>1</sup>, 刘慧欣<sup>1</sup>, 程旭东<sup>1</sup>, 李超凡<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山东科技大学电子信息工程学院, 山东 青岛 266590;

<sup>2</sup>山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 250100

**摘要** 伴随着移动通信和多媒体业务的飞速发展,下一代接入网络的带宽需求呈现出了爆炸式增长的趋势。作为光接入网络的关键技术,无源光网络(PON)提供了巨大的带宽资源和长距离链路,但其灵活性受光纤铺设的严重限制。而光纤无线电(RoF)技术能够结合无线接入和光纤通信,发挥低损耗、高带宽的技术优势,促进两者的融合和发展。因此RoF技术与PON融合,能够充分利用光纤提供的巨大带宽和无线通信的灵活接入,更好地产生、处理和传输有线信号和微波信号,满足人们对多业务的需求。本文回顾了近年来的RoF-PON融合系统和关键技术,概述了微波信号的光子产生技术、RoF系统和下一代PON技术(NG-PON2)。此外,重点讨论和验证了RoF技术与波分复用PON(WDM-PON)、时分/波分复用PON(TWDM-PON)与正交频分复用PON(OFDM-PON)三种PON的融合方案。在经过20 km光纤传输后,所提的四通道RoF-WDM-PON和RoF-TWDM-PON的系统传输容量均为10 Gbit/s,误码率低至 $10^{-9}$ 。而RoF-OFDM-WDM-PON系统可以实现下行50 Gbit/s的系统容量、50 km的光纤传输以及无源光网络单元(ONU)。最后,从系统的传输距离和误码率等方面对比分析了三种系统的可行性和优缺点。因此,基于微波光子学的RoF-PON融合系统不仅能够降低系统成本,提供高带宽和多业务服务,而且能够有效提升未来接入网络的容量和链路质量。

**关键词** 光纤光学与光通信; 下一代接入网络; 无源光网络; 光纤无线电; 融合; 微波信号

中图分类号 O43

文献标志码

DOI: 10.3788/LOP202259.2300003

### Research Progress of Converged Radio Over Fiber-Passive Optical Network System Based on Microwave Photonics

Ding Qing'an<sup>1</sup>, Zhang Lijun<sup>1</sup>, Li Junkai<sup>1</sup>, Du Liuge<sup>2\*</sup>, Zheng Li<sup>1</sup>, Dai Zhenfei<sup>1</sup>, Liu Huixin<sup>1</sup>, Cheng Xudong<sup>1</sup>, Li Chaofan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Electronic Information Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;

<sup>2</sup>College of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 250100, Shandong, China

**Abstract** With the rapid development of mobile communication and multimedia services, the bandwidth demand for the next generation access network demonstrates an explosive growth trend. The passive optical network (PON) is a key technology of optical access that provides huge bandwidth resources and long-distance links, but its flexibility is severely limited by optical fiber laying. However, the radio over fiber (RoF) technology can combine wireless access and optical fiber communication to benefit from low loss and high bandwidth, and thus, promote the integration and development of the two. Therefore, making full use of the huge bandwidth provided by optical fiber and the flexible access of wireless communication, the integration of RoF technology and PON can better generate, process, and transmit wired signals and microwave signals to meet people's needs for multi-services. This paper reviews the subsystems and key technologies of converged RoF-PON in recent years. The photon generation technology of microwave signal, RoF system, and next generation-PON (NG-PON2) are also summarized. Furthermore, the paper emphasizes the converged schemes of RoF technology and wavelength division multiplexing-PON (WDM-PON), time/wavelength division multiplexing-PON (TWDM-PON), and orthogonal frequency division-PON (OFDM-PON). The proposed four-channel RoF-WDM-PON

收稿日期: 2021-09-23; 修回日期: 2021-11-06; 录用日期: 2021-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61471224)、山东省自然科学基金(ZR2017MF070)、国家青年自然科学基金(61801267)

通信作者: \*lgdu@sdu.edu.cn

and RoF-TWDM-PON system transmission capacity after 20 km of optical fiber transmission is 10 Gbit/s, with a bit error rate of  $10^{-9}$ . The RoF-WDM-OFDM-PON can realize a downstream system capacity of 50 Gbit/s, 50 km of optical fiber transmission, and passive optical network unit (ONU). Finally, the feasibility, advantages, and disadvantages of these systems are compared and analyzed in terms of transmission distance and bit error rate. In a nutshell, the converged RoF-PON system based on microwave photonics can not only reduce the system cost and provide high bandwidth and multi-services but also effectively improve the capacity and link quality of future access networks.

**Key words** fiber optics and optical communication; next generation access network; passive optical network; radio over fiber; integration; microwave signals

## 1 引 言

下一代接入网络不仅要实现高数据速率而且还要提供无线服务,以满足灵活性和多业务的巨大需求<sup>[1]</sup>。目前光纤通信已广泛部署,成为了现代通信网络的重要支柱。而且其成本低、抗干扰性强,尤其适用于远距离传输。另外无线通信可以不受地点约束,随时随地实现无线接入,现在通信网络中已是不可或缺的存在。光纤通信可与无线通信相结合,实现灵活的用户终端接入方式<sup>[2-3]</sup>。光纤无线电(RoF)技术结合了无线通信和光纤通信的优势,能够实现微波在光纤中的低损耗传输,具有可用性、灵活性和广泛的覆盖范围<sup>[4]</sup>。相比于传统的无线通信网,RoF技术通过低损耗的光纤降低信号的损耗,增加了无线接入网络的传输范围。RoF系统中昂贵的设备和器件、复杂的信号处理等工作都集中在中心站,从而简化了基站结构,这十分符合5G通信要实现密集且结构简单的基站的要求。因此RoF技术也成为了解决未来5G通信高频载波超远距离传输和低成本、有效覆盖的主要技术手段。

无源光网络(PON)能够实现点对多点的有线接入服务,成本低廉、兼容性好且安全性优于其他接入网络,在移动通信的发展中具有举足轻重的地位<sup>[5]</sup>。PON历时20多年的发展,从最初的基于ATM的PON(APON)/宽带PON(BPON)、基于以太网(Ethernet)的PON(EPON)和基于通用成帧规程(GFP)的吉比特PON(GPON),逐步发展为了下一代PON(NG-PON2)技术。NG-PON2技术作为当代宽带接入网络技术,具备许多优势,尤其当部署在光纤到户(FTTH)场景中时,它们可提供高质量的数据、语音和视频以及高速互联网访问服务,但仍面临着通信系统的性能和成本问题等挑战<sup>[6]</sup>。所以将NG-PON2技术与其他通信技术相融合,改善系统整体性能、增加传输容量,已经成为了当前通信系统最活跃的研究领域之一。

随着移动通信、大数据、云服务等的快速发展和应用,无线网络的数据量和服务的多样化需求激增。所以下一代通信网络需要更加注重于系统的宽带化、多元化和光纤化发展,满足不同用户的多业务需求。应目前大容量多元化的5G网络需求,融合的RoF-PON网络能够利用光纤传输宽带有线信号和基于RoF技术传输微波信号,实现有线宽带信号和无线信号的共

传<sup>[7]</sup>,增加接入方式的灵活性和多样性。所以将RoF技术与PON融合,不仅充分发挥了有线传输的低损耗、大容量、长距离的优势,而且提高了无线通信的覆盖范围和传输速率,为运营商提供了一种经济高效的通信网络解决方案。同时该融合网络能够扩展波分复用(WDM)、正交频分复用(OFDM)等复用技术,进一步提升传输容量。目前基于RoF-PON融合的接入技术已经得到了国内外研究者的关注。为了提高通信效率,实现高速低成本的通信网络,在RoF-PON的融合网络中选择合适的调制技术和复用技术是一个研究重点。随着NG-PON2技术标准的制定,时分/波分复用PON(TWDM-PON)和波分复用PON(WDM-PON)作为光接入网的主力已经得到了广泛部署,同时也受到了运营商们的高度重视和支持。文献[8]提到了利用10 GHz电子器件和单驱动的马赫-曾德尔调制器(MZM)来产生基于六倍频和光载波抑制差分相移键控(OCS-DPSK)调制的60 GHz无线信号,在25 km光纤上成功传输有线和无线信号,实现了WDM-PON和60 GHz RoF系统的融合方案。为了更好地处理光通信网络中的色散和非线性效应问题,文献[9]提出在4通道、8通道和16通道的WDM传输系统中使用均匀光纤布拉格光栅(FBG)来补偿色散和非线性失真,同时利用掺铒光纤放大器(EDFA)提高了传输系统质量。文献[10]提出了一种基于MZM的调制方案,同时在下行链路中采用反向归零编码(IRZ code)数据流传输,仿真结果表明基于MZM的WDM-PON方案是合理可行的,同时具有较好的色散容限。为满足NG-PON2的发展需求,文献[11]提出了一种基于相干检测和偏振复用技术的50 Gb/s 16-QAM全双工传输的RoF-WDM-PON和RoF-TWDM-PON融合系统,实现了大容量光线路终端(OLT)和无源光网络单元(ONU)间的远距离通信。

目前,OFDM技术抗窄带干扰以及多径干扰能力优异并且频谱利用率很高,通常使用OFDM调制信号的RoF系统能够传输更远的距离并且具有更强的抗色散能力。文献[12]使用集成调制器传输1 Gbit/s无线和10 Gbit/s有线的OFDM信号,实验证明了一个40 GHz 32-QAM-OFDM-RoF和WDM-OFDM-PON的融合架构。在文献[13-14]中,从下行链路分离的光载波被重新用于上行链路中,支持有线和无线接入的

同时实现了 ONU, 仿真结果表明了所提的全双工混合 RoF-OFDM-PON 系统是可行的。另外, 还可以利用反射式半导体光放大器<sup>[15-16]</sup>(RSOA)对 OFDM 信号进行再调制, 极大地提高了器件的带宽响应和系统对噪声的容忍度。虽然以上方案可以实现微波信号在 RoF 和 PON 的融合系统中传输, 但存在基站结构复杂和链路成本高等问题。随着 5G 时代中高速流媒体服务需求的持续增长<sup>[17]</sup>, 人们越来越注重移动通信网络的创新和融合。文献<sup>[18]</sup>提出了基于 5G 通用滤波多载波波形的 60 GHz 多输入多输出(MIMO)信号和 OFDM 有线信号的 RoF-PON 系统结构, 其中 MIMO-RoF 信号能够在标准单模光纤上以低频率传输, 从而实现了大容量和低成本的部署。因为下一代通信网络需要实现更加简单高效、低成本的传输方案来满足巨大的用户需求, 所以大多数研究者在设计和提出新的融合系统方案时会不断地融入偏振复用<sup>[19]</sup>、光生毫米波<sup>[20]</sup>以及电域信号叠加等技术<sup>[21-22]</sup>, 从而提升整个系统的传输质量。

随着“数字中国”战略的深入推进, 当前通信行业急需加快 5G 网络规模化部署, 融合创新, 完善数字基础设施建设。作为面向未来无线和光纤接入的两大关键技术, RoF 技术和 PON 都展现了明显的优势和潜力<sup>[23]</sup>。基于两者优势的 RoF-PON 融合网络能够通过光纤传输射频信号, 实现低成本的有线传输和超宽带无线接入, 对于解决互联网接入“最后一英里”问题具有重大意义。现在虽然已经取得了一系列研究进展, 但如何保证系统的低时延、低成本和高速率, 以及如何解决频谱资源需求与供给, 实现信号的高可靠性传输仍然是研究的重点<sup>[24]</sup>。因此本文重点介绍了一些关键的 RoF 技术与 NG-PON2 的主要特性, 同时在这些理论基础上提出了 RoF 系统与 WDM-PON、TWDM-PON 和 OFDM-PON 三种无源光网络的融合方案, 并从传输距离、系统速率、误码率以及成本等方面对比了三种系统的优缺点, 同时展望了其未来发展方向。这三种融合系统利用四个传输信道实现微波信号的共传, 为移动通信、无线接入网、卫星通信等应用场景提供了高带宽和高速率的解决方案。

## 2 微波光子学技术

### 2.1 微波信号的光子产生方法

在光域中产生微波信号, 通过光纤将信号从中心站分配到远程天线单元, 能够很好地简化传输系统, 降低功耗。常用的微波信号的产生方法是光外差法和外调制法。

#### 2.1.1 光外差法

将两路不同频率的激光输入到光耦合器, 两路信号经耦合后再输入到光电探测器进行拍频, 从而生成微波信号的方法称为光外差法。所得微波信号的频率就是两路光信号的频率差。光外差法的原理如图 1

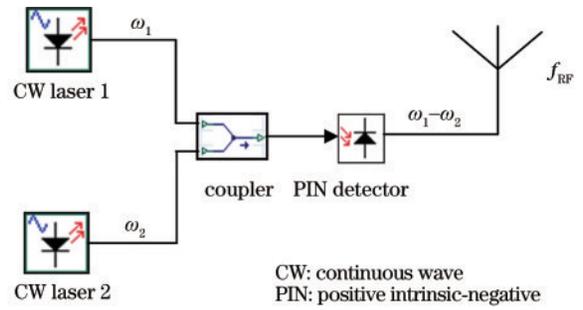


图 1 光外差法原理图

Fig. 1 Principle of optical heterodyne

所示。

连续波激光器输出的两路光信号可分别表示为

$$E_1(t) = E_{01} \exp[j(2\pi f_1 t - \varphi_1)], \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_{02} \exp[j(2\pi f_2 t - \varphi_2)], \quad (2)$$

式中:  $E_{01}$  和  $E_{02}$  分别表示两路光波的电场强度的幅度;  $f_1$  和  $f_2$  分别表示两路光波的频率;  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别表示两路光波的初始相位。经光电检测后相应的输出光电流  $i(t)$  可表示为

$$i(t) = A \cos[2\pi(f_2 - f_1)t - (\varphi_2 - \varphi_1)], \quad (3)$$

式中,  $A$  是由  $E_{01}$ 、 $E_{02}$  和光电探测器的响应度决定的一个常数。由以上公式可以看出这两个光信号进入光平方律探测器就可以产生不同频率的信号。该方法的优势是: 频率可以很高; 两路光信号都具有较大功率; 链路中采用基带信号或中频信号传输, 色散效应较小。

#### 2.1.2 外调制法

外调制法是指将调制器放置在激光器外部的光路上, 在其上加载调制信号会改变其物理特性, 激光器发出的光信号输入到外调制器中, 受到射频驱动信号的调制后生成许多光边带, 用光滤波器将不必要的光边带滤除后再输入到光电探测器中拍频, 产生倍频微波信号。外调制法主要分为强度调制和相位调制两种方法。

图 2(a) 展现了基于强度调制产生毫米波的方法。图中 MZM 由两个 LiNbO<sub>3</sub> 分支平面波导组成。假设施加适当的直流电压  $V_{dc}$ , 两个分支臂的初始相移为  $\Delta\varphi$ , 调制器两臂的射频电压相位差为  $\Delta\theta$ , 共同控制调制器的输出光波。MZM 的输出光场可表示为

$$E_o(t) = \frac{A}{2} \left\{ \cos \left[ \omega_0 t + \frac{V_{dc}}{V_\pi} \pi + \frac{V_{ac}}{V_\pi} \pi \cos(\omega_s t) \right] + \cos \left[ \omega_0 t + \frac{V_{ac}}{V_\pi} \pi \cos(\omega_s t + \Delta\theta) \right] \right\}, \quad (4)$$

式中:  $\omega_0$  是光载波角频率;  $\omega_s$  是射频信号角频率;  $V_{ac}$  是交流驱动电压的振幅;  $V_\pi$  是使光波产生  $\pi$  相移的电压值。当  $\Delta\theta$  和  $\Delta\varphi$  发生变化时, 外调制器输出的光谱也会改变。

外调制法中的相位调制主要利用相位调制器, 如图 2(b) 所示。连续波激光器产生的光波表达式为

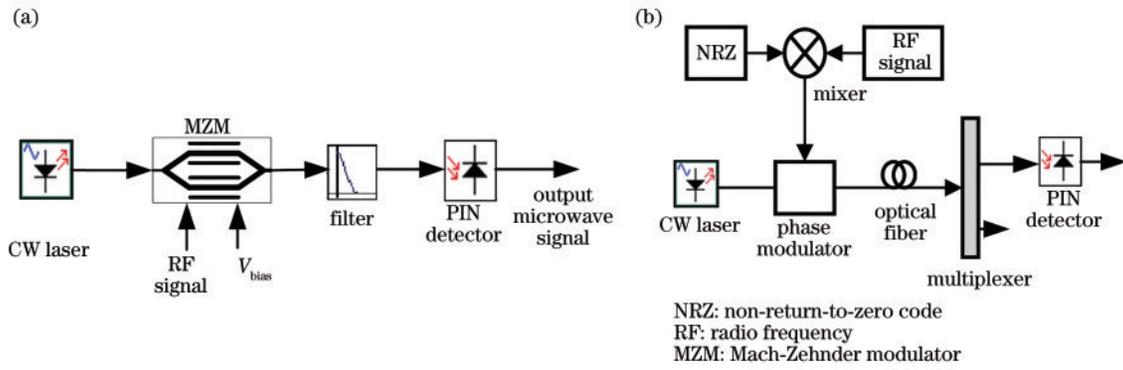


图 2 产生毫米波的原理图。(a)强度调制产生;(b)相位调制产生

Fig. 2 Schematic diagram of millimeter wave generation. (a) Generated by intensity modulation; (b) generated by phase modulation

$$E_{in}(t) = A_0 \cos(\omega_c t), \quad (5)$$

式中:  $A_0$  为光载波功率;  $\omega_c$  为角频率。该信号被送到相位调制器中进行双边带调制。而施加给相位调制器的信号是由基带信号  $s(t)$  和射频信号  $V_{RF}(t) = V_{RF} \cos(\omega_{RF} t)$  混频产生的, 其中  $V_{RF}$  和  $\omega_{RF}$  分别是射频信号的幅度和角频率。可以得到相位调制器的输出光场为

$$E_{out}(t) = A_0 \cos[\omega_c t + \chi \cdot s(t) \cdot \cos(\omega_{RF} t)], \quad (6)$$

式中,  $\chi = \pi \cdot \frac{V_{RF}}{V_\pi}$  表示调制深度, 其中  $V_\pi$  是相位调制器的半波电压。该光信号通过光纤传输后可在基站中可利用解复用器分离出中心光载波和一阶边带信号。最后分离出的一阶边带信号可通过光电检测生成毫米波信号, 同时中心光载波可以重利用为上行链路载波, 降低了系统的成本。

### 2.2 RoF 系统

近年来微波光子学的重要应用目标是利用光纤进行无线通信的微波载波信号的传输, 即 RoF 系统。RoF 技术融合了光纤通信和无线通信两种技术, 以光

纤为传输媒介, 以光波为载波, 微波、厘米波或毫米波为调制波来传输信息。RoF 技术充分发挥了光纤的低损耗、高带宽特性, 提升了无线接入网的带宽, 为用户提供了便捷的通信服务。

如图 3 所示, RoF 通信系统结构主要包括中心站 (CS)、光纤链路、基站 (BS) 和用户端四个部分, 通过光纤链路实现中心站与基站之间射频信号的分配与反馈。由于射频 (RF) 无线信号在中心站被处理, 因此所有 RF 信号的处理功能被移到中心站中。从上述 RoF 通信系统传输信号的过程中发现, 整个系统的复杂部分都转移到了中心站, 包括信息编码、各种复用技术、光调制和信号的产生与发送。在基站处, 不再需要本地振荡和 RF 信号源, 其作用仅仅是实现光电变换、信号放大以及电信号的发送与接收。这种设计, 不仅简化了通信系统的结构, 降低了成本, 也提高了通信系统的工作效率。因此, 通过安装更多的基站, 可以减小微波信号的传输距离, 实现高带宽、低功耗的无线通信, 降低对基站的高成本安装需求。此外, 由于天线高度低, 覆盖范围有限, 极大地降低了来

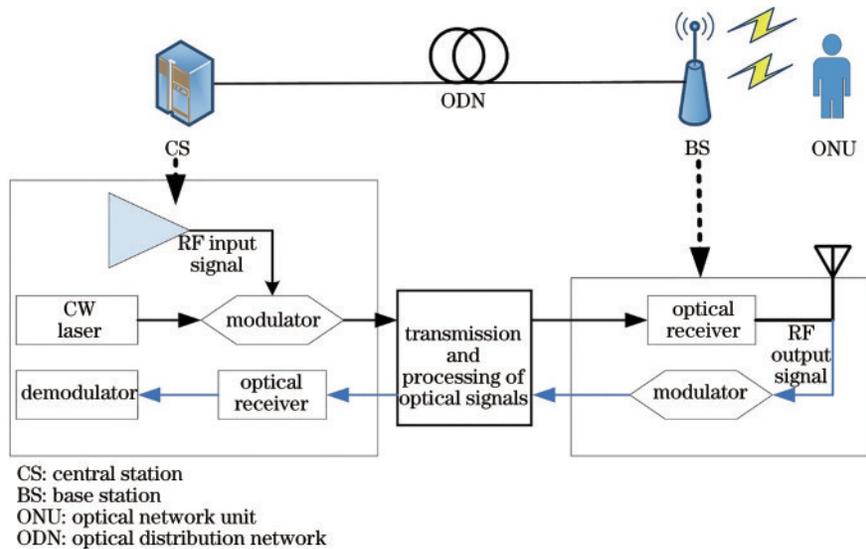


图 3 RoF 通信系统结构图

Fig. 3 Structure of RoF communication system

自其他基站信道干扰。

### 3 NG-PON2的特性

2011年,国际化标准组织全业务接入网(FSAN)启动了NG-PON2的标准研究,考虑到技术成熟度和成本问题,确定了NG-PON2的技术需求主要是1:64分光比以及在20 km传输距离下可达到40 Gbit/s下行和10 Gbit/s上行的速率能力。同时,FSAN提出将TWDM-PON作为NG-PON2的主要解决方案<sup>[26]</sup>,并

且可在系统中扩展点对点波长堆叠(PtP WDM)技术。除此之外,高速TDMA-PON、WDM-PON和OFDM-PON等都是NG-PON2的主流技术<sup>[27]</sup>。包含TWDM-PON和PtP WDM技术的NG-PON2体系架构如图4所示,主要分为OLT、终端用户附近的多个ONU和光分配网络(ODN)三部分,支持移动用户、商业用户以及住宅用户。这节讨论了NG-PON2的主要特性。

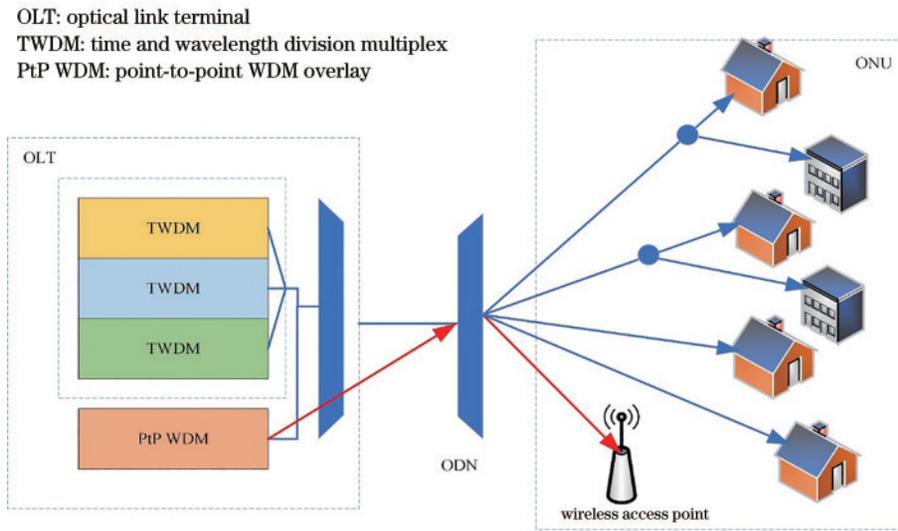


图4 包含TWDM-PON和PtP WDM-PON的NG-PON2系统架构图<sup>[25]</sup>

Fig. 4 Illustration of NG-PON2 architecture with TWDM-PON and PtP WDM-PON<sup>[25]</sup>

#### 3.1 波长分配

考虑到系统的兼容性、光纤色散等造成的系统损失以及成本最小化等问题,对不同的PON合理地进行波长规划是极其重要的。根据ITU-T G. 989.2的定义,NG-PON2的频谱分配如图5所示。对于下行的

TWDM-PON,其收发器的组件少,由多个用户分担成本,因此波长位于L波段,而上行波段有三种,这三种波段的选择,取决于发射机波长可调谐的能力。其中宽带选项(1524~1544 nm)需要分布式反馈激光器(DFB)。这是由于OLT解复用器有循环的通带,

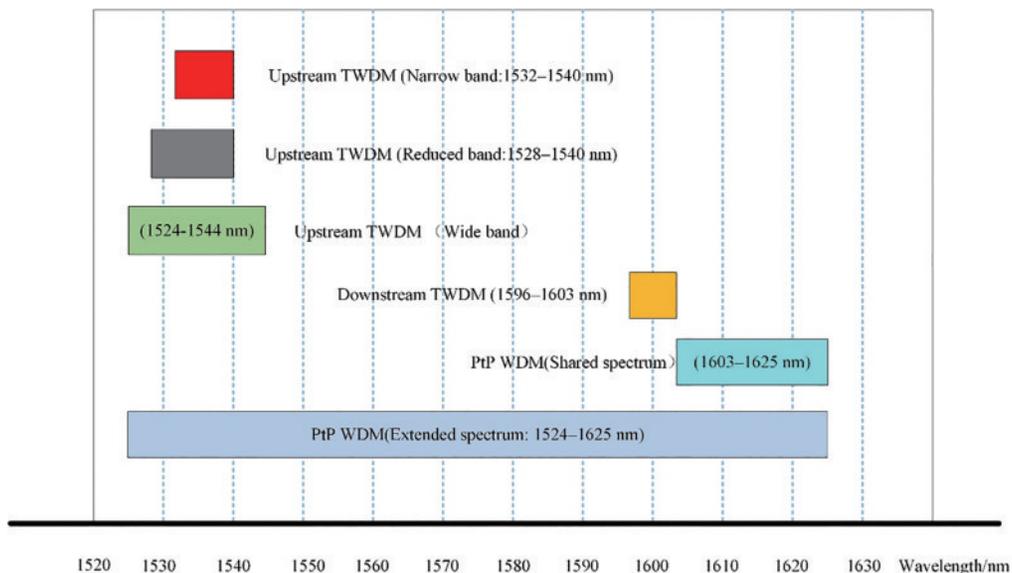


图5 NG-PON2的波长规划<sup>[26]</sup>

Fig. 5 Wavelength plan for NG-PON2<sup>[26]</sup>

DFB 能够“在宽范围内波长漂移”。PtP WDM 则有两种波长分配计划。当考虑与原有的 XG-PON 等系统兼容时,可以选择共享频谱(1603~1625 nm);当要使用特定部署中未使用的频段,可利用 PON 的灵活性选择扩展频谱(1524~1625 nm)。

### 3.2 ODN 重用技术

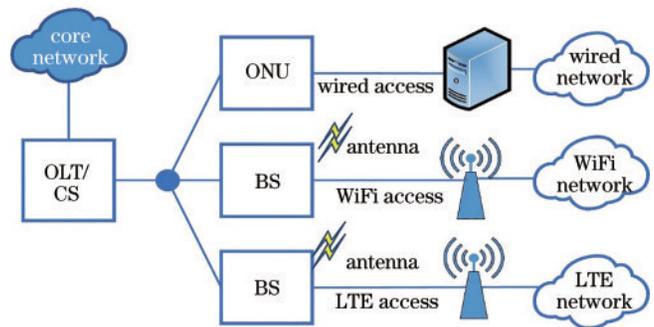
NG-PON2 技术有一个关键的系统需求,即重用 ODN,可共用传统的 PON 的 ODN。同样地,NG-PON2 能够支持多种光分配网络,比如功率分流、波长分流或者两者结合的方式。由于波长分割具有降低功耗的优点,所以 NG-PON2 可以利用波分复用器/解复用器,在一个 ODN 上实现 TWDM-PON、PtP WDM 等多种网络的融合,并且实现可达 40 km 光纤的长距离传输。此外,对于扩展的 PtP WDM 技术,WDM 可采用虚拟点对点连接,提供较低的分光损耗,从而扩大了传输距离,更好地适用于移动前传和企业应用等场景。

### 3.3 系统兼容性和灵活性

通过波长的合理分配,不同架构的 PON 可以相互融合,以实现更加低延迟、高带宽的光接入网络,满足不同通信业务的需求。对于之前的 XG-PON 系统,NG-PON2 能够利用波长覆盖技术使每个系统在公共的光纤基础设施上独立运行。另外,NG-PON2 具有很强的频谱灵活性,有助于实现多种网络应用和部署场景。每当系统未使用特定的频谱时,PtP WDM 可以利用该特定的频谱,以满足不同用户的需求,实现多业务传输。光接入网络正在经历前所未有的大变革,越来越多的研究者们开始根据 5G、6G 的部署、边缘计算以及未来的高带宽需求来研究探索新的网络架构。TDM-PON、WDM-PON、TWDM-PON、OFDM-PON 等高速率光网络能够不断扩展更多的新技术,在接入网络的转型和发展中起到了关键作用。

## 4 RoF-PON 的系统应用

目前光纤用户接入网络(FTTx)已具有良好的网络基础和用户普及度。在已知的 FTTx 实现技术中,PON 以高接入带宽、全程无源分光传输的特点展现了明显的优势。融合了光纤通信和无线通信的 RoF 技术能够实现光载毫米波的长距离和低成本传输,十分符合 5G 系统的发展需求。将 RoF 技术与 PON 结合,既可大幅度提高 RoF 系统的性能、为移动用户提供高效的网络覆盖,又能充分利用 FTTx 网络中的光纤资源、大幅度降低系统的铺设难度和施工成本,这与未来多样化通信网络的发展趋势十分吻合。因此全球通信市场的发展趋势使人们考虑用 PON 和 RoF 技术来实现有线宽带接入和无线接入网络的融合。如图 6 所示,RoF 系统中的 CS 结构与 PON 中的 OLT 结构,BS 结构与 PON 中的 ONU 结构都有着较高的兼容性,而且两者的传输媒介都是光纤,可以解决高速无线接



LTE: long term evolution

图 6 RoF-PON 的网络结构

Fig. 6 Structure of RoF-PON network

入和光纤接入带宽不匹配的问题,这为两种网络的融合提供了物理架构的基础。因此在下文中构建了 RoF-WDM-PON、RoF-TWDM-PON 和 RoF-OFDM-WDM-PON 三种融合系统的方案来体现其可行性。

### 4.1 RoF-WDM-PON 系统

在 WDM-PON 的技术方案中,每个 ONU 具备单独的波长,这些波长为每个 ONU 提供了专用的高带宽。对于有线接入网,WDM-PON 具有数据带宽大、安全性高、可扩展性强等优点,可以支持多个本地用户。另一方面,5G 的蓬勃发展需要更高的可扩展性和灵活性,为了充分利用光纤的巨大带宽和无线方案的灵活性,将 RoF 系统和 WDM-PON 融合,在 PON 的光纤设备上传输 RF 信号,使基带数据流和数据调制的 RF 信号可以同时传送给有线和无线用户,提高了系统容量,适用于机场、购物中心、会议中心等大规模应用场景。

RoF-WDM-PON 系统采用点对多点架构,在 ODN 采用阵列波长光栅(AWG)等 WDM 器件,可将下行的波长固定地分配给各个 ONU,大大降低了系统的功耗。而且由于 OLT 带宽不共享,每个 ONU 能够实现高速率传输,这是 RoF-WDM-PON 系统的显著优点。对于上行传输,RoF-WDM-PON 系统的 ONU 在不同的波长需要不同的发射机。发射式半导体光放大器(RSOA)作为上行传输的一种选择<sup>[28-29]</sup>,在实现无色 ONU 上已经得到了广泛应用。文献[30]提出一种双向无色 WDM-PON 前端传输模拟 RoF 信号的系统方案,其上行传输则采用级联 RSOAs 载波复用方法。但 RSOA 的使用会极大提高整个 ONU 的成本和链路损耗,传输速率为 1.25 Gbit/s 时误码率已达到了  $10^{-8}$  的下限。为使 ONU 的成本最小化,许多研究人员提出在光纤分路器中添加分光器,上行链路仍采用相位调制或者强度调制的方法。文献[31]提出了一种利用双向交叉网络抑制 RoF-WDM-PON 自相干检测中瑞利后向散射的方案。所提系统在误码率为  $10^{-9}$  的情况下,能够在 50 km 的有线链路以及 15 m 的无线链路中传输 10 Gbit/s 基带和毫米波信号,功率损失仅为

1 dBm,有潜力成为优化 RoF-WDM-PON 融合系统噪声和损耗的一种杰出的解决方案。本文构建并验证了支持上下行 10 Gbit/s 容量的四通道 RoF-WDM-PON 系统,  $10^{-8}$  的误码率以及清晰的眼图等仿真结果体现了该系统的可行性和可靠性。

#### 4.1.1 系统架构

综上所述,本文提出了一种四通道的 RoF-WDM-PON 系统,如图 7 所示。在 OLT 中设置了中心波长为 1596 nm 至 1598.4 nm,线宽为 10 MHz 的四个连续波激光器,为整个下行链路提供光源。四个 WDM 通道的间隔为 0.8 nm。在每一个信道中,概率随机比特序列(PBRS)发生器产生比特率为 2.5 Gbit/s 的伪随机二进制序列,然后送入到非归零码脉冲发生器,从而将生成的非归零编码信号与 15 GHz 的正弦信号进行混频,然后混频信号被输入到双输入的 MZM (DP-

MZM)中进行外调制。然后将四个通道调制后的信号与  $4 \times 1$  复用器相连接,通过双向环形器送至 20 km 的光纤中传输。在 ONU 端,通过  $1 \times 4$  解复用器分离出四个通道的下行信号,由 PIN 型光电二极管和低通滤波器进行光电检测,从而可以得到 30 GHz 的微波信号。该接收信号可发送到 3R 发生器和误码率(BER)分析仪中进行监测。

对于上行传输,由中心波长为 1524~1526.4 nm、波长间隔是 0.8 nm 以及功率为 0 的连续波激光器提供光源,与下行传输类似,仍采用 PBRS、不归零(NRZ)编码器与正弦信号发生器混频,再送入到 MZM 进行调制产生倍频信号的方法。经过调制后的上行信号通过多路复用器送入到 20 km 的光纤中传输,最终在 OLT 端通过解复用器后进行光电检测和接收。从而整个系统可以实现四通道的全双工传输。

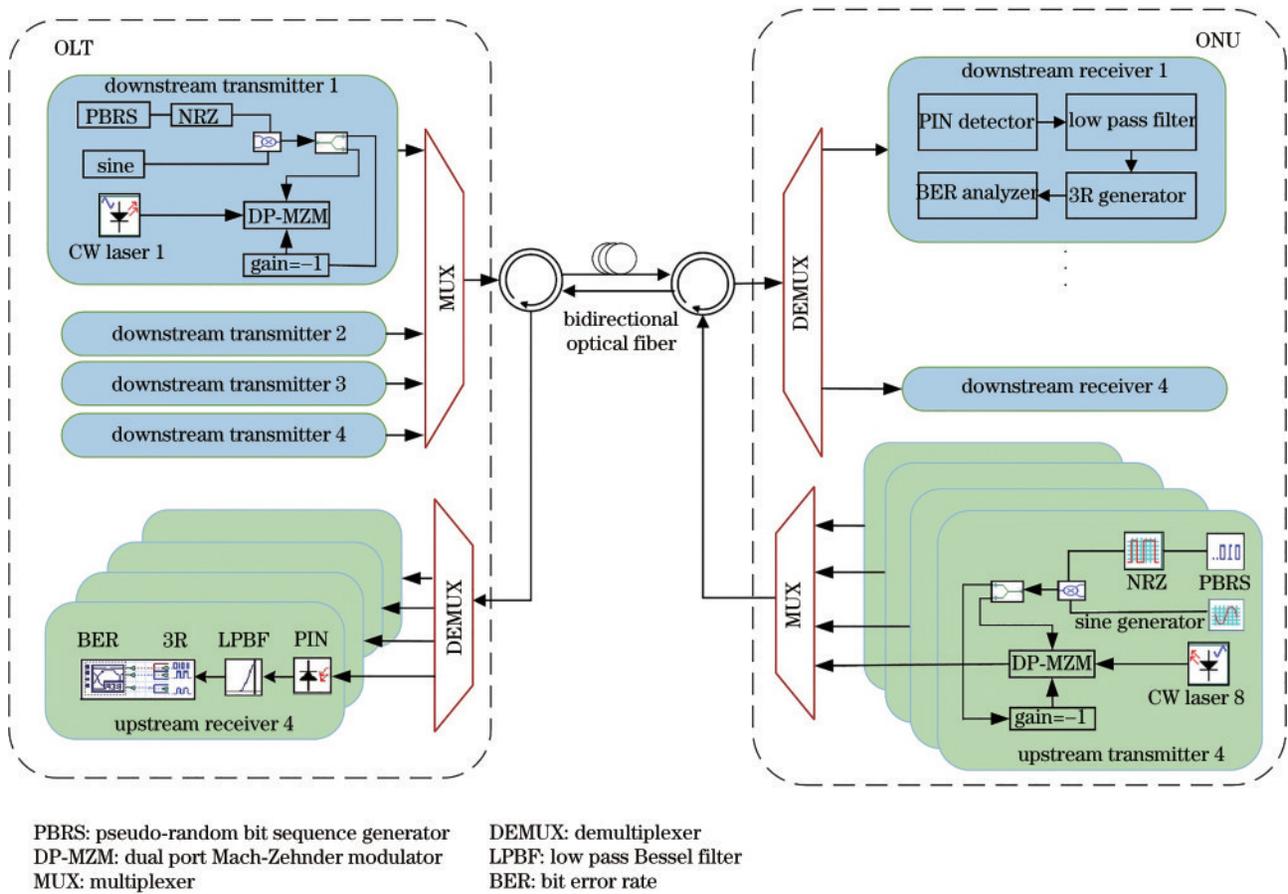


图 7 RoF-WDM-PON 系统结构图  
 Fig. 7 Structure of RoF-WDM-PON system

#### 4.1.2 结果分析

如图 8 和图 9 所示,在激光器的功率设置为 0 时,利用 BER 分析仪得到了该系统在背靠背(B2B)和 20 km 光纤两种传输情况的下行眼图。系统的比特率是 2.5 Gbit/s。眼图在 B2B 传输时清楚地张开,说明 ONU 成功接收了四个通道的信号,过程中几乎没有失真和损耗。然而下行信号通过 20 km 光纤传输到

ONU 端进行接收时,由于光纤色散的影响造成了一定的失真和损耗,从而接收信号的眼图存在闭合现象,且线条比较杂乱。可以通过增大激光器的输入功率从而达到更好的传输效果,降低系统损耗。

图 10 和图 11 显示了在激光器的功率设置为 0 时,利用 BER 分析仪得到的该系统在 B2B 和 20 km 光纤两种传输情况的上行眼图。可以看出上行传输眼图的

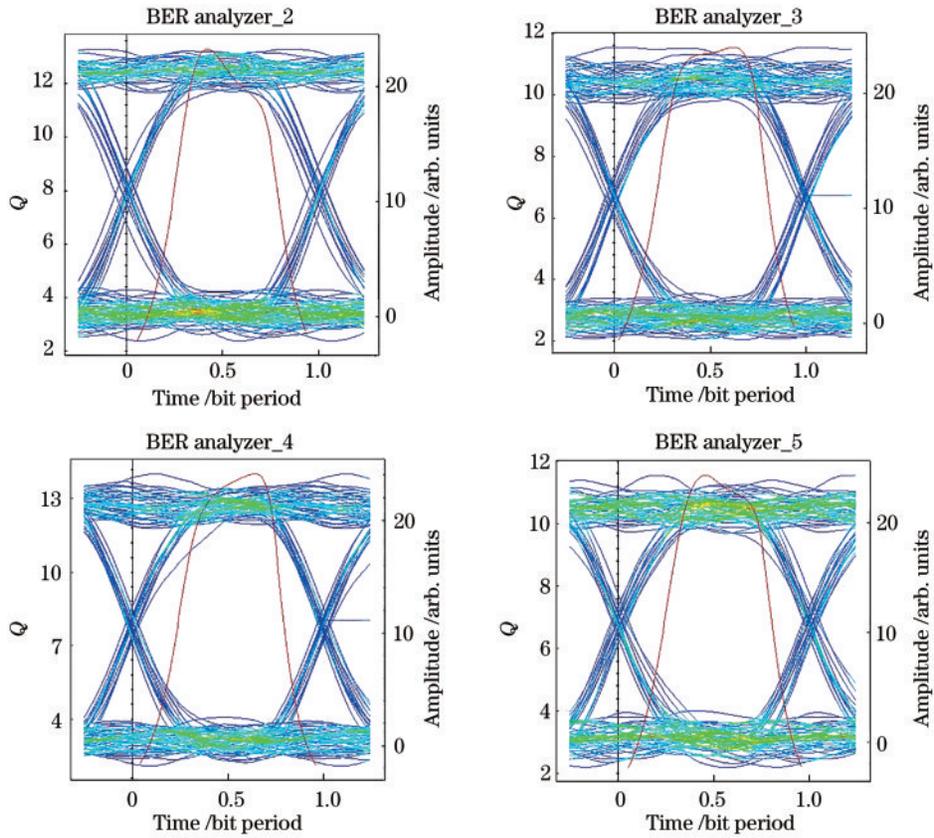


图 8 在 B2B 传输下,四通道 RoF-WDM-PON 系统的下行眼图  
 Fig. 8 Downstream eye diagram of four-channel RoF-WDM-PON system for B2B transmission

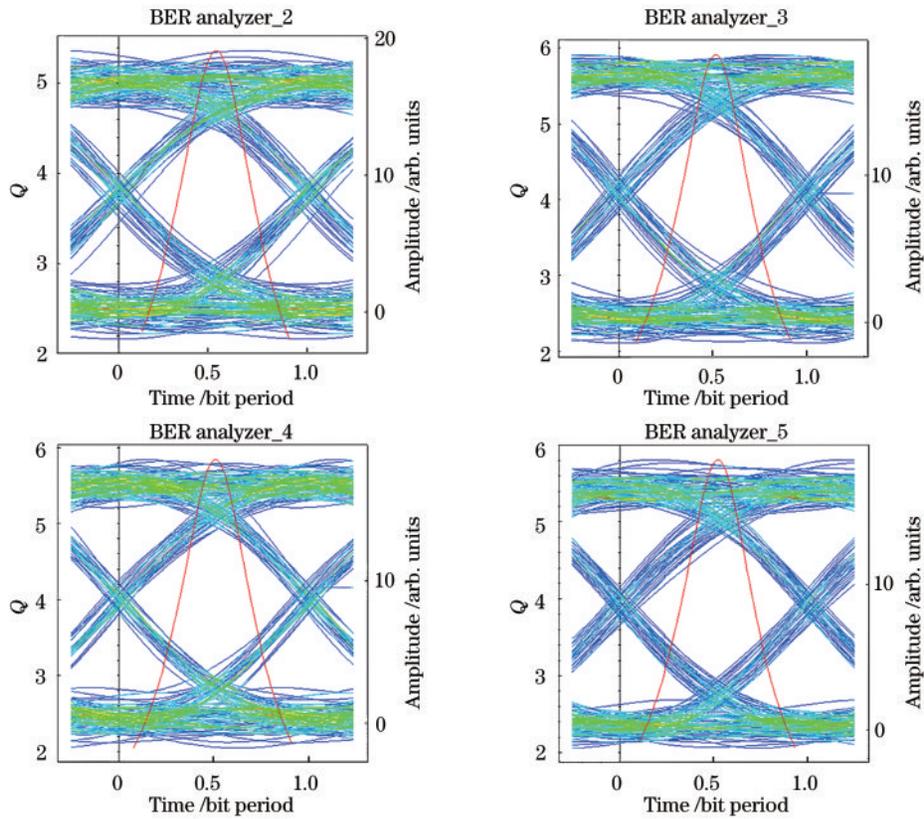


图 9 在 20 km 光纤传输下,四通道 RoF-WDM-PON 系统的下行眼图  
 Fig. 9 Downstream eye diagram of four-channel RoF-WDM-PON system for 20 km optical fiber transmission

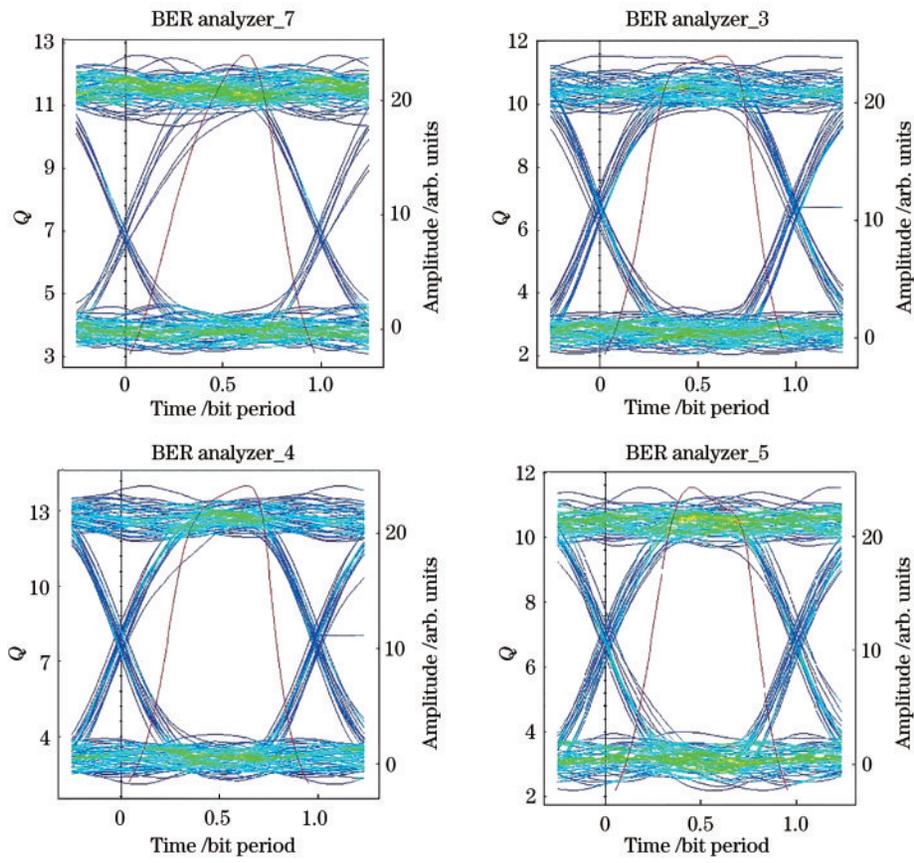


图 10 在 B2B 传输下,四通道 RoF-WDM-PON 系统的上行眼图

Fig. 10 Upstream eye diagram of four-channel RoF-WDM-PON system for B2B transmission

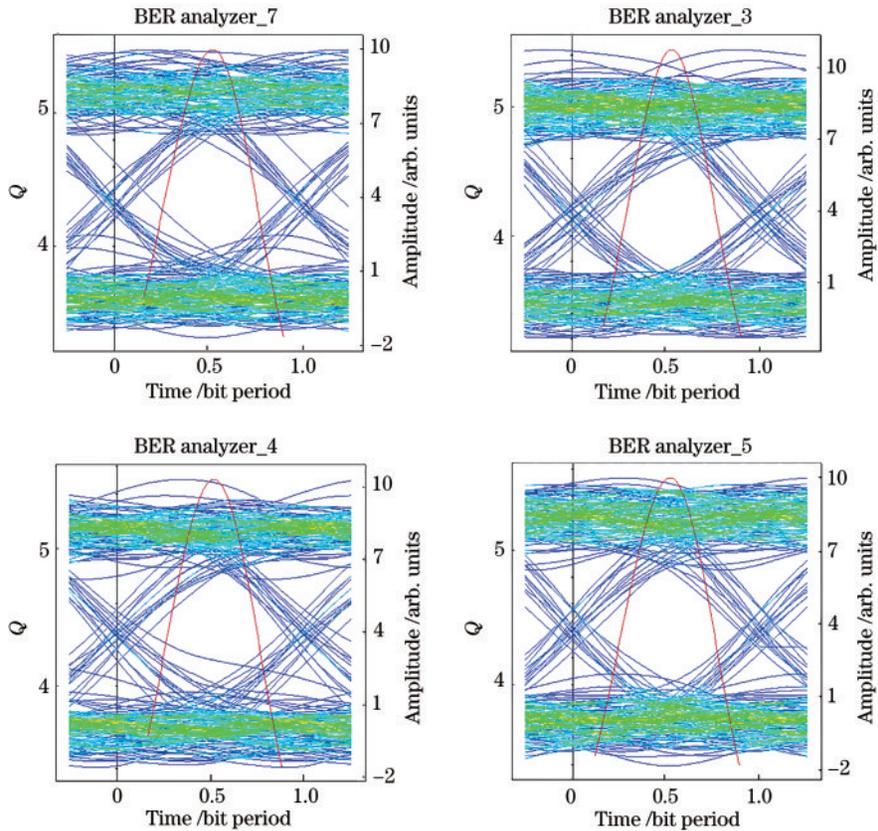


图 11 在 20 km 光纤传输下,四通道 RoF-WDM-PON 系统的上行眼图

Fig. 11 Upstream eye diagram of four-channel RoF-WDM-PON system for 20 km optical fiber transmission

张开程度会随着传输距离的增加而减小,但测得上行接收信号的 BER 值为  $2.53 \times 10^{-8}$ ,仍能体现出该系统成功实现了 10 Gbit/s 的全双工传输。

### 4.2 RoF-TWDM-PON 系统

TWDM-PON 集成了 TDM 和 WDM 两种技术,同时具备了 TDM 和 WDM 的优点,被 FSAN 选为 NG-PON2 的首选候选方案。该系统的带宽容量大,具有良好的向上兼容性,升级成本低,满足了多业务的需求,有助于实现网络的平滑升级。基于 TWDM-PON 的优势,将 TWDM-PON 和 RoF 技术相融合,实现光纤通信和无线网络的集成,已经成为了许多无线接入网络的替代方案。另外,因为 TWDM 信号由不同波长的 TDM 信号叠加而成,所以多个远程基站可以共享相同波长的不同时间隙。因此,相对于 RoF-WDM-PON 系统, RoF-TWDM-PON 系统可利用较少的波长资源来实现,极大地降低了系统的成本和 ONU 的功耗。

由于 TWDM-PON 的向上兼容性强,所以在 RoF-TWDM-PON 系统内增加无源器件,可以升级现有的网络,实现新的光网络的集成和扩展。为了提供更灵活的波长选择方案以及更高的频谱利用效率,文献 [16]通过在中心站和基站之间加入次级中心站(SCS)结构来降低系统色散和提高光波资源配置的灵活性,

实现了一种灵活高效的全双工 RoF-WDM-PON 系统。在数据速率为 1.25 Gbit/s,传输长度为 40 km 时,实现了系统 BER 低于  $10^{-9}$  的双向可靠传输。为进一步简化系统结构和满足多用户的需求,本文构建了四通道全双工传输的 10/10 Gbit/s RoF-TWDM-PON 系统,每个信道支持 2.5 Gbit/s 和  $10^{-9}$  的 BER,对于提升系统容量和传输效率具有重要意义。

#### 4.2.1 系统架构

图 12 展现了四通道传输的全双工 10/10 Gbit/s RoF-TWDM-PON 系统。TWDM 信道由一对下行波长信道和一个上行波长信道组成,可实现点对多点连接。对于下行传输,该系统的波长范围是 1596~1598.4 nm,波长间隔为 0.8 nm。采用了与 RoF-WDM-PON 系统相同的微波信号的产生和调制方法。在 OLT 端,每个通道的 PRBS 发生器发出的随机的二进制序列进行 NRZ 编码,编码后的信号与 15 GHz 的正弦信号混频。然后混频后的信号被发送到由连续波(CW)激光器驱动的 MZM 进行调制,从而生成下行信号。四路下行信号通过复用器合成一束光波送入到光环行器和双向光纤中进行传输。经过 20 km 的光纤传输后,下行信号被解复用器分离,然后分配到四个 ONU 进行光电检测和接收。同时可以利用 BER 分析仪来检测下行传输的性能。

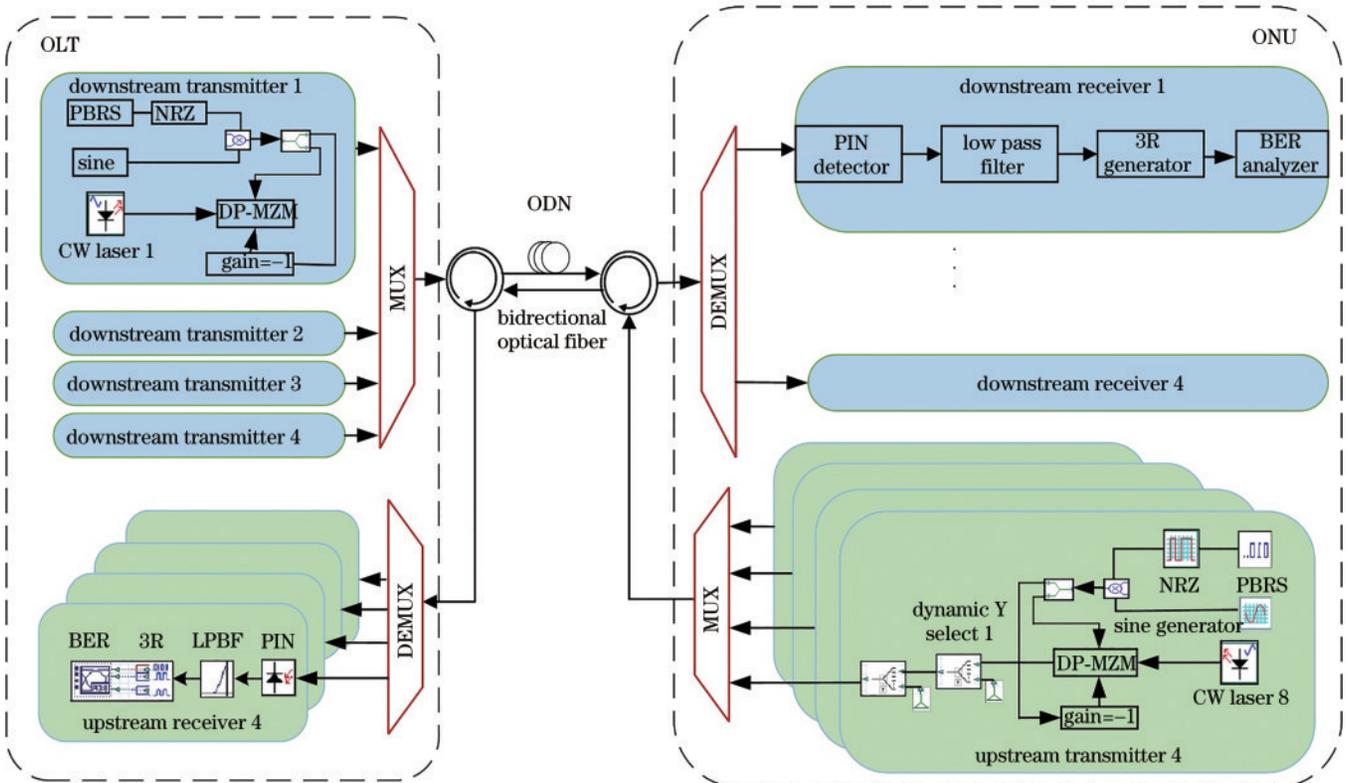


图 12 RoF-TWDM-PON 系统结构图

Fig. 12 Structure of RoF-TWDM-PON system

对于上行传输,四个连续波激光器的中心波长选择范围在 1524 nm 和 1526.4 nm 之间,间隔为 0.8 nm。在每个信道中,通过 PBRs 产生器、NRZ 编码器、正弦信号发生器和 MZM 进行外调制,产生的上行信号分别通过两个级联的动态 Y 选择。对于两个级联的动态 Y 选择,允许使用 4 个时隙在特定的时间里传输上行信号。

第一次动态选择 Y 的切换时间 ( $T_{S1}$ ) 为

$$T_{S1} = T_{\text{time slot}} \times (1/B_{\text{bit rate}}) \times L_{\text{sequence length}}/N, \quad (7)$$

对于第二个动态,选择 Y 的切换时间 ( $T_{S2}$ ) 如下所示:

$$T_{S2} = T_{\text{time slot}} \times \left( \frac{1}{B_{\text{bit rate}}} \right) \times L_{\text{sequence length}}/N + T_{\text{time window}}/N, \quad (8)$$

式中:  $N=4$ , 代表使用同一波长的用户数量; 时隙  $T_{\text{time slot}}$  分别为 0、1、2、3; 对于传输速率为 2.5 Gbit/s 的系统, 时间窗口  $T_{\text{time window}}$  为  $2.56 \times 10^{-8}$  s。

最终上行信号通过 20 km 光纤传输后通过解复

用器被分离成四路信号,分别发送到 OLT 端。四个信道的上行信号在接收机中通过 PIN 进行光电检测,从而得到 30 GHz 的微波信号。另外,还可以利用 3R 再生器和 BER 分析仪对上行传输的性能进行监测。

#### 4.2.2 结果分析

图 13 和图 14 分别展现了该四通道的 RoF-TWDM-PON 系统分别在 B2B 传输和 20 km 光纤传输时下行接收信号的眼图。在激光器的输入功率为 0 时,可以看到随着光纤距离的增加,接收信号眼图的张开程度会变小,线条变得杂乱,说明在长距离传输时光纤产生的一些非线性效应会使信号产生失真。由 BER 分析仪可得,经过 20 km 传输后的下行信号的 BER 达到了  $1.67 \times 10^{-9}$ , 同时 Q 因子为 5.91。当激光器的输入功率为 5 dBm 时,系统的下行信号误码率可降低至  $10^{-29}$ 。因此,可以通过调节激光器的输入功率和添加补偿光纤等方法降低系统的损耗,改善系统的整体性能。

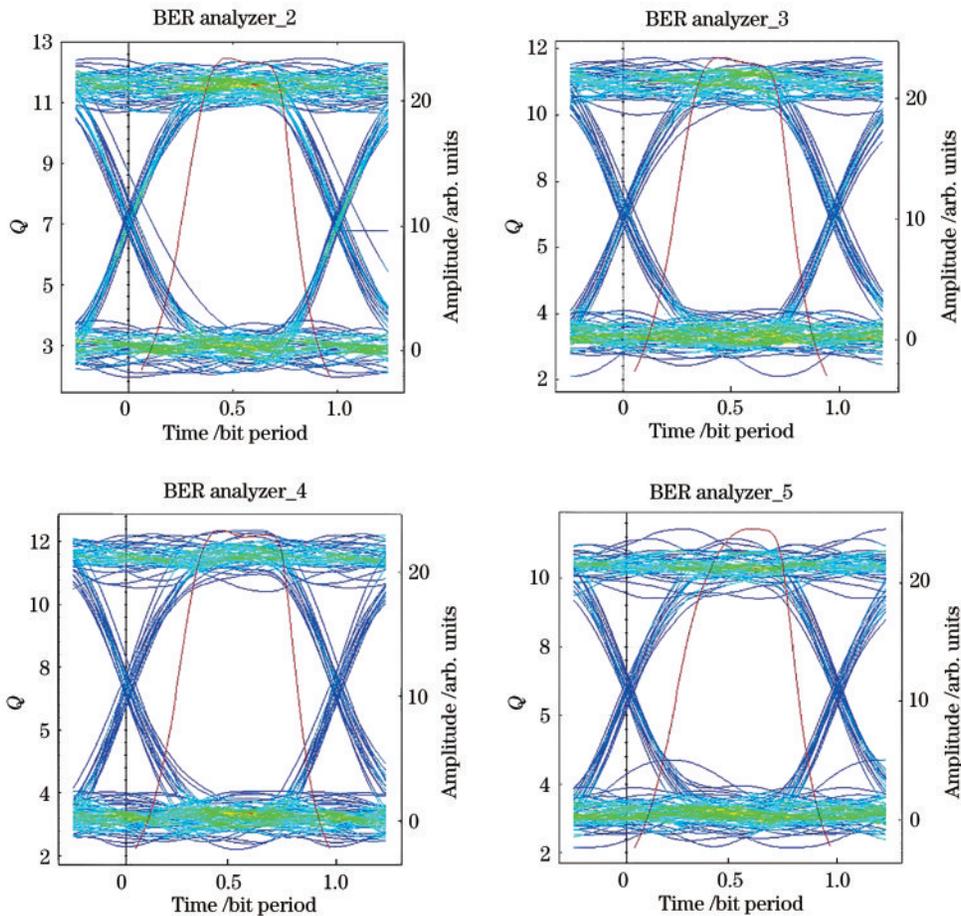


图 13 在 B2B 传输下,四通道的 RoF-TWDM-PON 系统的下行眼图

Fig. 13 Downstream eye diagram of four-channel RoF-TWDM-PON system for B2B transmission

图 15 和图 16 分别展现了该系统在 B2B 传输和 20 km 光纤传输时上行接收信号的眼图。由于 TWDM 信道的每个波长只占用部分时隙,其他时隙并没有用来传输信息,所以在上行信号的眼图中,下眼皮部分比

较厚,所代表的信息“0”部分比较多。检测到在经过 20 km 光纤的上行传输中,BER 最小可达  $2 \times 10^{-8}$ ,此时 Q 因子为 5.37。综上所述,这些结果体现了该全双工 10/10 Gbit/s RoF-TWDM-PON 系统的成功传输。

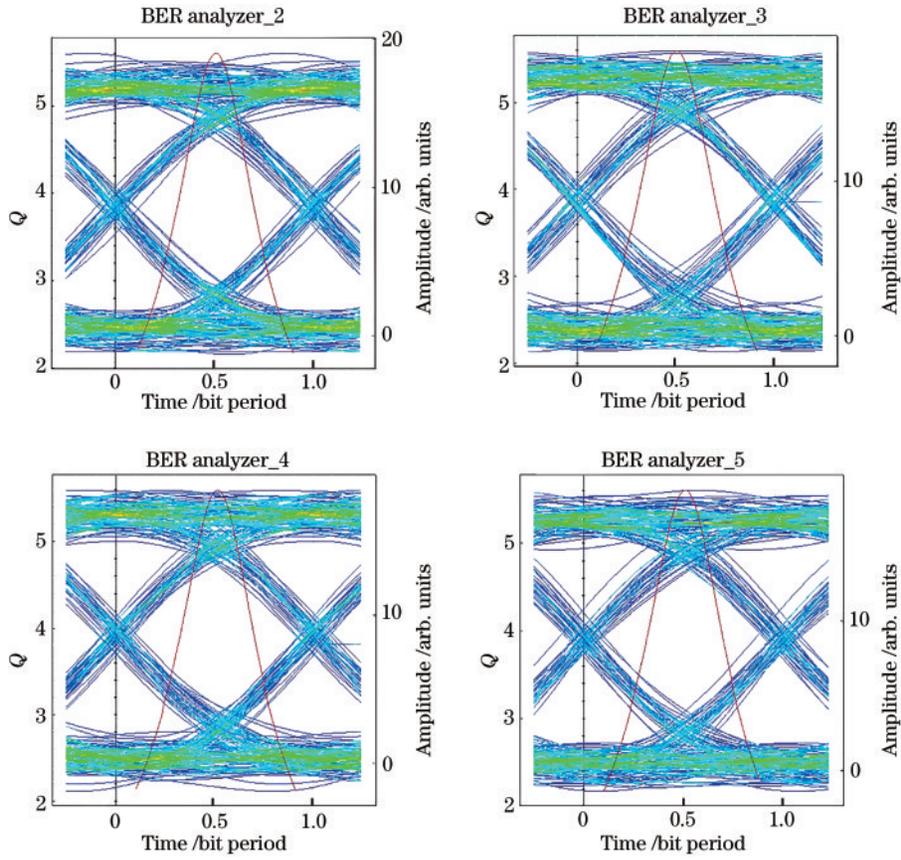


图 14 在 20 km 光纤传输下,四通道 RoF-TWDM-PON 系统的下行眼图

Fig. 14 Downstream eye diagram of four-channel RoF-TWDM-PON system for 20 km optical fiber transmission

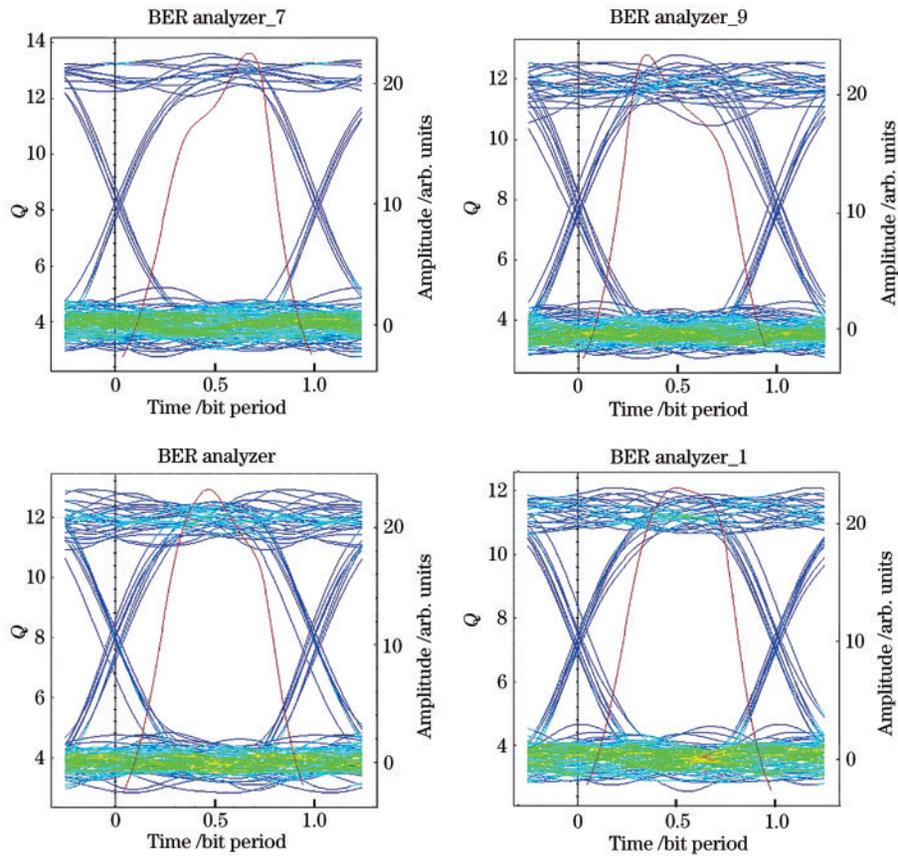


图 15 在 B2B 传输下,四通道 RoF-TWDM-PON 系统的上行眼图

Fig. 15 Upstream eye diagram of four-channel RoF-TWDM-PON system for B2B transmission

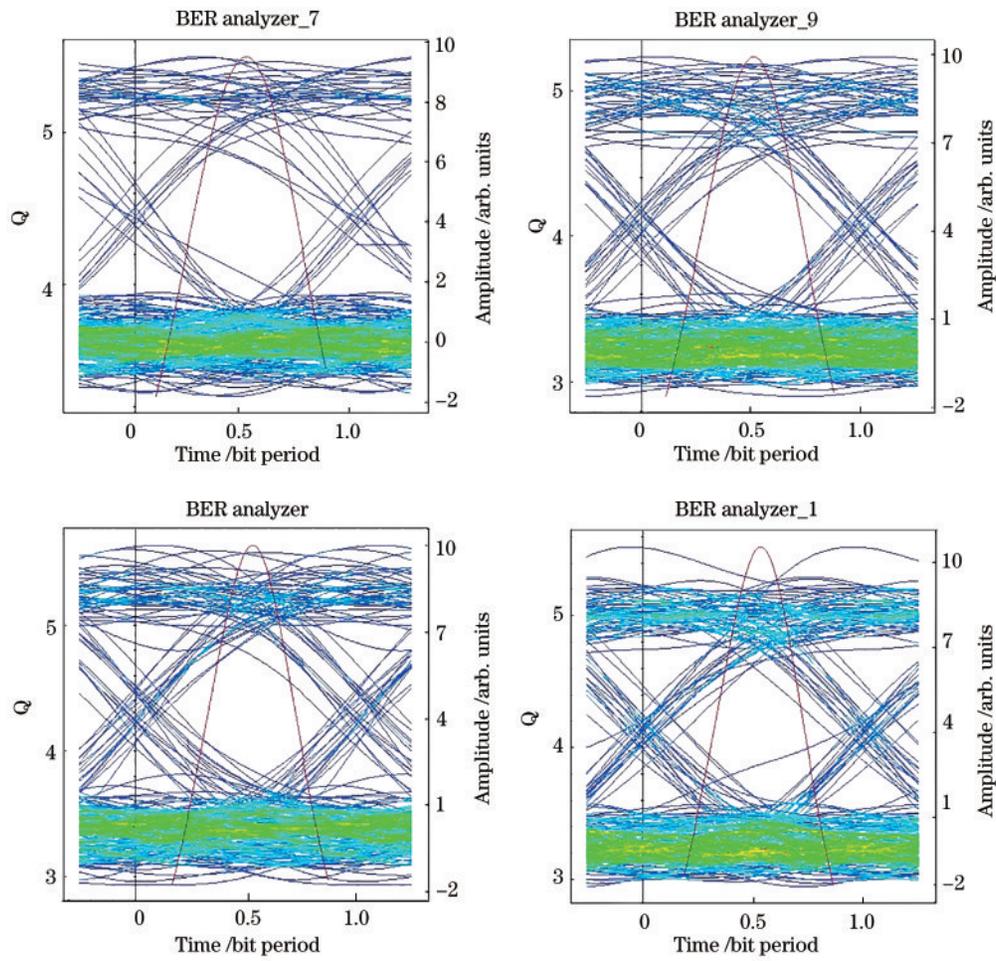


图 16 在 20 km 光纤传输下,四通道 RoF-TWDM-PON 系统的上行眼图

Fig. 16 Upstream eye diagram of four-channel RoF-TWDM-PON system for 20 km optical fiber transmission

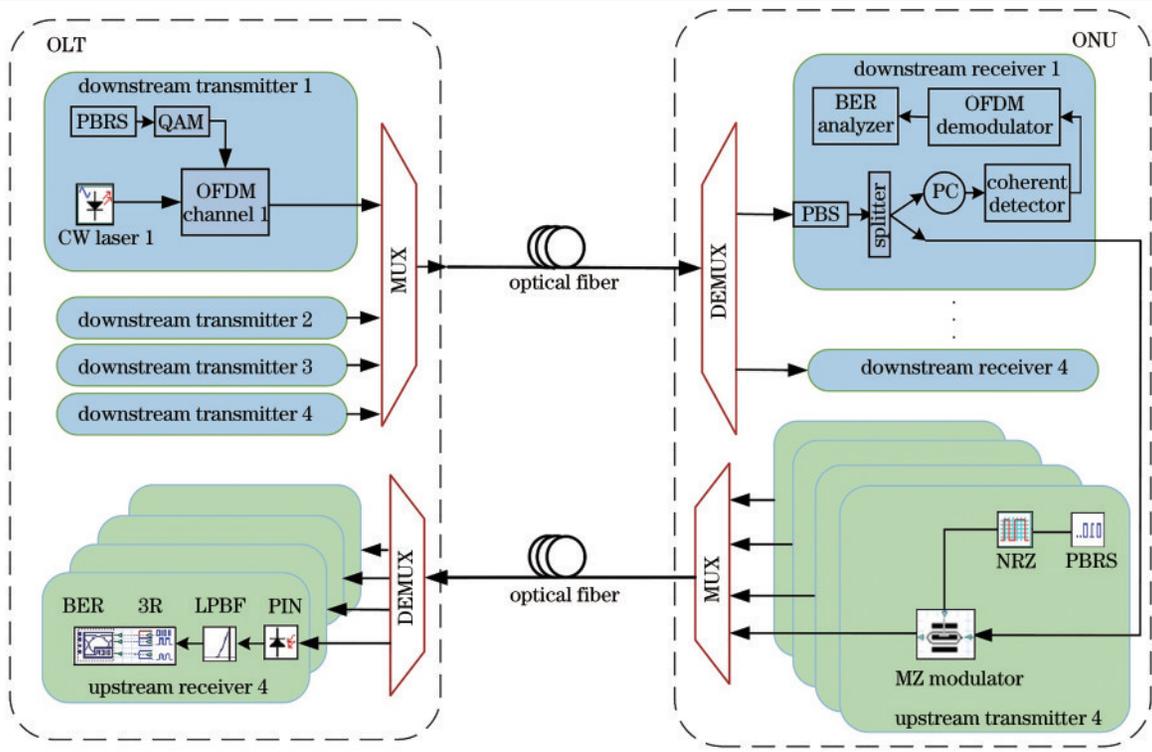
### 4.3 RoF-OFDM-WDM-PON 系统

OFDM 技术通过并行传输实现了高数据速率和高频谱效率传输,是一种多载波调制技术,已经广泛应用于高速光接入网中。在 OFDM-PON 中,OFDM 子载波相互正交,被分配到每一个用户端,能够有效抵抗码间串扰和色散问题,适用于高速率传输的无线接入网络。RoF 系统与 OFDM-PON 相融合,有利于充分利用频谱资源,实现大容量、低成本、高带宽的有线和无线接入网络。为降低 RoF 系统的 BER 和提升速率,李汐等<sup>[32]</sup>提出了一种基于概率整形(PS)的 W 波段的 OFDM-RoF 系统。在符号速率为 2.5 Gbit/s 时,该系统的误码率可低至  $10^{-9}$ ,超越了传统的 16QAM/OFDM-RoF 系统性能。在文献[13]提出的支持有线和 60 GHz 的无线选择接入的 OFDM-RoF-PON 链路中,从下行链路提取光载波用于上行链路,上行 2.5 Gb/s 的二进制振幅键控(OOK)信号的仿真结果表明,对于有线和无线接入上行链路,25 km 光纤传输后几乎没有传输损失,接收器灵敏度约为  $-24.5$  dBm, BER 为  $10^{-9}$ 。这种载波再调制技术尤其适用于 RoF 系统和 OFDM-WDM-PON 融合的系统,由于 ONU 无需设置额外的光源,从而实现了 ONU。另外,由于融合系统

十分需要高质量和高性能的光源,光学频率梳技术的研究已成为提升下一代网络传输的频谱利用率和传输速率<sup>[33]</sup>的关键性课题。在之前的工作中,本课题组提出了一种基于光学频率梳的生成技术和直接检测技术的 RoF-WDM-OFDM-PON 融合系统<sup>[34]</sup>,通过光学频率梳技术生成的高质量光源,实现了 7.5 GHz 有线信号和 12.5 GHz 无线信号在 50 km 光纤上的共传,是一种低成本、高效的全双工传输方案。但在长距离单模光纤系统中,由于 OFDM 对频率和噪声有较高的灵敏度,所以采用相干检测的方法能够更好地抑制色散,提升接收机的灵敏度,有利于 OFDM 信号的长距离通信。因此本文提出的四通道 RoF-OFDM-WDM-PON 融合系统,在传输距离为 50 km、BER 为  $10^{-4}$  的情况下,能够通过偏振复用技术和相干检测技术实现 OFDM 信号的成功接收和上行 OOK 信号的再调制,有效提升了系统的可靠性。

#### 4.3.1 系统架构

本文基于相干检测和 WDM 技术,提出了一种四通道的 RoF-OFDM-WDM-PON 系统如图 17 所示,其中下行传输 OFDM 信号,上行传输采用 OOK 调制技术。在下行发射机中,由 PBRS 发生器和正交幅度调



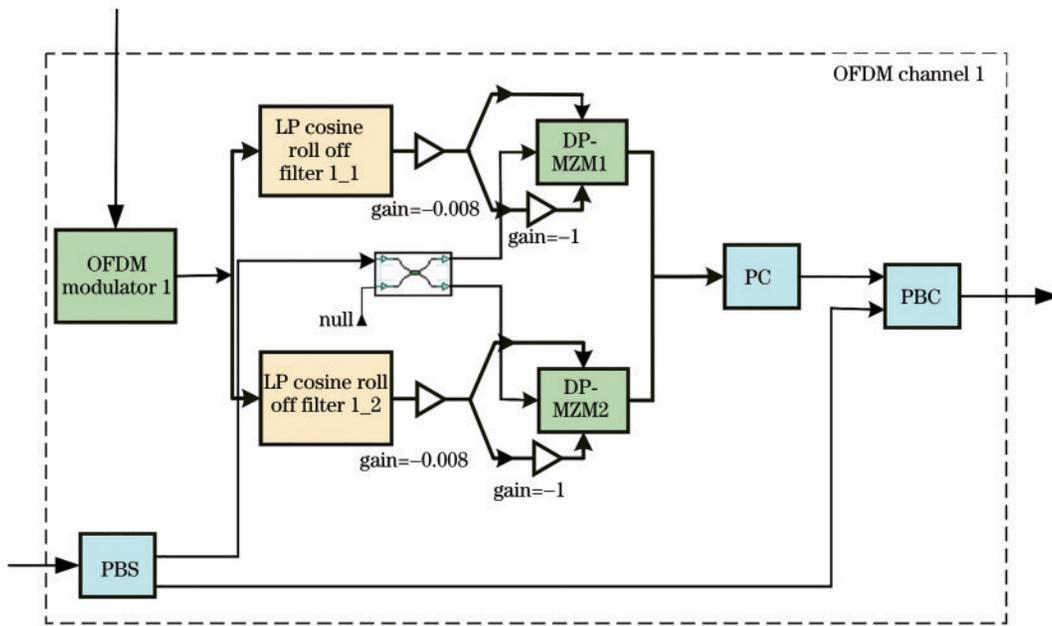
OFDM: orthogonal frequency division multiplex  
QAM: quadrature amplitude modulation

PBS: polarization splitter  
PC: polarization controller

图 17 RoF-OFDM-WDM-PON 系统结构图  
Fig. 17 Structure of RoF-OFDM-WDM-PON system

制(QAM)序列生成器相连,产生了两个并行的子序列。比特率为 12.5 Gbit/s。每个发送机中 OFDM 信道的结构图如图 18 所示。由 QAM 序列生成器产生的

序列被送入 OFDM 调制器中进行调制,调制格式为 QAM-4 调制。子载波的数量为 128,快速傅里叶变换 (FFT) 的点数 为 1024,前缀的数目 为 64。在每个



PC: power combiner; PBC: polarization combiner

图 18 OFDM 信道的结构图  
Fig. 18 Structure of OFDM channel

OFDM 符号周期内,所有子载波频率在生成的 OFDM 信号中都是正交的。然后低通余弦滚降滤波器对调制后的同相和正交相输出的信号进行滤波。在该系统四个信道中,四个 CW 激光器的中心频率分别为 193.05、193.10、193.15、193.20 THz,频率间隔为 50 GHz。每个 OFDM 信道设置了两个由 CW 激光器驱动的 DP-MZM,用于将 OFDM 数据上转换为光信号,从而得到输出的下行 OFDM 信号,可表示为

$$E_{out}(t) = S_e(t) \exp(j\omega_{CW} + \phi_{CW}), \quad (9)$$

式中: $S_e(t)$ 是时域中的 OFDM 电信号; $\omega_{CW}$ 是 CW 激光器的角频率; $\phi_{CW}$ 是 CW 激光器的相位。

四个 OFDM 信道的下行信号通过 WDM 复用器合成一束光波送入到 50 km 的单模光纤中传输。通过解复用分离后,四个信道的信号分别经过偏振分束器(PBS)分成两束光波。一束光波经过偏振控制器后直接输入到相干检测机内用于 OFDM 信号的接收。由相干检测接收机接收的信号可表示为

$$E_{rev}(t) = E_{out}(t) \otimes h(t) + n_{ch}(t), \quad (10)$$

式中: $h(t)$ 是信道的脉冲响应; $n_{ch}(t)$ 是信道引起的噪声。

经过光电检测的信号还可被发送到 OFDM 解调器和 BER 分析仪中来分析传输性能。另一束光波经过分束器后分成两个相同的中心光载波,既能为相干检测接收机提供光源,又能用于上行传输,极大地简化了 ONU 的结构。对于上行传输部分,考虑到整个链路的损耗,采用 OOK 的调制方法进行上行链路的传输。在每个信道的上行发射机中,先由 PRBS 发生器生成 2 Gbit/s 的伪随机序列,然后序列被送到 NRZ 生成器中以产生二进制信号。这些二进制信号被注入到 MZM 中,经过外调制生成上行信号送入到光纤传输。经过 50 km 光纤传输后,上行信号经解复用器分离后被发送到不同的 OLT 端进行光电检测。可以通过 BER 分析仪对上行传输的误码率进行分析。

#### 4.3.2 结果分析

图 19 和图 20 清晰地展现了在 B2B 和 50 km 光纤两种传输情况下该融合的 RoF-OFDM-WDM-PON 系统的四个 OFDM 信道在 ONU 端的接收星座图。可以看到,经过 50 km 单模光纤传输后,相比于 B2B 传输的结果,系统的星座图开始出现偏移、旋转和分散,这都

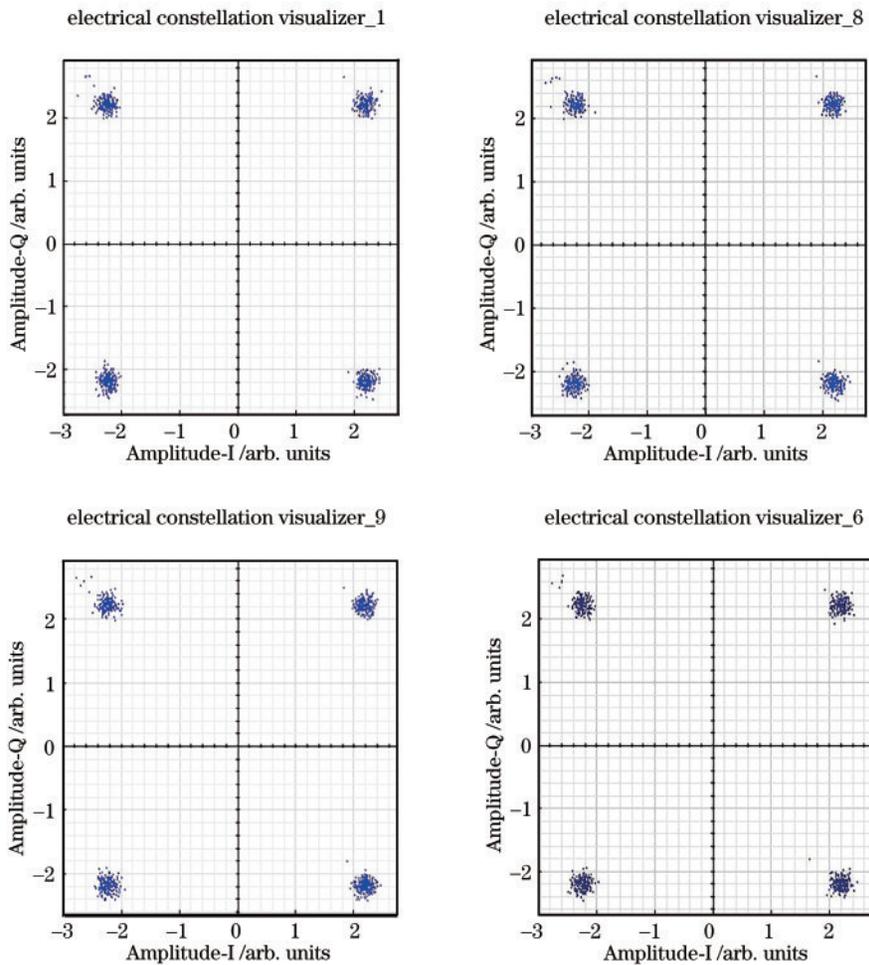


图 19 在 B2B 传输下,四通道 RoF-OFDM-WDM-PON 系统的下行星座图

Fig. 19 Downstream constellation diagram of four-channel RoF-OFDM-WDM-PON system for B2B transmission

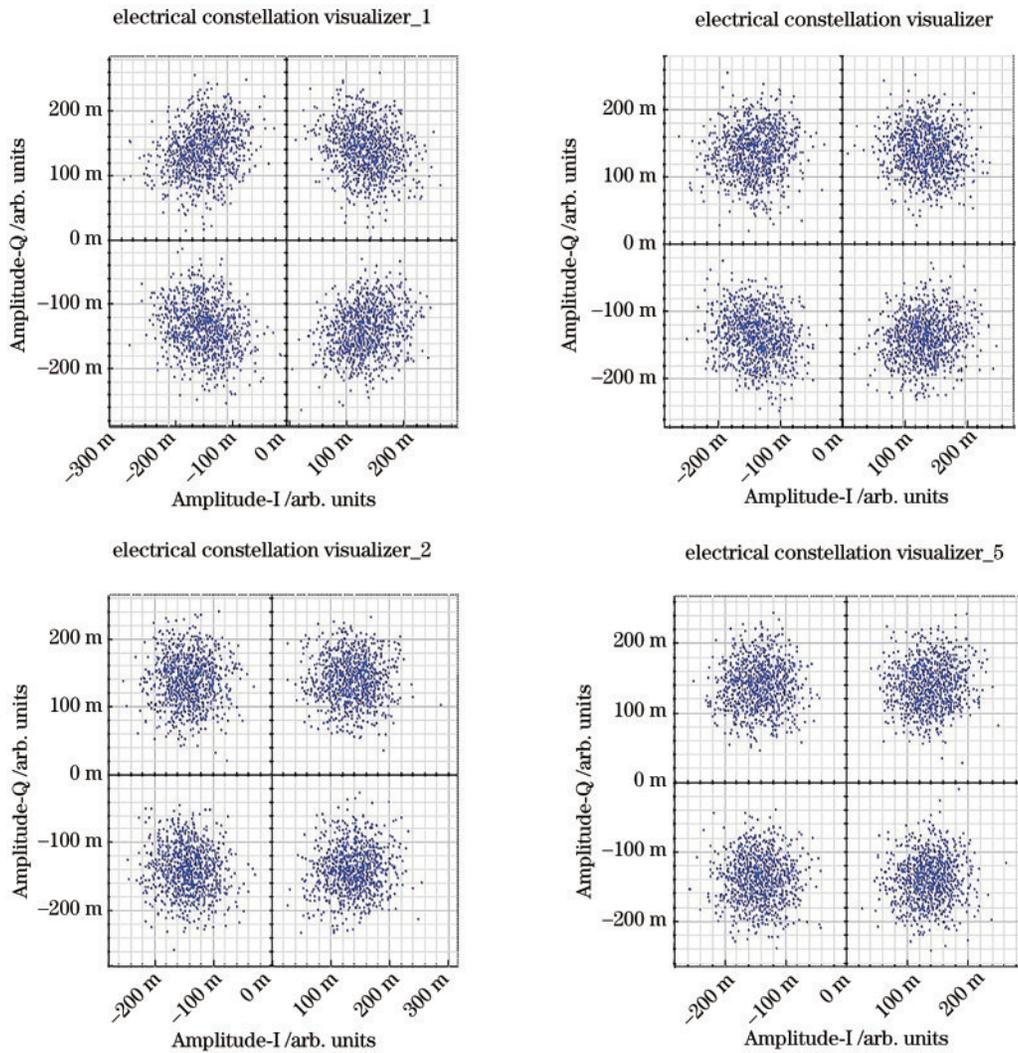


图 20 在 50 km 光纤传输下,四通道 RoF-OFDM-WDM-PON 系统的下行星座图

Fig. 20 Downstream constellation diagram of four-channel RoF-OFDM-WDM-PON system for 50 km fiber transmission

是光纤的非线性效应造成的影响。但四个 OFDM 信道的星座图分布均匀,仍然能体现出 4-QAM OFDM 信号被成功接收,该系统能够成功支持 50 km 光纤长距离传输。

光通信系统的眼图,就是由解调后经过低通滤波器输出的基带信号,以码元定时作为同步信号在示波器屏幕上显示的波形。干扰和失真所产生的传输畸变,可以在眼图上清楚地显示出来。所以利用 BER 分析仪观测眼图是一种常用的衡量系统性能的测试手段。图 21 和图 22 体现了在 B2B 传输和 50 km 光纤传输两种情况下的经 OOK 调制的上行接收信号的眼图,此时上行传输系统的速率为 8 Gbit/s。在上行信号经过 50 km 光纤传输后,观察到四个信道的眼图张开明显,无紊乱现象,同时利用 BER 分析仪测得此时 Q 因子最大达到 22.4, BER 低至  $6.2 \times 10^{-108}$ 。综上所述,经过 50 km 光纤传输的 OOK 上行信号能够成功被接收机接收,并且具有很小的传输损耗和失真,体现了该系

统很好的传输性能。

#### 4.4 结果讨论

根据 RoF-WDM-PON 系统、RoF-TWDM-PON 系统和 RoF-OFDM-WDM-PON 系统的仿真结果,可通过调节系统的输入功率、传输距离等参数来监测系统的 BER 和 Q 因子的变化,并且利用绘制的变化曲线对这些系统的下行和上行的传输性能进行对比和分析。

##### 4.4.1 下行传输的对比分析

图 23 分别展现了在系统的输入功率为 0 时, RoF-WDM-PON 系统、RoF-TWDM-PON 系统和系统经过复用器后的下行信号光谱。可以看到 RoF-WDM-PON 系统和 RoF-TWDM-PON 系统在下行传输时实现了双边带调制,生成的下行信号可以成功在 ONU 中经光电检测生成微波信号。另外, RoF-OFDM-WDM-PON 系统也成功传输了 4-QAM OFDM 信号。

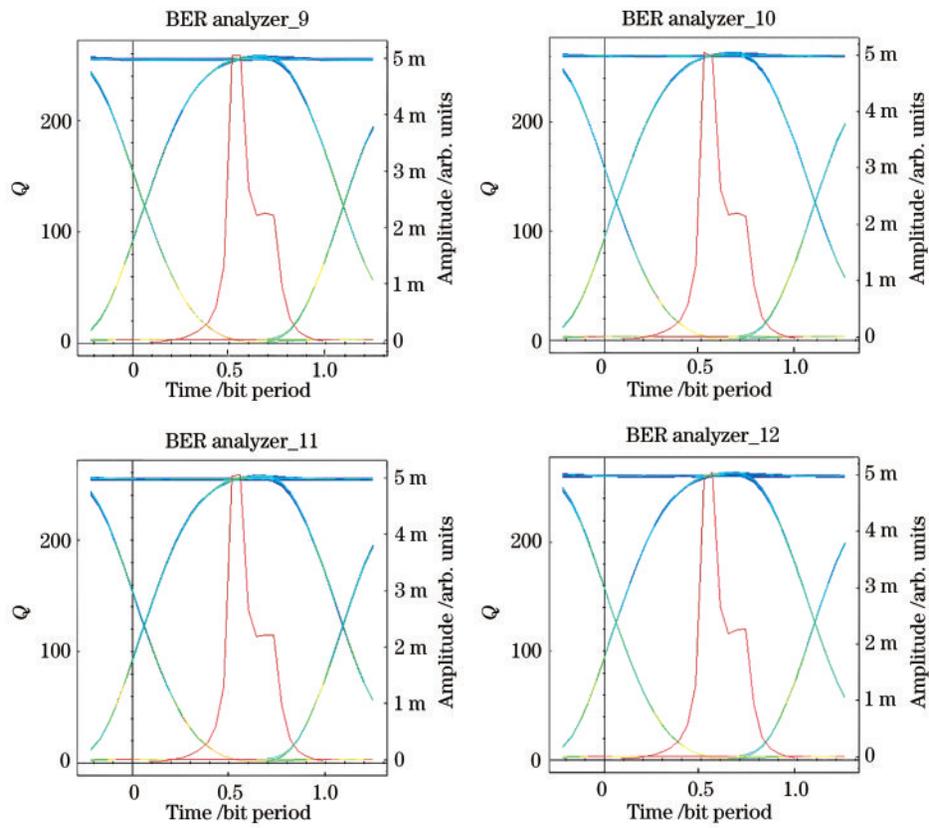


图 21 在 B2B 传输下,四通道 RoF-OFDM-WDM-PON 系统的上行眼图

Fig. 21 Upstream eye diagram of four-channel RoF-OFDM-WDM-PON system for B2B transmission

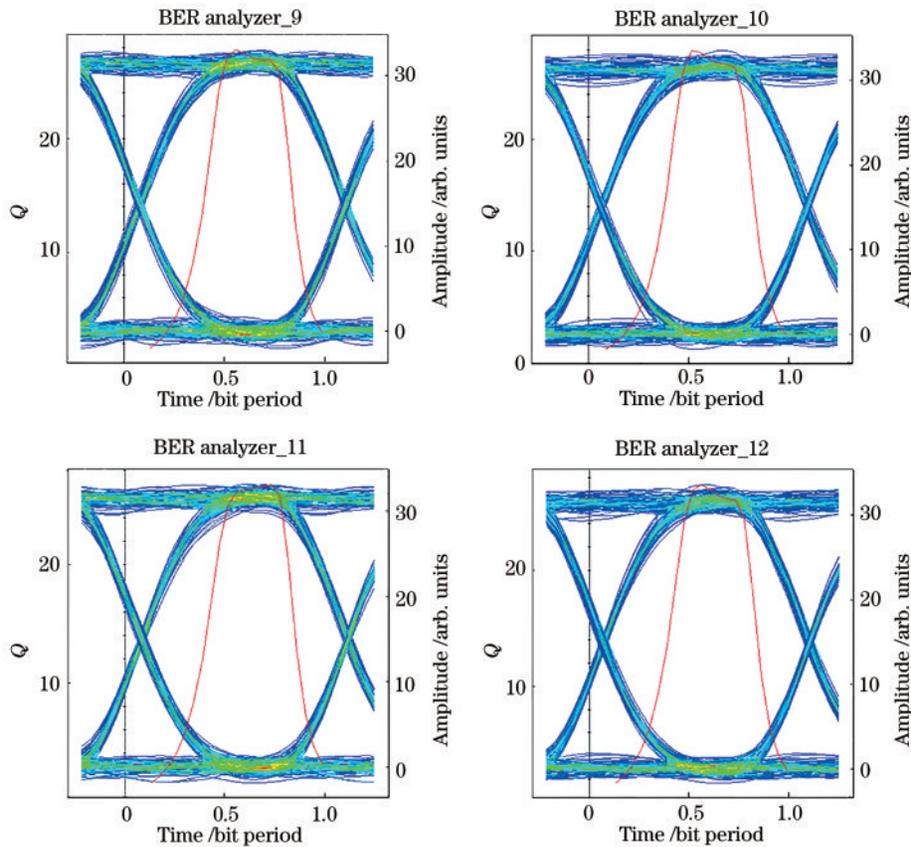


图 22 在 50 km 光纤传输下,四通道 RoF-OFDM-WDM-PON 系统的上行眼图

Fig. 22 Upstream eye diagram of four-channel RoF-OFDM-WDM-PON system for 50 km fiber transmission

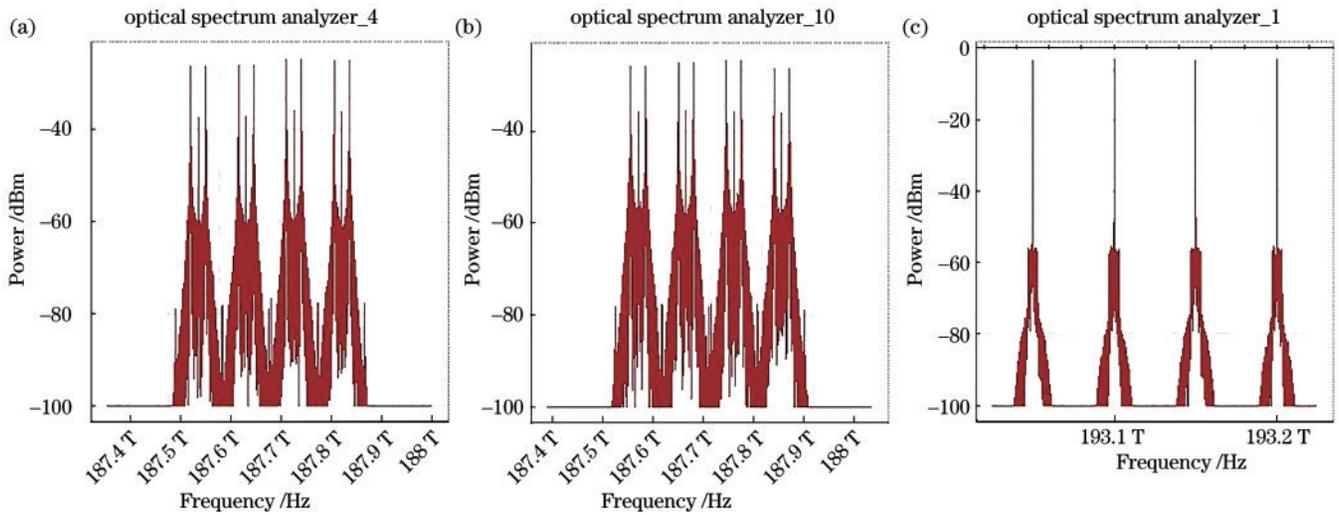


图 23 下行传输时, (a) RoF-WDM-PON、(b) RoF-TWDM-PON、(c) RoF-OFDM-WDM-PON 系统的下行信号频谱图  
Fig. 23 Downstream signal spectra of (a) RoF-WDM-PON, (b) RoF-TWDM-PON, and (c) RoF-OFDM-WDM-PON systems during downstream transmission

从图 24 中三个系统下行信号的接收效果图来看, 当接收光功率增加时, RoF-WDM-PON 和 RoF-TWDM-PON 中传输的微波信号以及 RoF-OFDM-WDM-PON 传输的 4-QAM OFDM 信号的传输性能都得到了提高, 眼图变得清晰, 张开程度变大, 星座点的位置更加集中。在接收功率为  $-20$  dBm 时, RoF-WDM-PON 的 BER 为  $3.8 \times 10^{-9}$ , RoF-TWDM-PON 的 BER 为  $1.1 \times 10^{-8}$ , 此时系统的传输距离是 20 km。由于 OFDM 信号对频率和相位噪声的高灵敏度和系统接收机成本较高等问题, RoF-OFDM-WDM-PON 的 BER 为  $3.25 \times 10^{-4}$ 。但此时整个 RoF-OFDM-WDM-PON 系统下行传输的 Q 因子为 39, 实现了下行 50 Gbit/s 和上行 8 Gbit/s 的 50 km 光纤长距离传输, 显示出实现高速率的无线传输的巨大潜力。

根据改变系统的传输距离, 以下还绘制了 RoF-WDM-PON 和 RoF-TWDM-PON 两个系统的 BER 变化曲线, 如图 25 所示。

在传输距离从 0 增大到 50 km 时, 两个系统的上行传输的 BER 不断增大, 但可以观察到 RoF-TWDM-PON 系统的 BER 一直低于 RoF-WDM-PON。在系统的输入功率 Power 为 10 dBm、传输距离 Length 为 20 km 以及比特率为 2.5 Gbit/s 时, 对比于 RoF-WDM-PON 的 BER 为  $2 \times 10^{-11}$ , Q 因子为 5.85, RoF-TWDM-PON 系统的 BER 可达到  $10^{-12}$ , Q 因子为 6.94, 体现了 RoF-TWDM-PON 系统在下行远距离传输的优势。

#### 4.4.2 上行传输的对比分析

本文提出的三种 RoF-PON 融合系统中, 由于 RoF-OFDM-WDM-PON 采用的上行传输方式为结构简单 OOK 调制, 通过测量可知该系统的上行传输 BER 达到了  $6.2 \times 10^{-108}$ , 整个传输具有很小的损耗。因此, 以下只对比 RoF-WDM-PON 和 RoF-TWDM-

PON 的上行链路的性能。

图 26 和图 27 分别展示了在光线长度不断增加时, RoF-WDM-PON 和 RoF-TWDM-PON 系统在上行传输时的 Q 因子与 BER 的变化。Q 因子的定义是接收机判决电平信号和噪声的比值, 是目前衡量光通信系统性能的重要指标。在上行链路的输入功率为 0 时, 由图 26 和图 27 所展现的曲线变化可以观察到相较于 RoF-WDM-PON 系统, RoF-TWDM-PON 系统的 Q 值略大, 且其 BER 值一般低了 1~2 个数量级, 说明了 RoF 与 TWDM-PON 融合系统在传输时的损耗较低, RoF-TWDM-PON 上行传输的性能优于 RoF-WDM-PON 系统。

随着传输距离的增加, 光纤的非线性效应使得各信道的功率变低、噪声增大, 因此系统的传输性能也会变差。可以将系统的输入功率设置为 10 dBm 来改善传输性能, 达到理想传输。此时可看到在未达到 20 km 光纤传输时, RoF-TWDM-PON 上行传输的性能优于 RoF-WDM-PON 系统。但在超过 20 km 光纤传输后, 由于系统的延迟和符号间的干扰等, 信号的功率开始衰减, RoF-TWDM-PON 系统的 Q 因子减小、BER 增大, 其损耗明显大于 RoF-WDM-PON 系统, 这时的 RoF-WDM-PON 系统性能优于 RoF-TWDM-PON。然而, 通过对比 Power 为 0 和 Power 为 10 dBm 两种情况下两种系统的 Q 因子与 BER 的数值, 证明提升上行链路的输入功率, 可以极大地降低传输损耗, 改善系统的传输和接收性能。

#### 4.5 系统分析

根据上述提到的系统测试结果, 对 RoF-WDM-PON、RoF-TWDM-PON 和 RoF-OFDM-WDM-PON 三种系统的特性进行了对比, 如表 1 所示。在所提的 RoF-WDM-PON 和 RoF-TWDM-PON 中, 下行和上行的比特率均为 2.5 Gbit/s, 由于是四通道系统, 整个

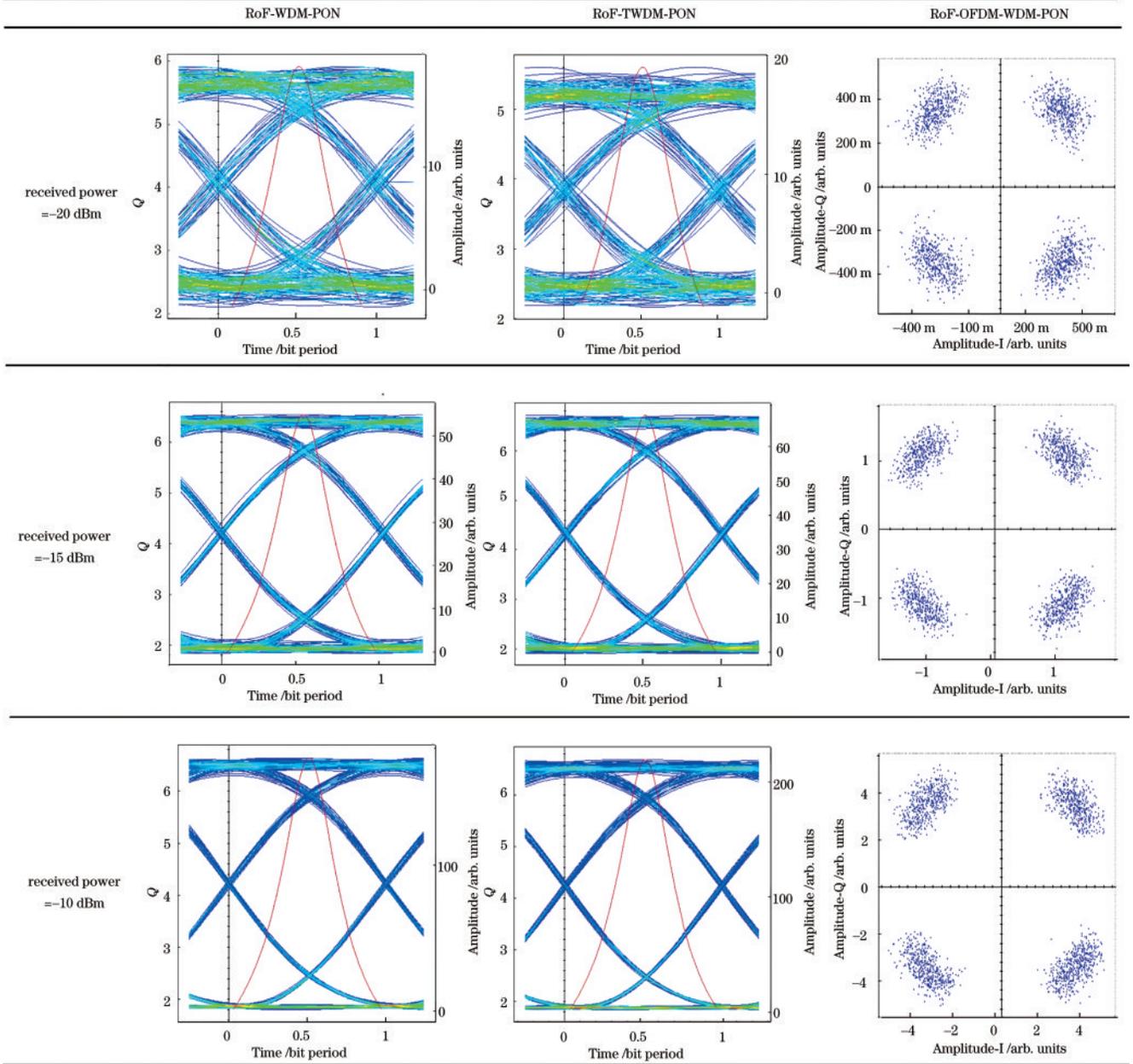


图 24 接收光功率变化时,各系统的下行信号接收结果图

Fig. 24 Received results of downstream signal of each system as received optical power changes

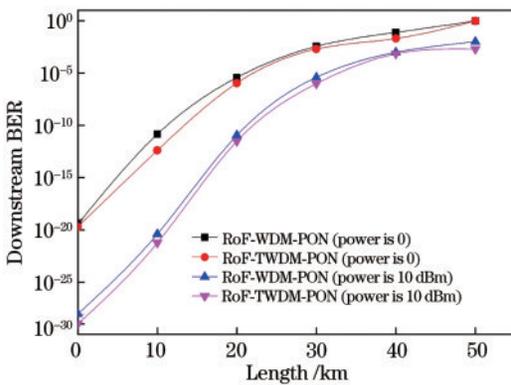


图 25 RoF-WDM-PON 和 RoF-TWDM-PON 系统下行传输 BER 与光纤长度的关系

Fig. 25 BER versus fiber length of downstream transmission in RoF-WDM-PON and RoF-TWDM-PON systems

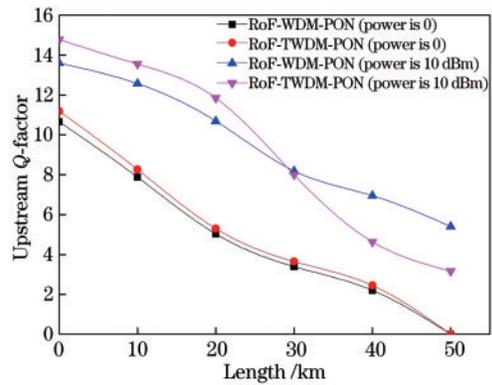


图 26 RoF-WDM-PON 和 RoF-TWDM-PON 系统上行传输 Q 因子与光纤长度的关系

Fig. 26 Q factor versus fiber length of upstream transmission in RoF-WDM-PON and RoF-TWDM-PON systems

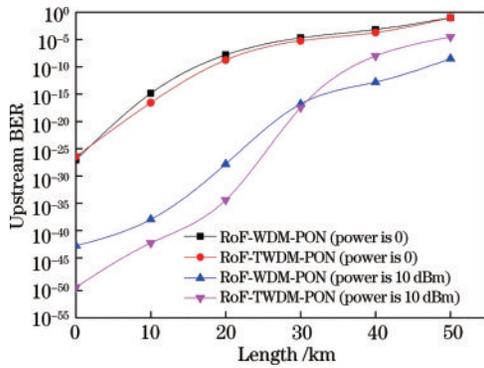


图 27 RoF-WDM-PON 和 RoF-TWDM-PON 系统上行传输 BER 与光纤长度的关系

Fig. 27 BER versus fiber length of upstream transmission in RoF-WDM-PON and RoF-TWDM-PON systems

系统容量达到 10 Gbit/s。虽然 TDM 和 WDM 技术的利用极大地提高了系统的可靠性和灵活性,同时降低了系统成本,但这两种系统由于系统串扰、频谱利用率低等问题只能达到 20 km 的高性能和低速率传输,对于未来高速无线网络的需求是远远不够的。然而所提的 RoF-OFDM-PON 和 WDM-PON 的融合系统,能够

实现 12.5 Gbit/s 下行传输,并且传输距离可达 50 km,保证了系统的高速率、高可靠性和远距离传输。但在集成 OFDM-PON 和 RoF 系统时,由于 OFDM 具有较高的峰值平均功率比,它对频率和相位噪声有较高的灵敏度,所以需要考虑发射机和接收机的复杂度及成本问题。

综上所述,RoF-WDM-PON 和 RoF-TWDM-PON 系统更适用于低速率的长距离传输,整个传输过程受噪声等干扰的影响较低,系统的失真和损耗较小。同时 WDM 的多波长特性使得每个用户在升级容量时无需铺设新的光纤,提高了系统的可靠性和安全性。而且在系统不追求高速率、需要用较低的功率和简单的结构实现大容量的长距离传输时,RoF-TWDM-PON 系统更具有独特的优势。另外,RoF-OFDM-PON 和 RoF-OFDM-WDM-PON 系统利用大量紧密间隔的正交子载波来承载业务,提供了动态带宽分配的灵活性,支持多种业务,并获得了高频谱效率,从而有效提升了 RoF 系统的传输性能。因此 OFDM-PON 与 RoF 系统融合的网络,更适用于大容量、高速率和超远距离的无线传输。

表 1 三种 RoF-PON 融合系统的对比

Table 1 Comparison of three RoF-PON converged systems

	RoF-WDM-PON	RoF-TWDM-PON	RoF-OFDM-WDM-PON
Data rate per wavelength / (Gbit·s <sup>-1</sup> )	2.5/2.5	2.5/2.5	12.5/2
Capacity / (Gbit·s <sup>-1</sup> )	10/10	10/10	50/8
Optical sources	N	N	N
Receiver structure	Simple	Simple	Complicated
Transmission distance / km	20	20	50
Superiority	High scalability	High flexibility High scalability	High data rate High scalability
Shortcoming	Low bandwidth utilization Low rate	Strong crosstalk Low rate	High peak-to-average power ratio High sensitivity

## 5 结 论

对基于微波光子学的 RoF 系统,以及 NG-PON2 的一些关键性技术和特性进行了归纳总结,然后基于 PON 和 RoF 技术的兼容性提出了 RoF 系统与 WDM-PON、TWDM-PON 和 OFDM-PON 三种无源光网络的融合方案,并对这些系统的传输性能进行了分析和讨论。由仿真结果可见 RoF-PON 系统在解决带宽紧张、降低成本和光纤损耗及远距离传输等方面展现了明显的优势。另外,在微波光子学领域中,RF 信号处理技术、RF 信号下变频技术和相控阵波束成形等微波信号处理技术已经被应用在多种通信网络,尤其是在点对点链路的应用以及毫米波光子系统中。因此,基于微波光子学的 RoF 与 PON 的融合系统未来的发展方向是集成多种通信技术,在无线接入网(RAN)体系结构、回程和前程链路以及未来无线通信、卫星通信和

军事领域中不断优化升级,有效提升通信链路的性能,为用户提供更高容量、高灵活性、多业务的接入网络。

## 参 考 文 献

- [1] Chen L, Halabi F, Giddings R P, et al. Subcarrier index-power modulated-optical OFDM with dual superposition multiplexing for directly modulated DFB-based IMDD PON systems[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 7908113.
- [2] 赵钢明. 基于 OFDM 的 RoF-PON 系统性能优化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.  
Zhao G M. Study on performance optimization of RoF-PON system based on OFDM[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2020.
- [3] 赵钢明, 张春蕾, 张晨希. 基于 RSOA 再调制的 RoF 与 OFDM-PON 混合系统仿真[J]. 光通信研究, 2019(4): 25-29, 45.  
Zhao G M, Zhang C L, Zhang C X. Simulation of RoF

- with OFDM-PON hybrid transmission system based on RSOA re-modulation[J]. *Study on Optical Communications*, 2019(4): 25-29, 45.
- [4] Yao J P. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [5] Abbas H S, Gregory M A. The next generation of passive optical networks: a review[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, 67: 53-74.
- [6] 骆思雨, 许岩, 李正璇, 等. 下一代光接入网中物理层关键技术研究进展[J]. *应用科学学报*, 2020, 38(4): 612-629.
- Luo S Y, Xu Y, Li Z X, et al. Progress in key technologies of physical layer in next generation optical access networks[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2020, 38(4): 612-629.
- [7] Chang G K, Cheng L. The benefits of convergence[J]. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2016, 374(2062): 20140442.
- [8] Zhang L, Hu X F, Cao P, et al. Simultaneous generation of independent wired and 60-GHz wireless signals in an integrated WDM-PON-RoF system based on frequency-sextupling and OCS-DPSK modulation[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 14648-14655.
- [9] Ait Ahmed B, Aghzout O, Chakkour M, et al. Transmission performance analysis of WDM radio over fiber technology for next generation long-haul optical networks[J]. *International Journal of Optics*, 2019, 2019: 5087624.
- [10] Xiong C, Li Y, Long N Y. Simulation of WDM-ROF-PON selective access link system based on hybrid modulation of MZM and OFM[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021, 40(4): 6305-6313.
- [11] Zhou Q, He J L, Shen S Y, et al. Symmetric long-reach 16-QAM transmission using lite coherent receiver for next-generation optical access network[C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [12] Liu B, Xin X J, Zhang L J, et al. Broad convergence of 32QAM-OFDM ROF and WDM-OFDM-PON system using an integrated modulator for bidirectional access networks[C]//National Fiber Optic Engineers Conference, March 21-25, 2010, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2010: JThA26.
- [13] Zhang R J, Ma J X. Full-duplex link with a unified optical OFDM signal for wired and millimeter-wave wireless accesses based on direct detection[J]. *Optical Switching and Networking*, 2017, 25: 33-39.
- [14] Zhang R J, Ma J X. Full-duplex hybrid PON/RoF link with 10-Gbit/s 4-QAM signal for alternative wired and 40-GHz band wireless access based on optical frequency multiplication[J]. *Optik*, 2017, 138: 55-63.
- [15] Choudhury P K. Enhanced noise tolerance for 10 Gb/s Bi-directional cross-wavelength reuse colorless WDM-PON by using spectrally shaped OFDM signals[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 42: 6-10.
- [16] 刘安良. 基于 FTTx 的高速宽带光载无线接入关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- Liu A L. Research on key technologies for high-speed broadband radio-over-fiber access network based on FTTx[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [17] Browning C, Farhang A, Saljoghei A, et al. 5G wireless and wired convergence in a passive optical network using UF-OFDM and GFDM[C]//2017 IEEE International Conference on Communications Workshops, May 21-25, 2017, Paris, France. New York: IEEE Press, 2017: 386-392.
- [18] 李韦萍, 孔淼, 石俊婷, 等. ROF 系统中基于单个调制器的多射频操作[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1106002.
- Li W P, Kong M, Shi J T, et al. Multiple radio frequency operation based on a modulator in a radio-over-fiber system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1106002.
- [19] 谢昌敏. 基于 ROF-PON 的光无线接入系统研究[J]. *移动通信*, 2015, 39(18): 58-61.
- Xie C M. Research on optical wireless access system based on ROF-PON[J]. *Mobile Communications*, 2015, 39(18): 58-61.
- [20] 武蓓蕾. 光载无线系统中传输方案与光域微波信号处理技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- Wu B L. Investigation of transmission methods and photonic microwave signal processing technologies in radio-over-fiber system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [21] 张瑞姣. 基于 PON 与 RoF 融合的宽带有线—无线选择性接入关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
- Zhang R J. The key technologies for the broadband wired and wireless alternative access based on the fusion of the passive optical network and radio over fiber[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [22] Chen H Y, Chi Y C, Lin C Y, et al. Four-wave-mixing suppression of master-to-slave injection-locked two-wavelength FPLD pair for MMW-PON[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(20): 4810-4818.
- [23] 杨立伟, 易湘诚, 刘兆瑞, 等. 基于 RoF-PON 与 PWoF 融合的异构网络传输系统研究[J/OL]. *光通信研究*: 1-6 [2021-05-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1266.TN.20211018.0949.002.html>.
- Yang L W, Yi X C, Liu Z R, et al. Research on heterogeneous network transmission system based on the integration of RoF PON and PWoF[J/OL]. *Study on Optical Communications*: 1-6 [2021-05-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1266.TN.20211018.0949.002.html>.
- [24] 陈光. 光载射频信号处理若干技术及应用研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- Chen G. Some key techniques and their applications to microwave photonic signal processing for radio-over-fiber systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [25] Elmagzoub M A, Shaikh A, Alghamdi A, et al. A review on MIMO wireless signals over fibre for next

- generation fibre wireless (FiWi) broadband networks[J]. Electronics, 2020, 9(12):2014.
- [26] Nettet D. NG-PON<sub>2</sub> technology and standards[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(5): 1136-1143.
- [27] Obite F, Jaja E T, Ijeomah G, et al. The evolution of ethernet passive optical network (EPON) and future trends[J]. Optik, 2018, 167: 103-120.
- [28] Cikan N N, Aksoy M. A review of self-seeded RSOA based on WDM PON[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2019, 42(1): 2-9.
- [29] Mandal G C, Mukherjee R, Das B, et al. Bidirectional and simultaneous transmission of baseband and wireless signals over RSOA based WDM radio-over-fiber passive optical network using incoherent light injection technique [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2017, 80: 193-198.
- [30] Souza A M, Celino D R, Duarte U R, et al. Analog radio-over-fiber fronthaul by a WDM-PON employing double RSOA self-seeding and carrier-reuse techniques [J]. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 2018, 17(4): 552-566.
- [31] Mandal P, Mallick K, Dutta B, et al. Mitigation of Rayleigh backscattering in RoF-WDM-PON employing self coherent detection and bi-directional cross wavelength technique[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53 (2): 77.
- [32] 李汐, 张春蕾, 王欢. 基于概率整形的 16QAM/OFDM-RoF 系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0906008.
- Li X, Zhang C L, Wang H. 16QAM/OFDM-RoF system based on probabilistic shaping[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 096008.
- [33] 梁凌寰, 宋英雄, 林如俭. 基于光梳状谱发生器和注入锁定本地激光器的相干正交频分复用无源光网络系统 [J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0906004.
- Liang L H, Song Y X, Lin R J. Demonstration of coherent orthogonal frequency division multiplexing passive optical network system based on optical frequency comb and injection locking local laser[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0906004.
- [34] Ding Q G, Zhang L J, Wang X J, et al. Tunable multiwavelength optical comb enabled RoF-OFDM-PON with wavelength multiplex[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63(8): 2208-2213.