

基于自由空间光和光纤混合链路的多业务传输系统

梁红霞, 郑耿鑫, 谢少武, 曾昶盛, 钟永明, 甘园园, 熊永康, 韩一石*

广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006

摘要 本文提出了一种基于自由空间光和光纤混合链路的双向双输出多业务传输系统。在单光源条件下, 该系统的下行链路可同时传输 10 GHz 的 16PSK 微波业务信号和 60 GHz 的 4QAM-OFDM 毫米波业务信号, 上行链路可同时传输 OOK 基带业务信号和 20 GHz 的 16QAM 微波业务信号, 实现了双向双输出而且可以应用于多通道。下行接收端采用自相干检测技术, 光路干涉匹配良好时能够有效避免激光相位波动的影响, 提高系统的接收灵敏度。采用波长重用和偏振复用技术可以实现上行传输的无光源化, 为用户同时提供有线与无线的多元化服务。仿真结果表明: 经 600 m 自由空间光和 30 km 光纤混合链路传输后, 上行 20 Gbit/s OOK 输出信号的误码率远小于 10^{-9} , 同速率的上行 16QAM 信号和下行 16PSK、4QAM-OFDM 数据信号的误差矢量幅度值均小于 3.1%。仿真结果说明所提系统具有较好的性能表现。此外, 还分析了晴天、小雾、大雾、小雨和大雨多种天气变化因素对多业务传输系统性能的影响。

关键词 光通信; 多业务; 双向双输出; 单光源; 自相干检测; 偏振复用

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230883

1 引言

随着高清视频、云计算和物联网等技术的兴起, 用户对移动通信网络的带宽需求呈指数级增长。无源光网络(PON)接入技术因具有容量大、覆盖范围广等优势而被广泛视为大宽带接入的可行性解决方案^[1-3]。然而, 在一些地理位置复杂的地区, 传统 PON 架构面临着光纤部署困难和建设周期长的问题^[4]。为了解决这一问题, 自由空间光通信(FSO)技术应运而生。FSO 技术以激光为载体, 以大气信道为传输介质, 具有传输速率高、抗干扰能力强、易于安装等特点^[5-7], 能够适应多样化的应用场景。

为了提高基于 FSO 链路 PON 接入系统的实用性, 以及降低全双工系统的复杂度, 需要在光网络单元(ONU)上构建无色上行传输链路。因此, 许多利用波长重用技术的无色上行传输系统相继被提出。文献[8]采用基于注入锁定技术的法布里-珀罗激光二极管(FPLD)实现波长重用, 但为了实现稳定的注入锁定, 系统的注入波长必须要求在注入带宽内。文献[9-10]使用波长相关滤波器选出所需的信号供上行传输, 从而实现了单光源系统。文献[11]采用反射半导体光放大器(RSOA)构建双向单光源 FSO 系统, 然而 RSOA 的带宽有限(通常约为 1 GHz)。为提高系统带宽, 文献[12-14]提出利用偏振复用技术实现波长重用, 构建

单光源全双工链路, 提高了频带利用率, 但系统的业务单一, 无法满足用户对未来宽带接入系统多样化的需求。

为此, 相关研究人员开始提出在单一共享基础设施中合并多个业务的方案^[15-16], 以增强系统的实用性。文献[17-18]报道了一种基于 FSO 链路的单向多业务传输系统, 该系统采用级联光纤布拉格光栅(FBG)和环形器结构, 以获取有线和无线业务信号。然而, FBG 引起的功率波动会导致信号的传输质量下降, 并且该方案下行使用直接检测方式, 信号传输速率和接收灵敏度较低。文献[19]利用马赫曾德尔调制器(MZM)和可调谐光滤波器(TOF), 在 FSO 和单模光纤(SMF)混合链路上同时传输基带业务信号和毫米波业务信号, 但使用 TOF 会严重限制系统的频率调节范围。为实现频率的大范围可调, 文献[20-21]提出了一种无需光学滤波器的 FSO 传输系统, 该系统利用光的偏振特性进行波长的组合和分离, 进而实现单向多业务传输, 但单向传输方案的资源利用率较低。为提高系统利用率, 文献[22]论证了基于 MZM 和相位调制器的双向传输系统经过 FSO 或 SMF 链路可以向下行用户提供有线和无线业务, 但上行只能提供单一业务, 而且需要使用 FPLD 实现 ONU 无色化, 同时需要使用 TOF 实现波长分离。

收稿日期: 2023-06-01; 修回日期: 2023-07-03; 录用日期: 2023-08-01; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61471130)、广东省重点领域研发计划项目(2019B010138004)

通信作者: *yshan@gdut.edu.cn

为了在混合型传输网络中为用户提供灵活且便利的服务,同时为了实现多业务传输和双向双输出,更好地满足未来多业务宽带接入网的需求,笔者提出了一种基于 FSO 和 SMF 混合链路的双向双输出多业务传输系统。在单光源条件下,该系统通过加载处于不同频段、携带不同信息的数据信号,同时结合自相干检测、偏振复用和数字信号处理(DSP)等技术,可实现下行微波业务和毫米波业务的传输以及上行基带业务和微波业务的传输。同时,该系统能够拓展集成至波分复用无源光网络(WDM-PON)架构中,通过简单地调节检偏器(Pol)即可使 ONU 无色化,在多通道内实现双向双路输出。测试结果表明,在 600 m FSO 和 30 km SMF 混合传输链路中,下行生成的 16PSK 和 4QAM-OFDM 数据信号的误差矢量幅度(EVM)值分别为 3% 和 2.98%。上行所生成的 OOK 基带信号的误码率(BER,在公式中记为 B_{ER})远小于 10^{-9} ,16QAM 矢量信号的 EVM 值为 2.69%。此外,仿真实验验证了该系统在晴天、小雾、大雾、小雨和大雨天气下的传输性能,验证结果显示该系统在不同天气下均具有较好的传输性能,可适用于多种天气变化场景。

2 基本原理

图 1 展示了基于 FSO 和 SMF 混合链路的多业务传输系统的应用场景。各种复杂的全光信号处理由集中在远程中心局(CO)处的光线路终端(OLT)完成,OLT 通过单根 SMF 与远端节点(RN)连接,实现低损耗、高速率数据信号传输。在光分配网络(ODN)单元处,RN 对接收的数据信号进行分离处理,每个通道经过 FSO 链路传输到对应的 ONU。每个 ONU 都是独

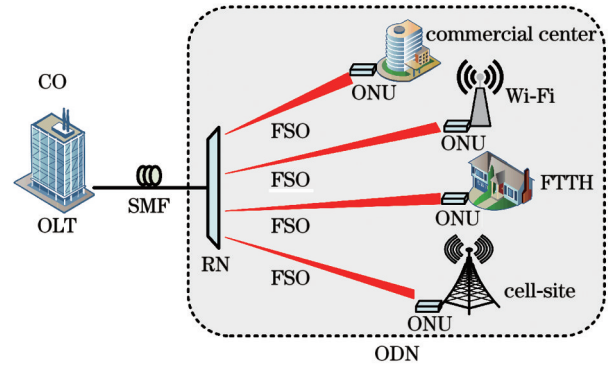


图 1 基于 FSO 和 SMF 混合链路的多业务传输系统应用场景图

Fig. 1 Application scenario diagram of multi-service transmission system based on FSO and SMF hybrid link

立的,彼此之间互不干扰,从而为商业中心、光纤到户(FTTH)、蜂窝基站等提供不同的业务需求。该系统通过使用 FSO 链路替代传统接入网中的分配光纤链路,有效解决了一些地理位置无法部署光纤或不能快速部署光纤的问题,能够适应多样化的应用场景,并且降低了维护光纤链路的成本和复杂度。

本文提出的双向双输出多业务传输系统结构如图 2 所示。该系统主要由激光二极管(LD)、偏振复用马赫曾德尔调制器(PDM-MZM)、偏振控制器(PC)、偏振分束器(PBS)和光电探测器(PD)组成。其中,PDM-MZM 主要由两个并联的 MZMs(X-MZM 和 Y-MZM)、偏振合束器(PBC)和 90° 偏振旋转器(PR)构成。使用不同的数据信号驱动下行 PDM-MZM 的两个子调制器,同时接收端采用自零差相干检测和 DSP 技术。DSP 单元解调时可以进行色散和非线性补偿、

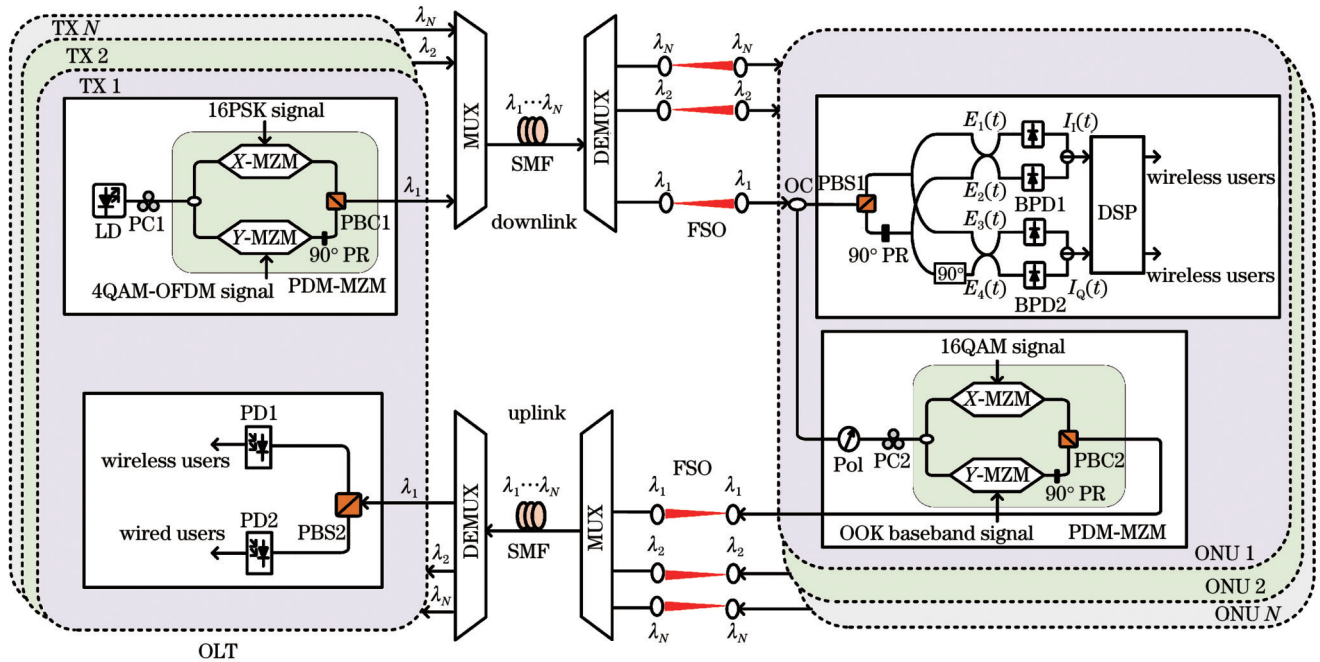


图 2 双向双输出多业务传输系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of bidirectional dual-output multi-service transmission system

相位恢复、IQ 非正交性补偿等,在电域对信号进行恢复和补偿,以便系统更好地完成 OLT 到 ONU 的下行业务信号传输。通过调节 Pol 选出下行 4QAM-OFDM 调制信号作为承载上行信号的光载波,使 ONU 无色化,同时利用偏振复用技术,使系统拓展集成至 WDM-PON 架构后进一步提高频谱效率,在多通道内实现双向多业务传输。系统通过在上下行链路中加载处于不同频段、携带不同信息的数据信号,实现微波业务和毫米波业务的下行传输以及基带业务和微波业务的上行传输,更好地为用户提供有线和无线接入的多元化服务。

假设 LD 输出的光载波为 $E_m(t) = E_0 \exp(j\omega_c t)$, 其经 PC1 调整对齐后注入下行 PDM-MZM 中, 16PSK 数据信号和 4QAM-OFDM 数据信号分别通过驱动 X-MZM 和 Y-MZM 来加载信息。调节调制器的直流偏置电压,使 X-MZM 偏置在正交传输点(QTP),从而实现 16PSK 电信号对光信号的强度调制;同时使 Y-MZM 偏置在最大传输点(MATP),从而实现 4QAM-OFDM 电信号对光信号的相位调制。则 X-MZM、Y-MZM 输出的光信号表达式为

$$E_X(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \cos\left(\pi \frac{V_{16PSK}}{V_\pi} + \frac{\pi}{4}\right) \exp(j\omega_c t), \quad (1)$$

$$E_Y(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \exp\left[j\left(\omega_c t + \pi \frac{V_{4QAM-OFDM}}{V_\pi}\right)\right], \quad (2)$$

式中: E_0 和 ω_c 分别为光载波的幅度和角频率; V_{16PSK} 和 $V_{4QAM-OFDM}$ 分别为加载在光载波幅度上的 16PSK 信号以及加载在相位上的 4QAM-OFDM 信号; V_π 为 MZM 的半波电压。

Y-MZM 输出的光信号通过 PR 旋转 90° 后,与 X-MZM 输出的光信号在 PBC1 中实现偏振合束,则下行 PDM-MZM 输出的光信号可以表示为

$$\mathbf{E}_{\text{PDM-MZM}}(t) = \begin{bmatrix} E_X(t) \\ E_Y(t) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \begin{bmatrix} \cos\left[\pi \frac{V_{16PSK}}{V_\pi} + \frac{\pi}{4}\right] \exp(j\omega_c t) \\ \exp\left[j\left(\omega_c t + \pi \frac{V_{4QAM-OFDM}}{V_\pi}\right)\right] \end{bmatrix}. \quad (3)$$

PDM-MZM 输出的调制光信号与不同发射端的光信号在波分复用器(MUX)处以不同载波频率复用到单根 SMF 中进行传输,并在远端节点中通过波长解复用器(DEMUX)分发至对应的 FSO 链路中,每个单独的波长在点对点的 FSO 链路中传输。

调制光信号经过 FSO 链路传输到对应的 ONU 中,在此处不同偏振方向的光信号经 PBS1 分离。通过调节 90° PR 确保 X、Y 偏振方向的信号光处于同一偏振态。两路光信号注入 90° 光混频器后,在忽略光混频器不平衡和损耗的情况下,光混频器的 4 个输出可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_1(t) \\ E_2(t) \\ E_3(t) \\ E_4(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} E_X(t) + E_Y(t) \\ E_X(t) - E_Y(t) \\ E_X(t) + jE_Y(t) \\ E_X(t) - jE_Y(t) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

混频后的四路光信号被送入两个平衡探测器(BPD1、BPD2)中进行光电转换,得到电流同向分量 $I_1(t)$ 和正交分量 $I_Q(t)$ 为

$$\begin{cases} I_1(t) = \eta |E_1(t)|^2 - \eta |E_2(t)|^2 = \frac{1}{2} \eta E_0^2 \cos\left(\pi \frac{V_{16PSK}}{V_\pi} + \frac{\pi}{4}\right) \cos\left(\pi \frac{V_{4QAM-OFDM}}{V_\pi}\right) \\ I_Q(t) = \eta |E_3(t)|^2 - \eta |E_4(t)|^2 = \frac{1}{2} \eta E_0^2 \cos\left(\pi \frac{V_{16PSK}}{V_\pi} + \frac{\pi}{4}\right) \sin\left(\pi \frac{V_{4QAM-OFDM}}{V_\pi}\right) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: η 为 BPD 的响应度,单位为 A/W。电信号 $I_1(t)$ 和 $I_Q(t)$ 同时被送入 DSP 模块进行处理,形成的复数 $K(t)$ 可以表示为

$$K(t) = I_1(t) + jI_Q(t) = \frac{1}{2} \eta E_0^2 \cos\left(\pi \frac{V_{16PSK}}{V_\pi} + \frac{\pi}{4}\right) \exp\left[j\left(\frac{\pi V_{4QAM-OFDM}}{V_\pi}\right)\right]. \quad (6)$$

假设数据信号 V_{16PSK} 很小,则复数 $K(t)$ 模的平方和相位分别为

$$|K(t)|^2 = I_1(t)^2 + I_Q(t)^2 = \frac{1}{8} \eta^2 E_0^4 \left[1 - \sin\left(\frac{2\pi V_{16PSK}}{V_\pi}\right)\right] \approx \frac{1}{8} \eta^2 E_0^4 \left[1 - \left(\frac{2\pi V_{16PSK}}{V_\pi}\right)\right], \quad (7)$$

$$\arg[K(t)] = \frac{\pi V_{4QAM-OFDM}}{V_\pi}. \quad (8)$$

由以上公式可以看出, $I_1(t)$ 、 $I_Q(t)$ 分量利用 DSP 技术处理后可以快速解调出 16PSK 业务信号和 4QAM-OFDM 业务信号。

对于上行链路传输,通过耦合器(OC)取出一半功率的下行 PDM-MZM 输出信号并将其送入 Pol,调节

Pol 与调制器主轴之间的夹角为 90° ,以便选出下行相位调制信号 $E_Y(t)$ 。相位调制光信号通过波长重用为上行链路提供光源,PC2 用来调整光源与上行链路中 PDM-MZM 的偏振主轴对齐。PDM-MZM 的两个子调制器分别加载 16QAM 信号和 OOK 基带信号,且 X-MZM、Y-MZM 分别偏置在 QTP、最小传输点(MITP)处。在小信号调制情况下,两个子调制器的输出可以表示为

$$E_{X\text{-MZM}}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} E_Y(t) \times \left\{ \exp \left[j \frac{\pi}{V_\pi} \left[K_{16\text{QAM}}(t) + \frac{\pi}{2} \right] \right] + \exp \left[j \frac{\pi}{V_\pi} K_{16\text{QAM}} \left(t + \frac{\pi/2}{\omega_{\text{RF}}} \right) \right] \right\} \approx$$

$$J_0(\alpha) J_0(\beta) E_Y(t) + J_1(\alpha) J_0(\beta) E_Y(t) \exp[j(\omega_{\text{RF}} t)] + J_0(\alpha) J_1(\beta) E_Y(t) \exp \left[j \left(\omega_{\text{RF}} t + \frac{\pi}{2} \right) \right] \approx$$

$$E_Y(t) + \frac{\pi}{V_\pi} [I(t) + jQ(t)] E_Y(t) \exp[j(\omega_{\text{RF}} t)], \quad (9)$$

$$E_{Y\text{-MZM}}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} E_Y(t) \times \left\{ \exp \left[j\pi \frac{V_0 S_{\text{OOK}}(t) + V_\pi/2}{V_\pi} \right] + \exp \left[j\pi \frac{-V_0 S_{\text{OOK}}(t) - V_\pi/2}{V_\pi} \right] \right\} \approx$$

$$-E_Y(t) [\beta_0 S_{\text{OOK}}(t)], \quad (10)$$

式中： $K_{16\text{QAM}}(t)$ 为 16QAM 数据信号， $K_{16\text{QAM}}(t) = I(t) \cos(\omega_{\text{RF}} t) + Q(t) \sin(\omega_{\text{RF}} t)$ ， ω_{RF} 表示 16QAM 信号的频率； α 和 β 为调制指数 $\alpha = \pi I(t)/V_\pi$ ， $\beta = \pi Q(t)/V_\pi$ ； $J_0(\cdot)$ 和 $J_1(\cdot)$ 分别表示第一类零阶贝塞尔函数和一阶贝塞尔函数，取近似值 $J_0(\alpha) \approx J_0(\beta) \approx 1$ ， $J_1(\alpha) \approx \alpha$ ， $J_1(\beta) \approx \beta$ ； $S_{\text{OOK}}(t)$ 为 OOK 基带信号； V_0 为基带信号幅度； β_0 为基带信号的调制指数， $\beta_0 = \pi V_0/V_\pi$ 。

X-MZM 和 Y-MZM 产生的两路光信号在 PBC2 中实现偏振合束，然后通过点对点的上行 FSO 链路传输。处于不同波长的复用信号经 MUX 组合后通过 SMF 传输至 DEMUX 解复用，最后发送到相应波长的接收机中。在每个接收机上，使用 PBS2 分离两个正交偏振方向上的光信号，并将其分别送入 PD1、PD2 完成平方率检测，则输出的两路光电流分别为

$$I_{\text{PD1}}(t) \propto \eta E_0^2 \frac{\pi}{V_\pi} K_{16\text{QAM}}(t), \quad (11)$$

$$I_{\text{PD2}}(t) \propto \eta E_0^2 \beta_0^2 S_{\text{OOK}}^2(t). \quad (12)$$

由式(11)~(12)可知该系统上行生成了 16QAM 业务信号和 OOK 业务信号，且两路信号可以单独输出。

3 仿真结果与分析

为了验证所提方案的可行性，按照图 2 所示的系统结构图搭建仿真实验系统进行验证。LD 产生中心波长为 1550 nm、输出光功率为 8 dBm 的光载波。对于 OLT 的单个通道，光载波输入到半波电压为 4 V、消光比为 30 dB 的 PDM-MZM 中。其中，频率为 10 GHz、数据速率为 20 Gbit/s、伪随机序列 (PRBS) 长度为 $2^{15}-1$ 的下行 16PSK 微波信号通过 X-MZM 进行强度调制；同时，另一组序列长度为 $2^{15}-1$ 的 20 Gbit/s PRBS 经 4QAM 符号映射后得到 60 GHz 的下行 4QAM-OFDM 数据信号，用其驱动 Y-MZM 进行相位调制。在 OFDM 调制模块中，傅里叶逆变换点数设置为 1024，子载波数设置为 512。两路调制信号经 PBC1 组合后，经色散系数为 16.75 ps/(nm·km)、损耗为 0.2 dB/km、色散斜率为 0.075 ps/(nm²·km) 的 SMF 传输 30 km，然后通过长度为 600 m 的 FSO 链路点对点

传输。FSO 链路由收发端口组成，发射端口和接收端口的直径分别为 5 cm 和 20 cm，波束发散角为 3 mrad。此外，FSO 链路通常会受到大气湍流和大气衰减等因素的影响，因此本文采用可评估弱、中、强湍流影响的 Gamma-Gamma 大气通道模型来模拟大气湍流^[23]。在 Gamma-Gamma 模型中，由大气湍流引起的强度波动的概率密度函数可以表示为

$$f(I) = \frac{2(gh)^{\frac{g+h}{2}}}{\Gamma(g)\Gamma(h)} I^{\frac{g+h}{2}-1} K_{g-h}(2\sqrt{ghI}), \quad (13)$$

式中： $K_{g-h}(\cdot)$ 表示阶数为 $g-h$ 的第二类修正贝塞尔函数； I 代表光照强度； $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函数； g 、 h 分别为大、小尺度湍流对接收光强的影响参数。 g 和 h 可以分别表示为

$$g = \left\{ \exp \left[\frac{0.49\sigma_0^2}{(1 + 1.11\sigma_0^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (14)$$

$$h = \left\{ \exp \left[\frac{0.51\sigma_0^2}{(1 + 0.69\sigma_0^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (15)$$

σ_0^2 表示平面波的 Rytov 方差，可以表示为 $\sigma_0^2 = 1.23C_n^2 K^{7/6} L^{11/6}$ ，其中： $K = 2\pi/\lambda$ 为传输光波的数量 (λ 为发射端入射激光的波长)； L 为光波传输的距离； C_n^2 为大气折射率结构常数。

在 ONU 中，下行调制信号经过 90° PR 调整为同一偏振态后，注入 90° 光混频器和 BPD 中进行自相干检测，最后利用 DSP 模块恢复出两个不同频段的信号并进行 EVM 值、星座图分析。测得的 10 GHz 16PSK 数据信号、60 GHz 4QAM-OFDM 数据信号对应的频谱图和星座图如图 3(a)、(b) 所示。由图 3 可知，16PSK 和 4QAM-OFDM 信号的 EVM 值分别为 3% 和 2.98%，均小于第三代合作伙伴计划 (3GPP) 标准 (EVM 值为 12.5%)，且星座图清晰可辨。图中的 16PSK 信号与 4QAM-OFDM 信号分别对应着微波频段与毫米波频段的业务，此结果表明该系统可以同时传输两种业务信号，可以提供无线接入服务。

下行相位调制光信号通过波长重用为上行链路提供光载波。将数据速率为 20 Gbit/s、频率为 20 GHz 的 16QAM 加载到上行 X 偏振方向的光载波上，将具

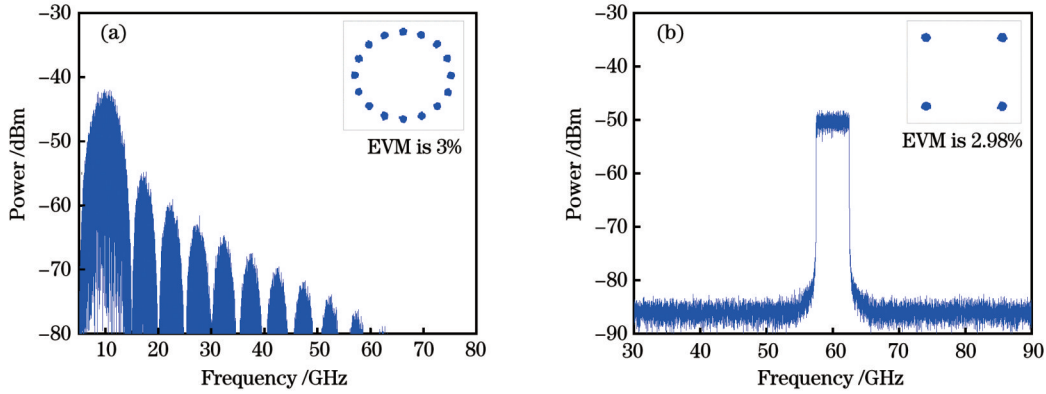


图3 下行传输信号的频谱图和星座图。(a)10 GHz 16PSK信号;(b)60 GHz 4QAM-OFDM信号

Fig. 3 Electrical spectrum and constellation diagram of the downlink transmission signal. (a) 16PSK signal at 10 GHz; (b) 4QAM-OFDM signal at 60 GHz

有相同速率的上行NRZ-OOK基带信号加载到Y偏振方向的光载波上。两路光信号通过PBC2偏振合束,经过30 km SMF和600 m FSO链路传输到OLT的接收端。接收到的偏振调制光信号经过PBS2分离后分别注入到响应度为1 A/W的PD1、PD2进行拍频,生成OOK基带信号和20 GHz的16QAM微波信号,其相应的频谱图、星座图和眼图如图4(a)、(b)所示。由

图4可知,20 GHz的16QAM微波信号的EVM值为2.69%,OOK基带信号的BER远小于 10^{-9} ,星座图和眼图清晰可辨。该结果证实了16QAM信号与OOK信号的可靠传输。此外,所提方案上行输出的基带信号可用于有线接入,20 GHz微波信号可用于无线接入,即上行链路传输可为用户同时提供基带业务和微波业务。

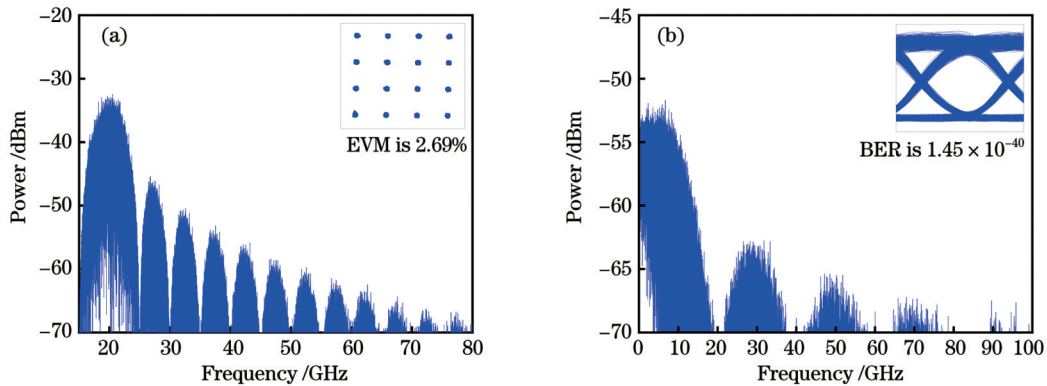


图4 上行传输信号的频谱图、星座图和眼图。(a)20 GHz 16QAM信号的频谱图和星座图;(b)OOK基带信号的频谱图和眼图

Fig. 4 Electrical spectrum, constellation and eye diagrams of the uplink transmission signal. (a) Electrical spectrum and constellation diagram of 16QAM signal at 20 GHz; (b) electrical spectrum and eye diagram of OOK baseband signal

为了评估系统的可靠性,笔者分析了在30 km SMF传输和3 dB/km FSO链路衰减条件下,传输不同FSO链路距离时系统上下行链路的传输性能。下行传输的16PSK微波业务和4QAM-OFDM毫米波业务的传输性能如图5(a)、(b)所示。分析结果表明:1)随着接收光功率降低,两种下行输出信号的EVM逐渐增大。当FSO传输距离 L 分别为2、3、4 km时,在相应的接收光功率下,测得16PSK数据信号的EVM分别为4.62%、5.67%、7.58%,4QAM-OFDM数据信号的EVM分别为3.60%、5.01%、6.60%。测得的EVM均较小且满足3GPP标准,表明两种下行业务信号的传输性能较好。2)当EVM为12.5%且FSO传输相同距离时,两种业务的最大功率差达到了3.7 dB。这是由于信号在具有大气湍流效应的FSO链路中传

输时,16PSK强度调制光信号对大气湍流效应更敏感,而OFDM信号抗多径干扰能力相较于PSK信号更强。

在相同的FSO链路衰减条件下,测量了上行传输的16QAM微波业务和OOK基带业务的传输性能,结果如图6(a)、(b)所示。由图6可知,在固定FSO传输距离的情况下,接收光功率的增加可以减小两种上行输出信号的EVM和BER值。当FSO传输距离 L 为2、3、4 km时,16QAM信号在对应的接收光功率下的EVM值分别为3.41%、4.39%、6.53%,星座图清晰可辨,表明微波信号具有较好的传输性能;当接收光功率大于-17 dBm时,基带信号传输的BER均小于 10^{-9} ,由此可知上行链路实现了微波业务与基带业务的可靠传输。

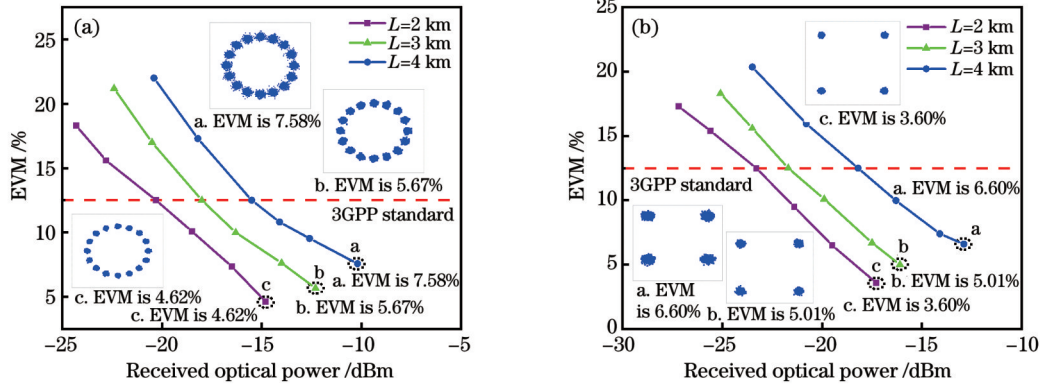


图 5 下行传输信号 EVM 值与接收光功率的关系曲线以及对应点的星座图。(a) 10 GHz 的 16PSK 信号; (b) 60 GHz 的 4QAM-OFDM 信号

Fig. 5 Relationship between downlink EVM value and received optical power, as well as the constellation diagrams of corresponding points. (a) 16PSK signal at 10 GHz; (b) 4QAM-OFDM signal at 60 GHz

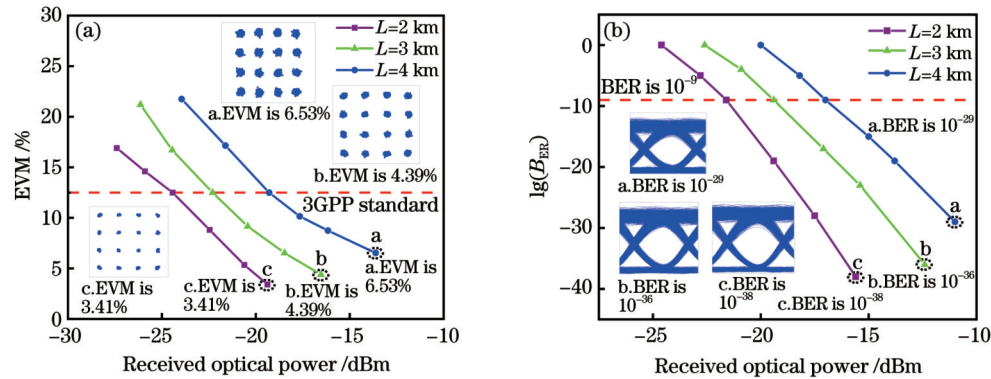


图 6 上行传输信号的 EVM 和 BER 值与接收光功率的关系曲线以及对应点的星座图和眼图。(a) 20 GHz 的 16QAM 信号; (b) OOK 基带信号

Fig. 6 Relationship between uplink EVM and BER values with received optical power, as well as constellation and eye diagrams of corresponding points. (a) 16QAM signal at 20 GHz; (b) OOK baseband signal

为了进一步研究该系统的光纤传输性能,笔者以下行链路为例,固定 FSO 传输距离为 600 m,在背靠背 (BTB) 和 30 km SMF 传输模式下分析了系统链路的传输性能,测量了下行 16PSK 业务信号和 4QAM-OFDM 业务信号的 EVM 值随接收光功率的变化,结果如图 7(a)、(b)所示。由图 7 可知,在相应的接收光功率下,16PSK、4QAM-OFDM 输出信号在两种传输

模式中的 EVM 值均小于 4.5%。这表明生成的业务信号的质量良好,下行链路具有良好的传输性能。此外,当 EVM 值为 12.5% 时,在 BTB 和 30 km SMF 传输下,16PSK 输出信号的接收光功率分别为 -22.96 dBm 和 -20.90 dBm,光纤传输引起的功率损耗为 2.06 dB; 4QAM-OFDM 信号的接收光功率分别为 -28.0 dBm 和 -26.4 dBm,功率损耗为 1.6 dB。这一结果表明光

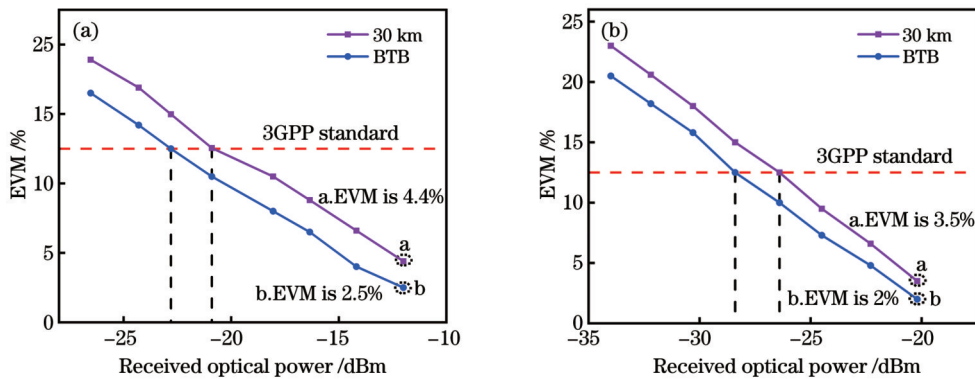


图 7 下行传输信号的 EVM 值与接收光功率的关系曲线。(a) 10 GHz 的 16PSK 信号; (b) 60 GHz 的 4QAM-OFDM 信号

Fig. 7 Relationship between EVM value of the downlink transmission signal and received optical power. (a) 16PSK signal at 10 GHz; (b) 4QAM-OFDM signal at 60 GHz

纤的传输损耗较小。

抗干扰能力和适应性是该传输系统的重要特性,因此笔者还研究了该系统在动态天气条件下的链路性能。当FSO链路在晴天、小雾、大雾、小雨和大雨环境中的衰减系数分别为0.14 dB/km、9 dB/km、22 dB/km、6.27 dB/km和19.28 dB/km^[24]时,测量了不同天气情况下各输出信号的EVM和BER值随FSO传输距离的变化,测量结果如图8(a)~(d)所示。由图8可知,链路性能随着气候环境的恶化而降低,链路在达到标准EVM值(12.5%)和BER(10⁻⁹)时的传输距离也随之减小。同时可以观

察到:在中等湍流强度($C_n^2=5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$)和30 km SMF传输的情况下,FSO链路的最大传输距离为33.8~62.0 km;在小雾天气条件下,FSO链路的最大传输距离为3.0~4.8 km;在大雾条件下,FSO链路的最大传输距离为1.4~1.8 km;在小雨天气条件下,FSO链路的最大传输距离为3.4~5.6 km;在大雨天气条件下,FSO链路的最大传输距离为1.9~2.7 km。无论是在晴天、雾天还是雨天,在一定的FSO传输范围内,各路信号均保持良好的性能表现,这表明该系统在多种天气环境变化下具备一定的抗干扰能力和适应性。

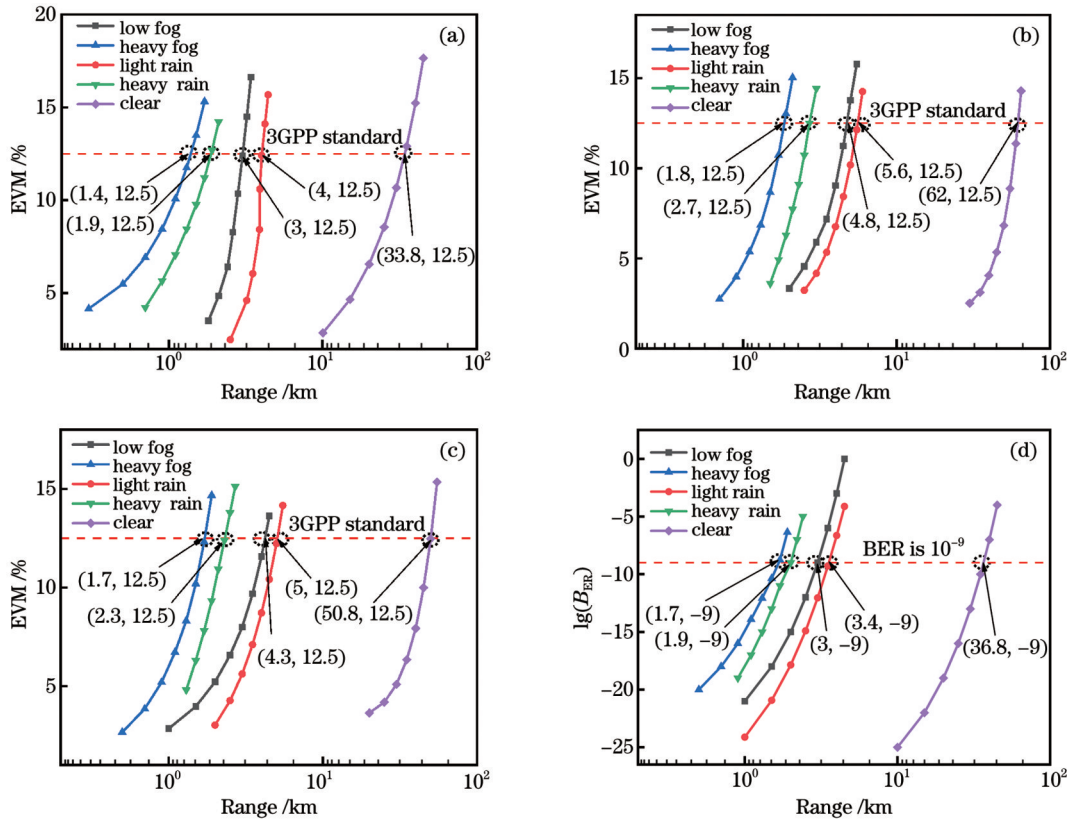


图8 不同天气情况下各输出信号的EVM和BER值与FSO传输距离的关系。(a)16PSK信号;(b)4QAM-OFDM信号;(c)16QAM信号;(d)OOK信号

Fig. 8 Relationship between EVM or BER value of various output signals and FSO transmission distance under different weather conditions. (a) 16PSK signal; (b) 4QAM-OFDM signal; (c) 16QAM signal; (d) OOK signal

基于图8所示的数据,笔者比较了该系统在晴天、小雾、大雾、小雨和大雨天气情况下各路输出信号的性能,

如表1所示。4QAM-OFDM调制信号在所研究的天气条件下表现出了更好的性能,优于其他三路数据

表1 各输出信号在不同天气下的性能比较

Table 1 Performance comparison of various output signals under different weather conditions

Weather condition	Specific attenuation / (dB·km ⁻¹) ^[24]	Maximum achievable FSO link distance /km			
		16PSK	4QAM-OFDM	16QAM	OOK
Clear	0.14	33.8	62.0	50.8	36.8
Low fog	9	3.0	4.8	4.3	3.0
Heavy fog	22	1.4	1.8	1.7	1.7
Light rain	6.27	4.0	5.6	5.0	3.4
Heavy rain	19.28	1.9	2.7	2.3	1.9

信号,说明其对大气湍流效应的鲁棒性更强。其次是 16QAM 调制光信号,这是由于 16QAM 将数据信息同时编码在相位和幅度等多个维度上,在一定程度上可以提高信号传输的可靠性。

由上述分析可知,本文所提出的基于 FSO 和 SMF 混合链路的多业务传输系统,无论是上行链路还是下行链路,均可实现多种业务的传输,而且表现出了良好的传输性能和抗干扰能力,可以更好地为用户提

供多元化服务。

此外,笔者将本系统与其他 FSO 传输系统在不同天气条件下的 FSO 链路最大传输距离、信息传输速率进行了对比分析,结果如表 2 所示。可以看出:在信息传输速率上,由于采用了偏振复用技术,所提系统的传输速率较高;在相同的天气状况下,所提系统的 FSO 链路可以实现更远的通信距离。这表明所提系统在多种天气环境下具有一定的优势。

表 2 不同 FSO 传输系统的性能对比

Table 2 Performance comparison of different FSO transmission systems

FSO transmission system	Weather condition	Maximum achievable FSO link distance /km	Information rate / (Gbit/s)
Ref. [24]	Clear	20.0	$16\lambda \times 100$
	Low fog	2.8	
	Heavy fog	1.4	
	Light rain	3.7	
	Heavy rain	1.5	
Ref. [25]	Clear	35.0	$8\lambda \times 10$
	Low fog	3.0	
	Moderate fog	1.2	
	Heavy fog	0.5	
Ref. [26]	Clear	1.8	10
	Low fog	0.3	
	Heavy fog	0.1	
	Light rain	1.2	
	Heavy rain	0.6	
Ref. [27]	Clear	25.0	40
	Low fog	2.4	
	Moderate fog	2.0	
	Heavy fog	1.6	
Proposed work	Clear	62.0	40
	Low fog	4.8	
	Heavy fog	1.8	
	Light rain	5.6	
	Heavy rain	2.7	

4 结 论

本文提出一种可实现下行传输微波业务、毫米波业务和上行传输基带业务、微波业务的多业务传输系统,通过在不同频段中加载携带不同信息的数据信号,可以双向双输出多种业务信号。采用下行链路传输可以避免激光相位波动的影响,实现高灵敏度检测。所提系统通过简单地调节 Pol 即可实现 ONU 无色化,通过偏振复用技术将其集成至 WDM-PON 架构后可以进一步提高频谱效率,在多通道内实现双向双输出多业务。仿真实验表明,在 600 m FSO 和 30 km SMF 混合传输环境下,上行 20 Gbit/s OOK 输出信号的误码率远小于 10^{-9} ,速率为 20 Gbit/s 的下行 16PSK、4QAM-OFDM 数据信号和上行 20 Gbit/s 16QAM 输出信号的 EVM 值均小于 3.1%。此外,FSO 链路在晴天、小雾、大雾、小雨和大雨天气下可传输的最远通信距离分别为 62.0、4.8、1.8、5.6、2.7 km。理论分析和仿

真结果表明,所提系统的双向链路均可实现多业务传输、双路双输出,而且双向传输性能较好,在动态天气条件下的宽带无线通信系统中具有广阔的发展空间和应用前景。

参 考 文 献

- [1] Wong E. Next-generation broadband access networks and technologies[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 597-608.
- [2] An F T, Gutierrez D, Kim K S, et al. SUCCESS-HPON: a next-generation optical access architecture for smooth migration from TDM-PON to WDM-PON[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(11): S40-S47.
- [3] Praveena S M, Vennila I, Vaishnavi R. Design of wireless passive optical communication network based on fusion of fibre to the home architecture[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 96(3): 3851-3871.
- [4] Yeh C H, Gu C S, Guo B S, et al. Hybrid free space optical communication system and passive optical network with high splitting ratio for broadcasting data traffic[J]. Journal of Optics, 2018, 20(12): 125702.

- [5] 赵贺, 张鹏, 杨志群, 等. 多调制格式兼容的空间激光高速通信调制仿真与实验研究[J]. 中国激光, 2022, 49(7): 0706004.
Zhao H, Zhang P, Yang Z Q, et al. Simulation and experimental research of multimodulation format compatible space laser high-speed communication modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(7): 0706004.
- [6] 曹阳, 文豪, 党宇超. 自由空间光通信下的 LSTM-SCFlips 译码方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1406004.
Cao Y, Wen H, Dang Y C. LSTM-SCFlips decoding method in free-space optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1406004.
- [7] Wu H W, Li C Y, Lu H H, et al. A PDM-based 128-Gb/s PAM4 fibre-FSO convergent system with OBPFs for polarisation de-multiplexing[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 1872.
- [8] Xiong F, Zhong W D, Kim H. A broadcast-capable WDM-PON based on polarization-sensitive weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diodes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(3): 355-361.
- [9] Li C Y, Lu H H, Tsai W S, et al. A flexible two-way PM-based fiber-FSO convergence system[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 7901509.
- [10] Li C Y, Lu H H, Chou C R, et al. A flexible bidirectional fiber-FSO-5G wireless convergent system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 39(5): 1296-1305.
- [11] Wang X Y, Feng X L, Zhang P, et al. Single-source bidirectional free-space optical communications using reflective SOA-based amplified modulating retro-reflection[J]. Optics Communications, 2017, 387: 43-47.
- [12] Mirza J, Ghafoor S, Hussain A. A full duplex ultrawideband over free-space optics architecture based on polarization multiplexing and wavelength reuse[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(12): 3999-4006.
- [13] Tang Z Z, Pan S L. A full-duplex radio-over-fiber link based on a dual-polarization Mach-Zehnder modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(8): 852-855.
- [14] Xu W J, Gao X L, Zhao M Y, et al. Full duplex radio over fiber system with frequency quadrupled millimeter-wave signal generation based on polarization multiplexing[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 103: 267-271.
- [15] Wu B L, Zhu M, Zhang J W, et al. Multi-service RoF links with colorless upstream transmission based on orthogonal phase-correlated modulation[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18323-18329.
- [16] 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.
- [17] Tripathi A, Gupta S, Mandloi A. Orthogonally polarized and 60 GHz dual-channel based 18×2.5 Gb/s DWDM-interleaved hybrid FSO system under atmospheric turbulence[J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(4): 220.
- [18] Tripathi A, Soni G G, Gupta S, et al. An optical architecture of 12×2.5 Gbps wavelength-interleaving free space hybrid distribution system under turbulent atmosphere[J]. Wireless Personal Communications, 2020, 115(3): 2615-2626.
- [19] Mallick K, Mandal P, Mukherjee R, et al. Generation of 40 GHz/80 GHz OFDM based MMW source and the OFDM-FSO transport system based on special fine tracking technology[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 54: 102130.
- [20] Mallick K, Mandal P, Mandal G C, et al. Hybrid MMW-over fiber/OFDM-FSO transmission system based on doublet lens scheme and POLMUX technique[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 52: 101942.
- [21] Mallick K, Dutta B, Santra S, et al. Nonlinearity optimization in FSO transport system and generation of 24-GHz MW signal based on OADM scheme and external modulation technique[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(9): 1-10.
- [22] Mandal P, Sarkar N, Santra S, et al. Hybrid WDM-FSO-PON with integrated SMF/FSO link for transportation of Rayleigh backscattering noise mitigated wired/wireless information in long-reach[J]. Optics Communications, 2022, 507: 127594.
- [23] 张兢, 李文庆, 曹阳, 等. 自由空间光通信下 SCB-Spinal 码的性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(23): 2320003.
Zhang J, Li W Q, Cao Y, et al. Performance analysis of SCB-Spinal code in free space optical communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(23): 2320003.
- [24] Singh M, Malhotra J, Atieh A, et al. Performance investigation of 1.6 Tbps hybrid WDM-PDM-OFDM-based free space optics transmission link[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 117(3): 2285-2309.
- [25] Badar N, Jha R K, Towfeeq I. Performance analysis of an 80 (8×10) Gbps RZ-DPSK based WDM-FSO system under combined effects of various weather conditions and atmospheric turbulence induced fading employing Gamma-Gamma fading model [J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50(1): 44.
- [26] Kumar N, Teixeira A L J. 10 Gbit/s OFDM based FSO communication system using M-QAM modulation with enhanced detection[J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48(1): 9.
- [27] Singh M, Malhotra J. Performance investigation of high-speed FSO transmission system under the influence of different atmospheric conditions incorporating 3-D orthogonal modulation scheme[J]. Optical and Quantum Electronics, 2019, 51(9): 285.

Multi-Service Transmission System Based on a Free-Space Optical and Optical Fiber Hybrid Link

Liang Hongxia, Zheng Gengxin, Xie Shaowu, Zeng Changsheng, Zhong Yongming, Gan Yuanyuan, Xiong Yongkang, Han Yishi*

School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China

Abstract

Objective The traditional passive optical network (PON) architecture faces the problem of difficult fiber deployment. To overcome this problem, free-space optical (FSO) communication technologies have emerged. FSO technology uses a laser as the carrier and an

atmospheric channel as the transmission medium, providing a high transmission rate and enabling easy installation. To reduce the construction complexity of PON access systems based on FSO links, wavelength reuse technology is used to realize colorless uplink transmission of the optical network unit (ONU). However, the currently proposed schemes based on devices such as Fabry-Perot laser diodes (FPLDs) and reflective semiconductor optical amplifiers (RSOAs) for wavelength reuse limit the bandwidth of the system. To improve system bandwidth, some scholars have proposed the use of polarization multiplexing technology to realize wavelength reuse, thus entailing the construction of a single light source system. However, system service is singular and cannot meet the diverse needs of users of future broadband access systems. Therefore, researchers have proposed combining multiple services into a single shared infrastructure to enhance system practicality. Nevertheless, these solutions can only achieve one-way multiservice transmission and require complex devices (such as FPLD and RSOA) to achieve colorless ONUs and optical filters to achieve wavelength separation, which severely limits the frequency-adjustment range of the system. In this study, a bidirectional dual-output multiservice transmission system based on an FSO and optical fiber hybrid link is proposed. This system has broad application prospects in broadband wireless communication systems. Under the single-light-source condition, the system can realize the transmission of downlink microwave and millimeter-wave services, as well as the transmission of uplink baseband and microwave services. Simultaneously, the system can be expanded and integrated into a wavelength-division multiplexing (WDM) PON architecture. By simply adjusting the polarizer, the ONU can be made colorless, and a bidirectional dual output can be realized in multiple channels.

Methods In our proposed scheme, the optical carrier generated by the laser diode is sent to a polarization-division multiplexing Mach-Zehnder modulator (PDM-MZM). The system loads 10 GHz 16PSK and 60 GHz 4QAM-OFDM signals onto the downstream PDM-MZM and combines self-coherent detection and digital signal processing technology at the receiving end to realize the downlink transmission of microwave and millimeter-wave services. The angle between the polarizer and the main axis of the modulator was adjusted to 90° to select the downlink 4QAM-OFDM modulated signal as the optical carrier carrying the uplink signal, rendering the ONU colorless. After the uplink baseband signal and 20 GHz 16QAM microwave signal are transmitted through the FSO and optical fiber hybrid link, polarization separation is realized using a polarization beam splitter, and photoelectric conversion is performed to realize the transmission of the uplink baseband and microwave services.

Results and Discussions The error vector magnitude (EVM) values of the 10 GHz downlink 16PSK signal and 60 GHz 4QAM-OFDM signal are 3% and 2.98%, respectively, which are less than those of the 3GPP standard, and the constellation diagrams are clearly identifiable (Fig. 3). The EVM value of the 20 GHz 16QAM signal generated in the uplink is 2.69%, the bit error rate (BER) of the OOK baseband signal is $\ll 10^{-9}$, and the constellation and eye diagrams are clearly recognizable (Fig. 4). To evaluate the reliability of the system, we analyzed the transmission performance of the system when transmitting different FSO link distances. When the FSO transmission distance is $L=2, 3,$ and 4 km under the corresponding received optical power, the EVM values measured by the 16PSK signal are 4.62%, 5.67%, and 7.58%, respectively, and the EVM values obtained by the 4QAM-OFDM signal are 3.60%, 5.01%, and 6.60%, respectively. The measured EVM is small, indicating that the downlink transmission performance is satisfactory (Fig. 5). The EVM values of the uplink 16QAM signal are 3.41%, 4.39%, and 6.53%, respectively, and when the received optical power is > -17 dBm, the BER of the baseband signal transmission is $< 10^{-9}$, which indicates that the uplink achieves reliable transmission (Fig. 6). In addition, we examined the link performance under dynamic weather conditions. The longest communication distances that FSO links can transmit in clear, low fog, heavy fog, light rain, and heavy rain are 62.0, 4.8, 1.8, 5.6, and 2.7 km, respectively, and the system has certain advantages in various weather environments (Fig. 8).

Conclusions A bidirectional multi-service transmission system that can realize the downlink transmission of microwave services, millimeter-wave services, and the uplink transmission of baseband and microwave services is presented. When downlink transmission is applied, the influence of laser phase fluctuation can be avoided, and high-sensitivity detection can be realized. The system can realize a colorless ONU by simply adjusting the polarizer, and, through the use of polarization multiplexing technology, it can further improve the spectral efficiency after it is integrated into the WDM-PON architecture, and bidirectional dual-output multi-service can be realized in multiple channels. The BER of the uplink OOK baseband signal is $< 10^{-9}$, and the EVM values of the downlink 16PSK 4QAM-OFDM data signals and uplink 16QAM signal are all $< 3.1\%$. In addition, the influence of various weather environmental factors and optical fiber transmission loss on the performance of the multi-service transmission system was analyzed, and the results demonstrate the practicability and feasibility of our system.

Key words optical communication; multi-service; bidirectional dual-output; single light source; self-coherent detection; polarization multiplexing