

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

赵贺¹, 张鹏^{1,2*}, 杨志群³, 欧阳举¹, 田东升¹, 刘壮¹, 王大帅², 姜会林¹

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130012;

² 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130012;

³ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

摘要 为了顺应自由空间光通信多调制格式兼容的趋势,改善系统灵活性差、成本较高等问题,提出一种基于双 IQ 调制器的多调制格式兼容的激光通信发射方案。首先,基于 Optisystem 软件建立系统模型仿真分析,所得眼图和星座图验证了所提方案的正确性;然后,研制了多调制格式兼容发射硬件,并实验研究了调制格式的兼容性、可切换性和通信性能。实验结果表明:所设计硬件兼容发射 OOK、BPSK、DPSK、QPSK、PM-DQPSK 5 种调制格式;速率分档可调,最高可达 40 Gbit/s;当发射端产生 40 Gbit/s PM-DQPSK 调制格式信号时,在离线接收条件下,误码率为 10^{-7} 时的灵敏度达到 -39.8 dBm。通信调制仿真及实验结果验证了所设计方案的可行性,所得到结果也为空间激光通信系统设计提供了技术参考。

关键词 光通信;空间激光通信;多调制格式兼容系统;IQ 调制器;灵敏度

中图分类号 TN914.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202149.0706004

1 引言

自由空间光通信(FSO)又称无线光通信,它是以激光束为信息载体的通信技术,由于其克服了微波通信技术收发天线尺寸大、体积较大、功耗较高等缺点,实现了高速率、大容量、长距离的光通信^[1-5]。近年来,FSO 技术得到广泛应用,我国的光通信技术水平也得到明显提高。相比于采用强度调制/直接探测的通信体制,采用相位调制/相干检测的光通信系统可以在高速率条件下有效地提高系统的接收灵敏度^[6-9]。

由于先进相干调制相对于传统非相干调制格式的调制效率高^[10],近年来国内外对相移键控(PSK)、幅移键控(ASK)和正交幅度调制(QAM)等相干调制方式进行了许多研究,2017—2018 年,NASA 的研究方向主要集中在卫星相干激光通信技术,对比研究了包括外差(零差)ASK、PSK、频移键控(FSK)、

差分相移键控(DPSK)等相干激光通信方案^[11-15]。更高阶的调制能够提供更高的频带利用率、占用更小的带宽,但是能实现的复杂度会更高^[16-17]。

在 2008 年的国际光学工程学会会议中,相关报告比较研究了面向 FSO 的 2.667 Gbit/s 开关键控(OOK)、DPSK 和脉冲位置调制(PPM)3 种调制格式,结果表明具体选用哪种先进调制格式会使得系统具有最优的性能取决于所需系统的复杂性、耗费成本、数据传输速率等实际情况^[18]。调制格式的恰当选用具有以下优点:具有较高频谱利用率的先进调制格式用于降低系统的传输损伤,进而降低单位比特传输的成本^[19]。若是可以将多种调制格式兼容在一个系统上,并且可随意切换调制格式,那么此系统就适用于各种实际情况,从而显著提升空间光通信系统的灵活性,降低成本,因此许多学者开始研究多种调制格式可兼容、可切换的激光通信系统。

收稿日期: 2021-07-15; 修回日期: 2021-08-22; 录用日期: 2021-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(61705019)、吉林省国际科技合作项目(20200801053GH)、吉林省教育厅基金(JJKH20200752KJ)

通信作者: *zhangpeng@cust.edu.cn

近几年来对于多调制格式兼容的研究日益增加。2014 年, Mihara 等^[20]利用延迟干涉仪和脉冲整形滤波器, 将二进制相移键控(BPSK)转换到正交相移键控(QPSK); Prakash 等^[21]在此基础上于 2018 年提出一种 BPSK 到 QPSK 和 QPSK 到 16QAM 两阶段的全光调制格式全转换系统, 但是都处在仿真验证的阶段; 2018 年中国科学院西安光学精密机械研究所的 Xie 等^[22]提出一种可兼容 IM、BPSK、DPSK、QPSK、差分正交相移键控(DQPSK)的设计方案, 分析了马赫-曾德尔调制器(MZM)工作模式与各种调制格式的关系, 但暂未见到实际性能测试报道; 2019 年电子科技大学的王永塔^[23]提出一种以 QPSK 为主要调制格式, 还可切换为 BPSK 和 OOK 的多调制兼容系统, 完成了硬件系统研制, 并分析了 MZM 的工作点及偏置点动态控制方法, 但其通信速率达到 2.5 Gbit/s, 仅能兼容 3 种调制格式。

经调研可知, 现有的多制式兼容系统的相关研究并不多, 多数兼容系统还处在理论与仿真阶段, 缺少实验研究。本文设计了一种发射端最高阶调制格

式为 QPSK 及其差分编码模式的 DQPSK 格式, 同时兼容 OOK、BPSK、DPSK。相比于文献[22]中的兼容结构, 所提方案通过在单 IQ 基础上加入另一个 IQ 调制器与相移器组成双 IQ 调制器结构, 以实现双偏振的相位调制格式, 提升传输速率, 扩大格式适应范围。另外, 由于硬件上的变化, 自动偏压控制、高速信号产生及转换方法相对不同。

本文提出基于双偏振 IQ 调制器的多调制格式兼容发射方案, 通过 Optisystem 软件仿真验证所提方案的可行性; 基于此方案加工硬件, 对硬件系统的兼容性和通信性能进行测试, 并分析测试结果。

2 多调制格式兼容激光通信发射端原理

2.1 发射端多调制格式兼容原理

多种 PSK 调制格式的实现可以在同一个双偏振 IQ 调制器硬件上完成, 其结构如图 1 所示, 它原生支持 PM-QPSK, 如果加上差分预编码功能, 即可实现双偏振差分正交相移键控(PM-DQPSK)调制格式。

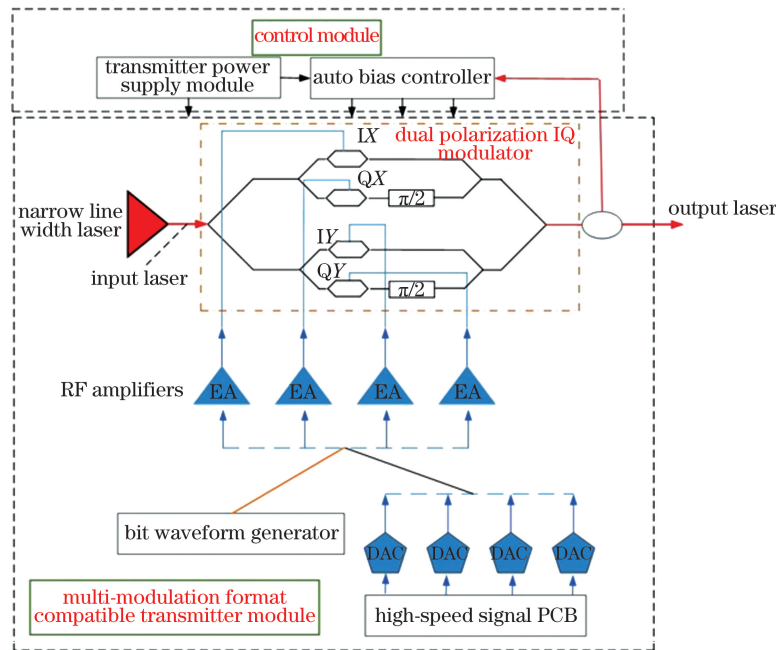


图 1 多调制格式兼容发射机结构

Fig. 1 Structure of multi-modulator-format compatible transmitter

基于马赫-曾德尔(MZ)干涉结构, 假设激光器输出光信号的角频率为 ω_0 , 则其输入信号 $E_{in}(t)$ 可表示为

$$E_{in}(t) = E_0 \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (1)$$

式中: t 为光信号传输时间; E_0 为初始光场; φ 为初始相位。调制光载波的射频信号角频率为 ω_{RF} , 且 $\omega_{RF} = 2\pi f_{RF}$, 则射频信号 V_{RF} 可表示为

$$V_{RF}(t) = V_0 \cos(\omega_{RF} t + \varphi), \quad (2)$$

式中: V_0 为初始射频信号。经过 MZM 调制器后, 调制后的输出光信号与输入光信号的关系^[24]可表示为

$$E_{out}(t) = \frac{E_0}{2} [\cos(\omega_0 t + \varphi_M) + \cos(\omega_0 t - \varphi_M)] = E_{in}(t) \cos \varphi_M, \quad (3)$$

式中: φ_M 表示作用在 MZM 单臂上的电场引起的相

位变化; V_π 表示在 MZM 调制器两臂产生大小为 π 的相位变化时(每个臂产生 $\pi/2$ 相位变化)所需要的电压,即半波电压。加载在 MZM 上的调制电压 $V(t)$ 包括随时间变化的射频信号 $V_{RF}(t)$ 和固定偏置电压 V_{DC} 两部分。

$$\varphi_M = \frac{\pi V_M}{2V_\pi} = \frac{\pi}{2V_\pi} [V_{DC} + V_{RF} \cos(\omega_{RF} t)], \quad (4)$$

式中: V_M 为 MZM 的调制电压。根据以上各式可以得到调制器输出端的光信号强度为

$$I_{out} = |E_{out}|^2 = I_{in} \cos^2 \varphi_M = I_{in} \cos^2 \left\{ \frac{\pi}{2V_\pi} [V_{DC} + V_{RF} \cos(\omega_{RF} t)] \right\}, \quad (5)$$

式中: $I_{in} = |E_{in}|^2$, 为输入光场强度。因此, 可以得

到 MZM 调制器的传输函数^[25]:

$$T = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \cos^2 \left\{ \frac{\pi}{2V_\pi} [V_{DC} + V_{RF} \cos(\omega_{RF} t)] \right\}. \quad (6)$$

根据直流偏置电压不同, MZM 可以分为以下 3 种调制模式: 最大传输偏置点的抑制奇数阶边带调制、正交偏置点的线性调制, 以及最小传输偏置点的双边带载波抑制调制。

根据上述相关理论, 可通过控制直流偏压的大小禁用某个 MZM, 使其不出光, 甚至禁用某个偏振态。

由两个 MZM 组成的 IQ(含差分格式) 调制装置如图 2 所示。

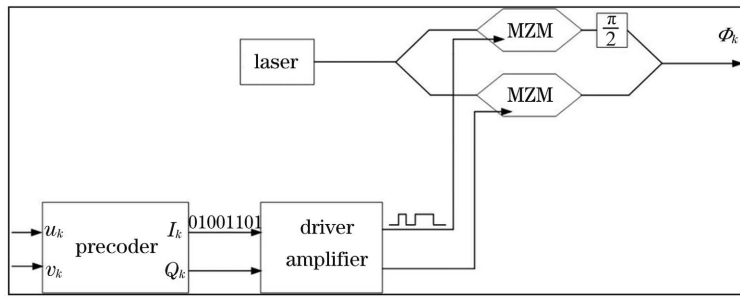


图 2 IQ(含差分编码) 调制装置

Fig. 2 Schematic of IQ modulator (including differential encoder)

2.2 调制格式切换原理

BPSK 和 DPSK 均为二电平格式, 在复数平面的原始数据是 $[0, -1]$ 和 $[0, 1]$ 两个点, 可以认为是 QPSK 及其子集, 统一按照四电平的相干调制格式输入进行预编码和调制即可。对 IM/DD 格式来说, 可以通过调节偏置点注销某个 MZM 臂, 将仅剩的一个臂偏置点选为正交偏置点即可。根据前述理论, 在正交偏置点情况下, 两个 MZM 延迟合束的输出^[26]可表示为

$$E(t_k) = E_0 \cdot \cos \left[\frac{\pi(I_k - Q_k)}{2} \right] \cdot \exp \left[j \frac{\pi(I_k + Q_k)}{2} \right], \quad (7)$$

式中: I_k 和 Q_k 为 I 路与 Q 路的电信号。此时可以进行 OOK 调制格式实现 $I_k \in (0, 0.5)$ 而 $Q_k \equiv -I_k$ 即可。

在最小偏置点情况下, I 路和 Q 路电信号在两个调制器分别产生 0 或 π 的相位延迟, 而在合束之前, 某一个臂通过相位调制器进行 $\pi/2$ 的延迟, 延迟合束的输出^[26]可表示为

$$E(t_k) = E_0 \cdot \cos \left[\frac{\pi(I_k - Q_k) + \pi/2}{2} \right] \cdot \exp \left[j \frac{\pi(I_k + Q_k) + \pi/2}{2} \right]. \quad (8)$$

此时可利用 BPSK 调制格式实现 $I_k \in (0, 1)$ 而 $Q_k \equiv I_k$ 即可。同理, QPSK 调制格式实现 $I_k \in (0, 1)$ 而 $Q_k \in (0, 1)$ 即可。BPSK 和 QPSK 的调制信息分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 BPSK 调制信息

Table 1 BPSK modulation information

Electrical signal	$Q_k = 0$	$Q_k = 1$
$I_k = 0$	$\Phi = \pi/4$	-
$I_k = 1$	-	$\Phi = \pi + \pi/4$

表 2 QPSK 调制信息

Table 2 QPSK modulation information

Electrical signal	$Q_k = 0$	$Q_k = 1$
$I_k = 0$	$\Phi = \pi/4$	$\Phi = 3\pi/4$
$I_k = 1$	$\Phi = 7\pi/4$	$\Phi = 5\pi/4$

DPSK 和 DQPSK 调制格式是光差分格式, 调制器硬件及其偏置点与非差分 PSK 相同, 只需对电脉冲波形进行预编码即可。

双偏振差分正交相移键控 (PM-DQPSK) 即在 DQPSK 的基础上加入偏振复用, 使用两个 IQ 调制器同时进行 DQPSK 调制, 即 4 路信号同时传输, 可

显著提升系统的通信速率。

3 多调制格式兼容激光通信调制仿真分析

根据第 2 节的原理分析,在 Optisystem 仿真软件中基于 IQ 调制器搭建多调制格式兼容系统,对 OOK、BPSK、QPSK、DPSK、DQPSK 调制格式进行调制及切换仿真。

利用 Optisystem 软件仿真 IQ 调制器下的多调制格式兼容系统实验结构如图 3 所示,系统速率为

2.5 Gbit/s,信号源激光器的出射激光波长为 1551 nm (频率为 193.39 THz),激光器线宽为 100 kHz,功率为 10 dBm。在仿真软件中未进行多种格式解调方式的兼容设计,因此,当调制格式为 OOK 时,解调端使用非相干解调,其他调制格式的解调端均采用相干解调。

根据前述理论,将 MZM 设置在正交偏置点工作模式下进行 OOK 调制格式仿真,结果如图 4 所示。

通过对比光的 IQ 调制器后光谱图与 I(Q)路调

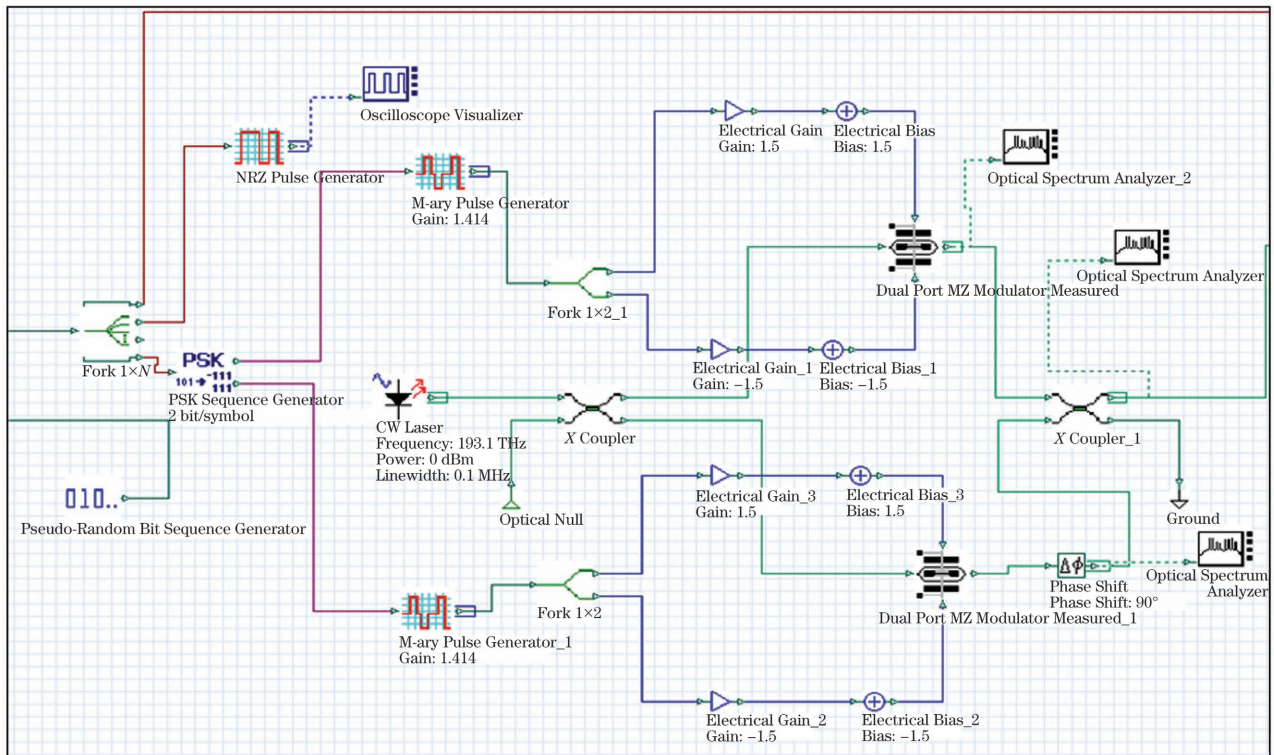


图 3 多调制格式兼容发射端系统仿真示意图

Fig. 3 Schematic of multi-modulation format compatible transmitter system simulation

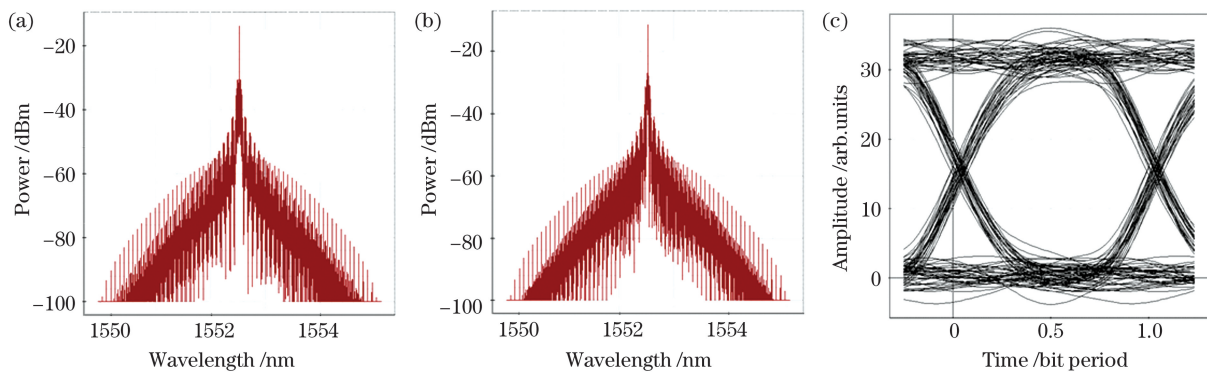


图 4 OOK 格式仿真结果。(a)I(Q)路调制后光谱图;(b)IQ 调制器后光谱图;(c)OOK 数据恢复后眼图

Fig. 4 Simulation results of OOK format. (a) Spectrum of single I(Q) path; (b) IQ-modulator output spectrum; (c) eye diagram after data recovery of OOK format

制后光谱图,发现两光谱图基本没有差别,也就是说单个调制器调制与两个调制器一起调制时频谱特性基本没有发生变化;将接收光功率设置为 -5 dBm,可以看出眼图张开的效果良好, Q 值为 35.15,即在不计误差的情况下,成功实现了 IQ 调制器下 OOK

调制格式的调制发射。

随后,调整 MZM 的偏置电压,使工作模式在最小偏置点, $I_k \in (0,1)$ 而 $Q_k \equiv I_k$ 即可进行 BPSK 仿真。利用 Optisystem 软件仿真 IQ 调制器下的 BPSK 调制格式,仿真结果如图 5 所示。

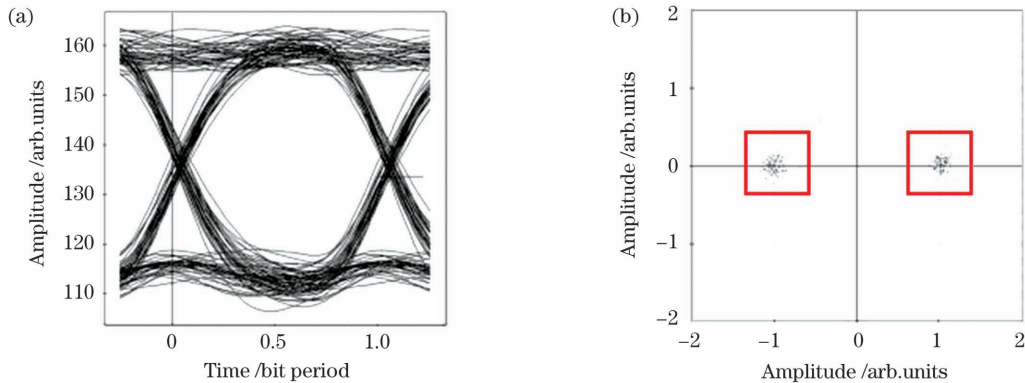


图 5 BPSK 格式仿真结果。(a)眼图;(b)星座图

Fig. 5 Simulation results of BPSK format. (a) Eye diagram; (b) constellation diagram

与 OOK 的结果分析同理,BPSK 格式仿真结果中合束前、后的频谱特性一致,星座图分成两个星座点, Q 值为 13.68,误码率(BER)为 5.48×10^{-7} ,误差矢量幅度(EVM)为 10.33%,成功实现了 BPSK 的调制。

QPSK 调制格式使得 $I_k \in (0,1)$, 而 $Q_k \in (0,1)$ 即可。QPSK 仿真结果如图 6 所示。 Q 值为 8.93,EVM 为 15.57%,即在忽略误差因数的情况下,成功实现了光信号 QPSK 调制格式的调制发射。

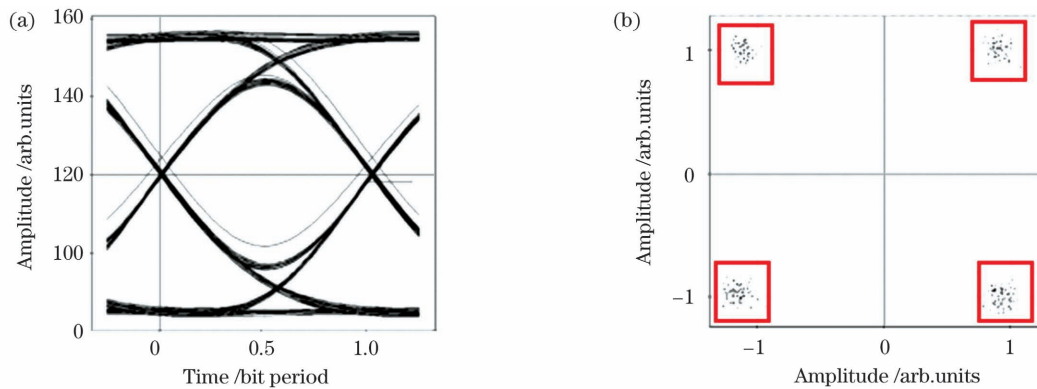


图 6 QPSK 格式仿真结果。(a)眼图;(b)星座图

Fig. 6 Simulation results of QPSK format. (a) Eye diagram; (b) constellation diagram

DPSK 与 DQPSK 的仿真分别是在 BPSK 和 QPSK 的基础上,在信号产生后面添加编码模块,在解调部分添加差分解码模块,星座图解出效果相同。DPSK 的 Q 值为 15.98,EVM 为 8.85%;DQPSK 的 Q 值为 10.24,EVM 为 14.76%。部分结果如图 7 所示。具体仿真结果如表 3 所示,可以看出差分编码格式的 Q 值高于对应的非差分编码格式,但 EVM 更小。

表 3 不同调制格式的仿真结果

Table 3 Simulation results of different modulation formats

Modulation format	Q	EVM / %
OOK	35.15	—
BPSK	13.68	10.33
QPSK	8.93	15.57
DPSK	15.98	8.85
DQPSK	10.24	14.76

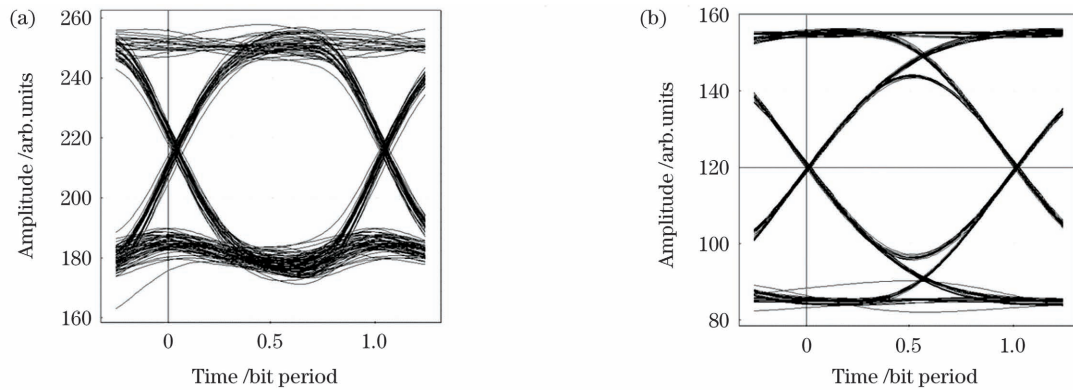


图 7 DPSK 和 DQPSK 格式的仿真结果。(a)DPSK 格式的眼图;(b)DQPSK 格式的眼图

Fig. 7 Simulation results of DPSK and DQPSK formats. (a) Eye diagram of DPSK format; (b) eye diagram of DQPSK format

4 多调制格式兼容发射端传输及通信实验

多调制格式的光调制发射系统主要包括信号的窄线宽光源、调制与驱动、自动偏压控制、高速数字信号处理电路等部分。对于上述 5 种调制格式,数据产生单元生成 4 路 20 Gbit/s 的二进制码,经过射频放大器后驱动双偏振 IQ 调制器的 4 个 MZM,利用调制器偏置电压控制电路实现偏压调节,使得调制器输出特定调制格式的光信号,实现数字相干信号的调制与发射。

4.1 多调制格式兼容发射测试

构建图 8 所示的测试系统,将接收单元恢复数据星座图作为测试对象。激光按照预定速率和预定调制格式被调制后,经过传输信道(光衰减器)被送入接收端的前置放大器,后经混频、探测和示波器采样后,接收信号被送入计算机。在计算机中,利用 MATLAB 软件中的数字相干恢复算法程序恢复出基带发送信号,并测量恢复信号的星座图,根据星座

图可以得出通信调制方式。图 9 为实验系统的实物图。

不同调制格式的实验结果如表 4 和图 10 所示。可以看出:OOK 在 2.5 Gbit/s 通信速率下的眼图的眼张开效果很好,Q 值为 19.2351;5 Gbit/s 的 BPSK 与 10 Gbit/s 的 QPSK 调制格式的星座图分为清晰的 2 个点和 4 个点,Q 值分别为 18.5422 和 15.6265,EVM 值分别为 10.79% 和 12.80%;20 Gbit/s 的 PM-DQPSK 的星座图恢复效果也清晰地呈现出 4 个点,Q 值为 13.5421,EVM 为 14.77%,且 X 偏振和 Y 偏振的星座图并不相同。

设置示波器采样频率为 40 GSa/s,采样点数为 2×10^5 ,将采集到的数据进行处理分析后得到 BER 均为 0,证明 OOK、BPSK、QPSK、PM-DQPSK 调制格式已成功实现。由于 DPSK 的星座图与 BPSK 相同,由 BPSK 切换为 DPSK 只需要将集成高速信号产生板卡的预编码功能开关打开即可实现,因此本文未展示 DPSK 的测试结果。

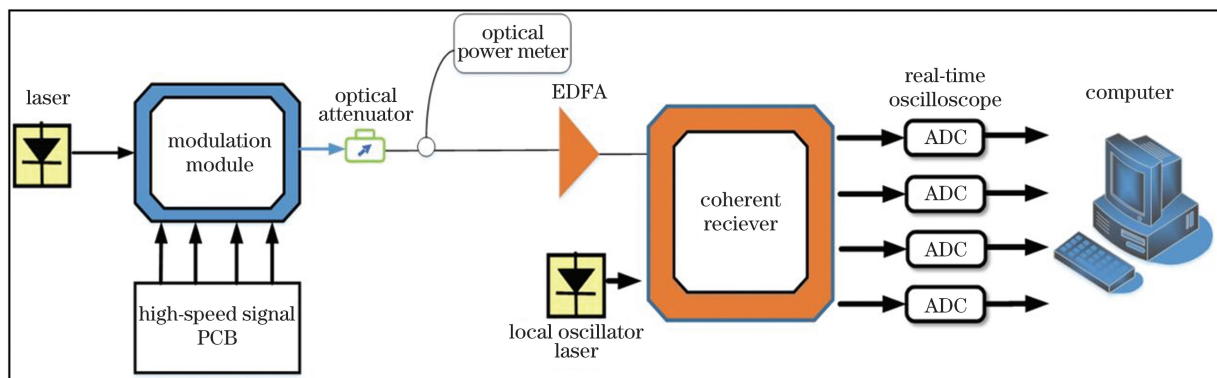


图 8 实验系统框图

Fig. 8 Block diagram of experimental system

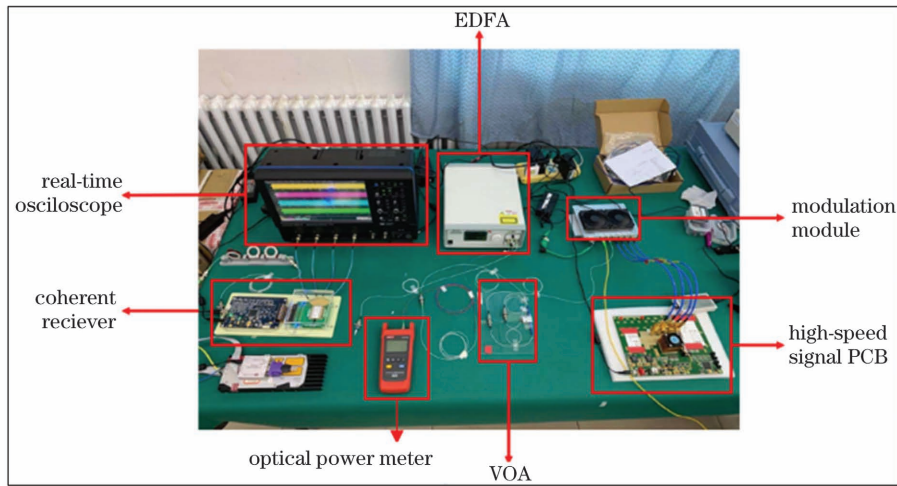


图 9 实验系统实物图

Fig. 9 Physical map of experimental system

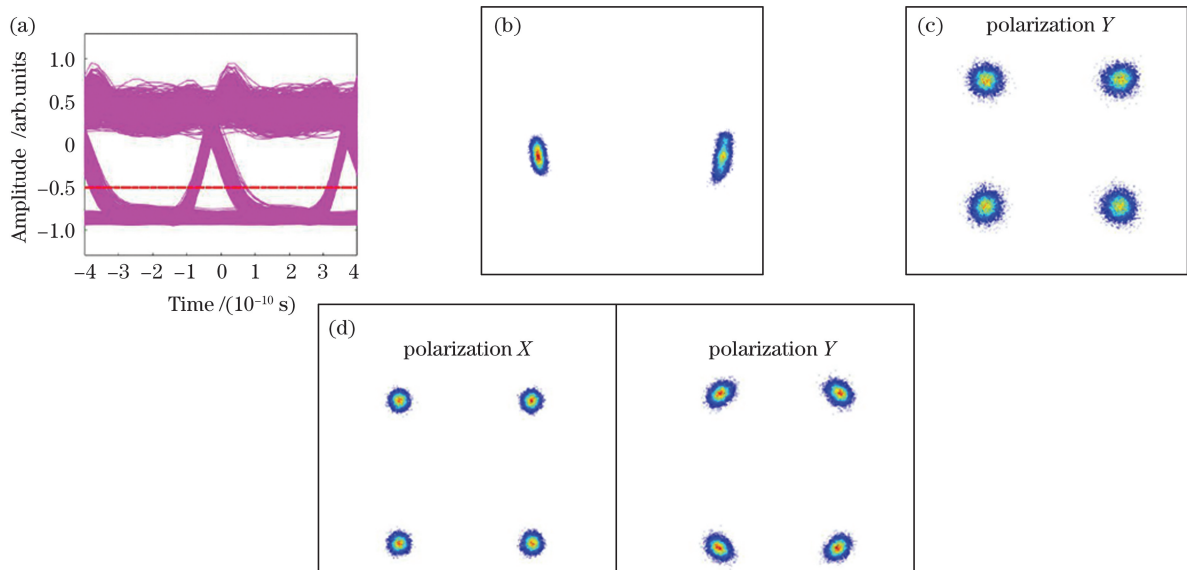


图 10 不同调制格式的测试结果。(a)OOK 格式恢复眼图;(b)BPSK 格式星座图;(c)QPSK 格式星座图;(d)PM-DQPSK 格式星座图

Fig. 10 Test results of different modulation formats. (a) Eye diagram of OOK modulation format; (b) constellation diagram of BPSK modulation format; (c) constellation diagram of QPSK modulation format; (d) constellation diagram of PM-DQPSK modulation format

表 4 不同调制格式的实验结果

Table 4 Experimental results of different modulation formats

Modulation format	Q	EVM / %
OOK	19.2351	-
BPSK	18.5422	10.79
QPSK	15.6265	12.80
PM-DQPSK	13.5421	14.77

实验中通信速率切换的方式为:首先通过烧录不同码元传输速率(2.5 GBaud,5 GBaud,10 GBaud)文件到 FPGA 板卡的方式来改变信号速率;其次变换板卡上设计的开关组来控制 1~4 路信号的传输,其中

OOK、BPSK、DPSK 通过单路信号传输,QPSK 通过双路信号传输,而 PM-DQPSK 通过四路信号传输。不同调制格式可实现的通信速率如表 5 所示。

表 5 5 种格式的码元传输速率对应的通信速率

Table 5 Communication rates corresponding to transmission rates for five formats

Modulation format	unit: Gbit/s		
	2.5 GBaud	5 GBaud	10 GBaud
OOK	2.5	5	10
BPSK/DPSK	2.5	5	10
QPSK	5	10	20
PM-DQPSK	10	20	40

4.2 PM-DQPSK 通信接收性能测试

将接收单元恢复数据 BER 作为测试对象。激光按照预定速率和预定调制格式被调制后经过传输信道(光衰减器)被送入 50 : 50 耦合器,耦合器的一个输出端接入光功率计,用于测量所接收的光功率,另一端接入接收端前置放大器,后经混频、探测和示波器采样后,接收信号被实时输入计算机,在计算机中利用 MATLAB 软件中的数字相干恢复算法程序恢复出基带信号,并离线恢复了星座图及 BER,星座图及 BER 的更新时间为 5 s 左右。调整衰减器,获得 BER 为 10^{-7} 时对应的光功率计读数,即探测灵敏度。

当 PM-DQPSK 格式的 BER 为 10^{-7} 时, 2.5 GBaud 灵敏度为 -43.6 dBm, 5 GBaud 灵敏度为 -42.5 dBm, 10 GBaud 灵敏度为 -39.8 dBm。说明通信速率越高,接收灵敏度越差,但在 40 Gbit/s 的通信速率下灵敏度依然可以接近 -40 dBm。PM-DQPSK 格式不同速率下的灵敏度曲线如图 11 所示。

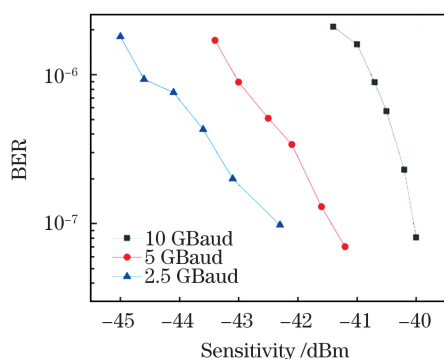


图 11 PM-DQPSK 格式不同速率下的灵敏度曲线

Fig. 11 Sensitivity curves of PM-DQPSK modulation format at different communication rates

上述实验结果表明,所提系统已具有的优点包括:1)多调制格式兼容性较高,支持 5 种以上调制格式;2)高速率通信灵敏度高,灵敏度接近 -40 dBm (40 Gbit/s@ 10^{-7});3)硬件组成较为简单及紧凑。但所提系统也存在一些缺点:1)速率切换时需要 FPGA 内部程序重新烧录,速率切换不够便捷;2)由于采用工作点控制和禁用某一臂方法实现格式切换,其实某一臂的信号不能完全禁用,因此部分格式性能略差于专门调制器(例如 OOK)。

5 结 论

设计了基于双 IQ 调制器可兼容 5 种调制格式的发射机,并在仿真软件中搭建多调制格式兼容发

射系统的原理图,仿真结果证明了 OOK、BPSK、DPSK、QPSK、DQPSK 在此系统上的可兼容性。加工并研制了多调制格式兼容的发射硬件,对该系统的性能数据进行实验测试,实验结果表明:1)该系统成功兼容了 OOK、BPSK、DPSK、QPSK、PM-DQPSK 5 种格式,系统兼容性高;2)该系统码元传输速率可在 2.5 GBaud、5 GBaud、10 GBaud 之间切换,通信速率最高可达 40 Gbit/s;3) PM-DQPSK 格式在离线条件下 BER 为 10^{-7} 、最高速率为 40 Gbit/s 时,灵敏度达到 -39.8 dBm,接收灵敏度较高。

参 考 文 献

- [1] Zhang H Y, Li H Z, Xiao D Y, et al. Performance analysis of spatial-diversity reception over combined effects of atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0405002.
张慧颖, 李洪祚, 肖冬亚, 等. 大气湍流综合效应下空间分集接收性能研究[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0405002.
- [2] Cao M H, Wu X, Wang H Q, et al. Performance of faster-than-Nyquist optical communication system under Gamma-Gamma atmospheric turbulence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906003.
曹明华, 武鑫, 王惠琴, 等. Gamma-Gamma 大气湍流下超奈奎斯特光通信系统性能[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906003.
- [3] Chen J D, Wang T S, Zhang X M, et al. Free space optical communication system based on wide-spectrum partially coherent laser [J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(1): 157-161.
陈俊达, 王天枢, 张欣梦, 等. 自由空间宽谱部分相干光通信系统[J]. 应用光学, 2019, 40(1): 157-161.
- [4] Palliyembil V, Vellakudiyana J, Muthuchidambaranathan P. Asymptotic bit error rate analysis of free space optical systems using spatial diversity [J]. Optics Communications, 2018, 427: 617-621.
- [5] Du B C, Wang Y, Wu E, et al. Laser communication based on a multi-channel single-photon detector [J]. Optics Communications, 2018, 426: 89-93.
- [6] Guan H J, Liu Y Q, Zhang F J. Coherent free-space optical communication system with quadrature phase-shift keying modulation using a digital phase recovery algorithm [J]. Chinese Optics, 2019, 12(5): 1131-1138.
管海军, 刘云清, 张凤晶. 基于数字相位恢复算法的正交相移键控自由空间相干光通信系统[J]. 中国光学, 2019, 12(5): 1131-1138.
- [7] Niu M B, Cheng J L, Holzman J F. Error rate analysis

- of M-ary coherent free-space optical communication systems with K-distributed turbulence [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(3): 664-668.
- [8] Kushnerov M. Digital coherent transceivers: from algorithm design to economics [C] // 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2017: 1-46.
- [9] Sova R M, Sluz J E, Young D W, et al. 80 Gb/s free-space optical communication demonstration between an aerostat and a ground terminal [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6304: 630414.
- [10] Wang Z X, Zhong W D, Fu S N, et al. Performance comparison of different modulation formats over free-space optical (FSO) turbulence links with space diversity reception technique [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2009, 1(6): 277-285.
- [11] Lu J H, Letaief K B, Chuang J C I, et al. M-PSK and M-QAM BER computation using signal-space concepts [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1999, 47(2): 181-184.
- [12] Zhu D M, Mathews V J, Detienne D H. A likelihood-based algorithm for blind identification of QAM and PSK signals [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(5): 3417-3430.
- [13] Silva N A, Pinto A N. Role of amplifiers gain on the achievable information rate of M-ary PSK and QAM constellations [J]. *Optics Communications*, 2017, 383: 215-222.
- [14] Mata Calvo R, Becker P, Giggenbach D, et al. Transmitter diversity verification on ARTEMIS geostationary satellite [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8971: 897104.
- [15] Grein M E, Kerman A J, Dauler E A, et al. An optical receiver for the Lunar laser communication demonstration based on photon-counting superconducting nanowires [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9492: 949208.
- [16] Beppu S, Kasai K, Yoshida M, et al. 2048 QAM (66 Gbit/s) single-carrier coherent optical transmission over 150 km with a potential SE of 15.3 bit/s/Hz [J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4960-4969.
- [17] Yoshida M, Takefushi N, Kasai K, et al. Suppression of large error floor in 1024 QAM digital coherent transmission by compensating for GAWBS phase noise [J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36691-36698.
- [18] Chand N, Hunton A J, Eteson B M. A comparative study of 2.667 Gb/s OOK, DPSK, and PPM modulation formats for FSO applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7091: 70910G.
- [19] 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.
李韦萍, 孔森, 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.
- [20] Mihara M, Shinohara Y, Kishikawa H, et al. Modulation format conversion from BPSK to QPSK using delayed interferometer and pulse shaping filter [C] // 2014 IEEE Photonics Conference, October 12-16, 2014, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014: 82-83.
- [21] Prakash S A, Banu A T, Raghul E B, et al. Multilevel modulation format conversion using delay-line filter [C] // 2018 IEEE World Symposium on Communication Engineering (WSCE), December 28-30, 2018, Singapore. New York: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [22] Xie X, Huang X, Wang W, et al. Multi-modulation-format compatible high-speed laser signal generation system and method: US11128382 [P]. 2021-09-21.
- [23] Wang Y T. Research and implementation of multi-mode coherent optical modulator [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
王永塔. 多制式相干光调制器的研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [24] Ma J X, Yu J, Yu C X, et al. Fiber dispersion influence on transmission of the optical millimeter-waves generated using LN-MZM intensity modulation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(11): 3244-3256.
- [25] Krohling R A, Rey J P. Design of optimal disturbance rejection PID controllers using genetic algorithms [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2001, 5(1): 78-82.
- [26] Song X Q. Research on high speed DP-QPSK coherent optical communication system [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.
宋晓强. 高速 DP-QPSK 相干光通信系统的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.

Simulation and Experimental Research of Multimodulation Format Compatible Space Laser High-Speed Communication Modulation

Zhao He¹, Zhang Peng^{1,2*}, Yang Zhiqun³, Ouyang Ju¹, Tian Dongsheng¹, Liu Zhuang¹,
Wang Dashuai², Jiang Huilin¹

¹ School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130012, China;

² School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130012, China;

³ School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract

Objective Recently, free space optical communication (FSO) technology has been widely used, and our country's optical communication technology level has also been significantly improved. The traditional IM/DD modulation method has been unable to meet the requirements of high-rate optical communication. The optical communication system of phase modulation/coherent detection can effectively improve the receiving sensitivity of the system under high-rate conditions. However, the system composition is more complicated. If the two modulation methods can be compatible with the same system, the flexibility and applicability of the optical communication system will be significantly improved. In the 2008 International Optical Engineering Society, related reports compared and studied the three modulation formats of 2.667 Gbit/s OOK, DPSK, and PPM for FSO. The results showed that the modulation format used to make the system have better communication performance is determined according to actual conditions, such as system complexity, cost, and data transmission rate. Therefore, to comply with the trend of multimodulation format compatibility in free-space optical communications and improve system flexibility, this study proposes a laser communication transmission scheme compatible with multimodulation formats based on dual IQ modulators. The proposed system is compatible with five modulation formats (OOK, BPSK, DPSK, QPSK, and PM-DQPSK).

Methods This compatible system is based on dual IQ modulators. First, we theoretically analyze the format compatibility of the dual IQ modulator. It natively supports the PM-DQPSK modulation format. It can also switch the format by changing the bias voltage of a certain arm and changing the working mode of MZM. Second, based on the dual IQ modulation system described in theory, we establish a multimodulation compatible transmitter system block diagram on the simulation software and conduct simulation analysis on OOK, BPSK, DPSK, QPSK, and DQPSK. The receiver of the OOK format uses a direct demodulation system, and other formats use a coherent demodulation system. The eye and constellation diagrams in five formats are obtained. Then, we analyze the obtained Q value and BER to verify the compatibility and feasibility of the five modulation formats on this system. Furthermore, we perform hardware processing based on the design structure. Consequently, we develop an experimental system. The experimental system uses the FPGA board to transmit signals and changes the signal bit rate by changing the program that is programmed into the FPGA board. We use the bias controller to change the bias voltage applied to a modulator channel so as to change the modulation format. Finally, we use a coherent receiver and a high-speed real-time oscilloscope to process the received signal in the receiving end. The computer restores the constellation and eye diagrams of the signal to verify the format compatibility of the transmitting end. The communication performance of this system is analyzed through BER and Q values.

Results and Discussions The simulation results verify the compatibility of the five formats in the same dual IQ modulator. The Q value of OOK is 35.15. The EVM values of BPSK, DPSK, QPSK, and DQPSK are 10.33%, 8.85%, 15.57%, and 14.76% (Figs. 4–7; Table 3), respectively. The results show that the EVM value of QPSK is slightly higher than 15% of the general engineering requirements, and other formats meet the requirements. Meanwhile, the DPSK format has the best value. The experimental results verify the compatibility of the five modulation formats on the dual IQ modulator and obtain the corresponding eye and constellation diagrams (Fig. 10). The Q value of OOK is 19.2351, and the EVM values of BPSK, QPSK, and PM-DQPSK are 10.79%, 12.80%, and

14.77% (Table 4), respectively. From the image restored by the computer, it can be seen that the eye diagram opening effect in OOK format is good. The constellation diagrams of other PSK formats can also be divided into two constellation and four constellation points. It also verifies the communication sensitivity test of PM-DQPSK at different rates. Under the condition of BER of 10^{-7} , the sensitivity of 2.5, 5, and 10 GBaud are -43.6 , -42.5 , and -39.8 dBm, respectively (Fig.11).

Conclusions In this study, we design a transmitter compatible with five modulation formats based on dual IQ modulators. We develop a schematic of a multimodulation format compatible transmission system in the simulation software. The simulation results show that this system is compatible with OOK, BPSK, DPSK, QPSK, and DQPSK. We also process and develop multimodulation format compatible transmission hardware and conduct experimental tests on the performance data of the system. The simulation results show that the five formats can be compatible with the same IQ modulator. The Q value decreases as the modulation level increases. In contrast, the EVM value increases as the modulation level increases. The experimental results show that this hardware system can support more than five compatible formats; high-speed communication sensitivity is high, and the sensitivity is close to -39.8 dBm (40 Gbit/s@ 10^{-7}). The rate at each format is adjustable in three levels (2.5, 5, and 10 GBaud), and the communication bit rate can reach 40 Gbit/s.

Key words optical communication; space laser communication; multimodulation format compatible system; IQ modulator; sensitivity