

文章编号: 2095-4980(2024)03-0309-07

BPSK-QPSK 和 QPSK-16QAM 的光调制格式转换

林 昭, 王兴财, 冯世杰

(电子科技大学 电子科学技术研究院, 四川 成都 611731)

摘 要: 信号在调制方式不同的系统之间传输时, 需要对信号调制格式进行转换, 而调制格式转换通常在电信号上进行, 要将光信号恢复成电信号。在电信号上进行调制格式转换后, 再经光电调制器转换成光信号发射。频繁的光电或光电转换通常会增加系统成本, 针对该问题, 提出了利用相干叠加在光域上实现二进制相移键控(BPSK)到正交相移键控(QPSK)以及 QPSK 到正交幅度调制(16QAM)的调制格式转换的方法。实验通过 Optisystem 软件对转换模型进行仿真, 采用 10 Gbps 伪随机信号作为测试信源, 通过星座图观测出信号成功转换为 QPSK 和 16QAM; 并在不同光信噪比、光源线宽和信号功率下对转换模型与直接 QPSK、16QAM 传输模型进行误码率分析对比, 在相同条件下转换模型和直接传输的误码率高度保持一致, 表明这种调制格式转换方法具有较高的稳定性和准确性, 能够适用于不同系统间的信号传输。

关键词: 光通信; 调制; 二进制相移键控; 正交相移键控; 正交幅度调制

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022037

Optical modulation format conversion for BPSK-QPSK and QPSK-16QAM

LIN Zhao, WANG Xingcai, FENG Shijie

(Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: When the signal is transmitted between systems with different modulation methods, the modulation format needs to be converted. Modulation format conversion is usually carried out on electrical signals and requires a process of electro-optical conversion after optical-electro conversion. Frequent optical-electro or electro-optical conversion usually increases the system cost. To address this problem, the implementation of format conversion from Binary Phase Shift Keying(BPSK) to Quadrature Phase Shift Keying(QPSK) and from QPSK to Quadrature Amplitude Modulation(16QAM) by using coherent superposition methods on the optical domain is proposed. In the experiment, the conversion model is simulated by Optisystem software, Taking 10 Gbps pseudo-random signal as the test signal, it is successfully converted to QPSK and 16QAM observed by constellation diagrams. The Bit Error Rate(BER) of the conversion model and the direct QPSK and 16QAM transmission models are compared under different Optical Signal Noise Ratios(OSNRs), optical source bandwidths and signal powers. The BERs of the conversion model and the direct transmission remain highly consistent under the same conditions, indicating that this modulation format conversion method has high stability and accuracy, and can be applied to signal transmission between different systems.

Keywords: optical communication; modulation; Binary Phase Shift Keying; Quadrature Phase Shift Keying; 16 Quadrature Amplitude Modulation

光通信有着速率高、频带宽、方向性好、保密性佳、低损耗等许多优点, 是现代通信网络的主要组成部分^[1]。近年来, 随着数字信号处理技术的发展, 光通信不断向超高速率、超大容量、超长距离、超宽灵活的维度升级演进^[2], 为提高传输容量和频谱效率, 采用了先进的调制格式, 更有效地利用带宽资源^[3-4]。系统采用的调制格式通常取决于所需的传输容量、光覆盖范围和系统成本, 不同传输系统之间通常需要进行信号格式转换。一般短距离传输发送的信号被应用到长距离传输, 需要将低阶调制转换成高阶调制; 长距离传输转到短距离则

收稿日期: 2022-02-14; 修回日期: 2022-03-24

与之相反^[5]。传统的格式转换是先通过光电转换，然后对电信号以其他格式重新调制编码，再通过电光转换传输出去^[6]。本文采用的格式转换方法直接在光域上进行，避免了光信号恢复成电信号后，又经过电信号转换成光信号的调制环节，应用于不同调制系统间信号传输，能够节省系统成本。

目前业内有很多研究光调制格式转换的技术，文献[7]使用光纤延迟线对信号进行周期延迟，并与原始信号叠加后通过2倍周期抽取实现了二进制相移键控(BPSK)到正交相移键控(QPSK)的转换，文献[8]利用光纤延迟线和整形滤波器实现将QPSK信号到正交幅度调制(16QAM)的格式转换，但光纤延迟线的结构复杂，不易集成，用在通信系统中成本较高。文献[9]利用频分复用技术和非线性光纤实现二进制振幅键控(On-Off Keying, OOK)和QPSK到8QAM的转换，这种方法需要设置保护间隔，占据了更多频谱带宽。部分研究人员通过对光脉冲进行旋转和调整增益使OOK信号和QPSK信号合成了一路8QAM信号^[10]；利用偏振分束器将16QAM信号转换成两路PAM4信号^[11]。本文主要使用串并转换器、光电调制模块和合波器，利用相干叠加的方法在发送端实现信号的调制格式转换；在接收端增加了信号转换电路，通过QPSK和16QAM解调器实现信号的恢复。这种结构不需要使用光纤延迟线对信号锁相，也不需要预留保护带宽。

1 系统结构

本文使用相干叠加的方法实现信号BPSK到QPSK的转换(简记为BPSK-QPSK)和QPSK到16QAM的转换(简记为QPSK-16QAM)。在QPSK-16QAM结构中，信源经串并转换形成的两路电信号分别通过QPSK调制，并且其中一路信号设置6 dB的增益。调制后的I、Q信号分别接到马赫曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)的上下臂，光信号通过滤波后，设置不同的信噪比叠加输出，在光域上实现了信号格式的转换。接收端，光信号与本振激光相干解调后形成的两路正交光波通过光电转换后进入解调、解码环节；信号通过转换电路保证星座码元与解调器对应输出。BPSK-QPSK格式转换过程与QPSK-16QAM类似，图1为QPSK-16QAM的格式转换结构图，图中 $\pi/2$ 为正交相移。

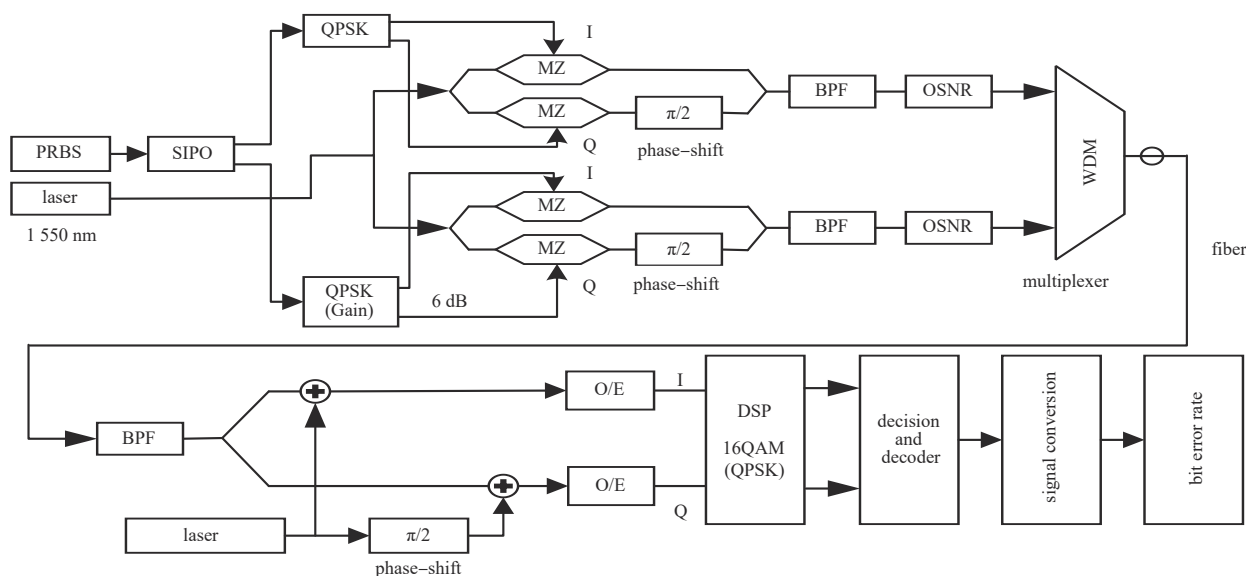


Fig.1 Diagram of signal format conversion transceiver

图1 信号格式转换收发结构图

2 理论部分

一般通信系统在发送端对信号进行调制，在接收端采用对应解调方法对信号解调。本实验在信号收发端使用BPSK和QPSK调制，接收端使用QPSK和16QAM的解调方式；主要源于发射端两路光信号相干叠加后发生格式转换，以及接收端在QPSK和16QAM解调后增加了信号转换电路，使每个象限星座码型与解调器输出信号相对应。

2.1 发射端格式转换

实验采用激光器作为MZM调制器的输入光源，设激光器发光的电场分量为 E ：

$$E = \sqrt{P_i} \exp \{j(2\pi f_0 t + \theta(t))\} \quad (1)$$

式中： P_i 和 f_0 分别为激光器的发射功率和频率； $\theta(t)$ 为发出光波的相位。利用MZM调制器完成相位调制后，输出光信号 E_{out} 表达式如下：

$$E_{\text{out}} = jE_{\text{in}} \exp(j\beta L) \exp\left(j\frac{\pi}{2} \times \frac{U_1 + U_2}{U_\pi}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{U_1 - U_2}{U_\pi}\right) \quad (2)$$

式中： E_{in} 为输入MZM调制器的光波电场强度； β 为传输常数； L 为调制器的电极长度； U_π 为MZM调制器的半波电压； U_1 、 U_2 分别为加在MZM调制器的上下臂调制电压^[12]。

设经过PSK调制后的I、Q两路电信号分别为 e_i 、 e_q 。其中I路信号在进行电光调制时， $U_1 = U_\pi e_i$ ， $U_2 = -U_\pi e_i$ ，输出I路信号的光载波电场表达式为 E_I ，

$$E_I = \frac{\sqrt{2}}{2} jE_{\text{in}} \exp(j\beta L) \cos(\pi e_i) \quad (3)$$

对于Q路信号，其调制方式不变，但是为了产生正交分量，在MZM输出后加入90°的相位延迟器。Q路电场表达式 E_Q 如下：

$$E_Q = \frac{\sqrt{2}}{2} jE_{\text{in}} \exp(j\beta L) \cos(\pi e_q) \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

PSK信号经MZM调制后的光信号如下：

$$E_{\text{PSK}} = \frac{\sqrt{2}}{2} jE_{\text{in}} \exp(j\beta L) \left[\exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) \cos(\pi e_i) + \cos(\pi e_q) \right] = \frac{\sqrt{2}}{2} jE_{\text{in}} \exp(j\beta L) \exp[j\phi(t)] \quad (5)$$

式中 $\phi(t)$ 为光脉冲对应的调制相位。设串并转换后的两路电信号经BPSK调制后对应光信号分别为 E_{BPSK1} 、 E_{BPSK2} ：

$$\begin{cases} E_{\text{BPSK1}} = A_m \exp[j\phi_1(t)] \\ E_{\text{BPSK2}} = A_m \exp[j\phi_2(t)] \end{cases} \quad (6)$$

式中： $A_m = \frac{\sqrt{2}}{2} jE_{\text{in}} \exp(j\beta L)$ ； $\phi_1(t)$ 、 $\phi_2(t)$ 分别为两路信号调制后的相位。

设两路BPSK光信号通过叠加后合为信号 E_{BCO} ：

$$E_{\text{BCO}} = E_{\text{BPSK1}} + E_{\text{BPSK2}} = A_m (\exp[j\phi_1(t)] + \exp[j\phi_2(t)]) \quad (7)$$

BPSK星座变换时，0映射为1，1映射为-1，然后经行归一化处理。

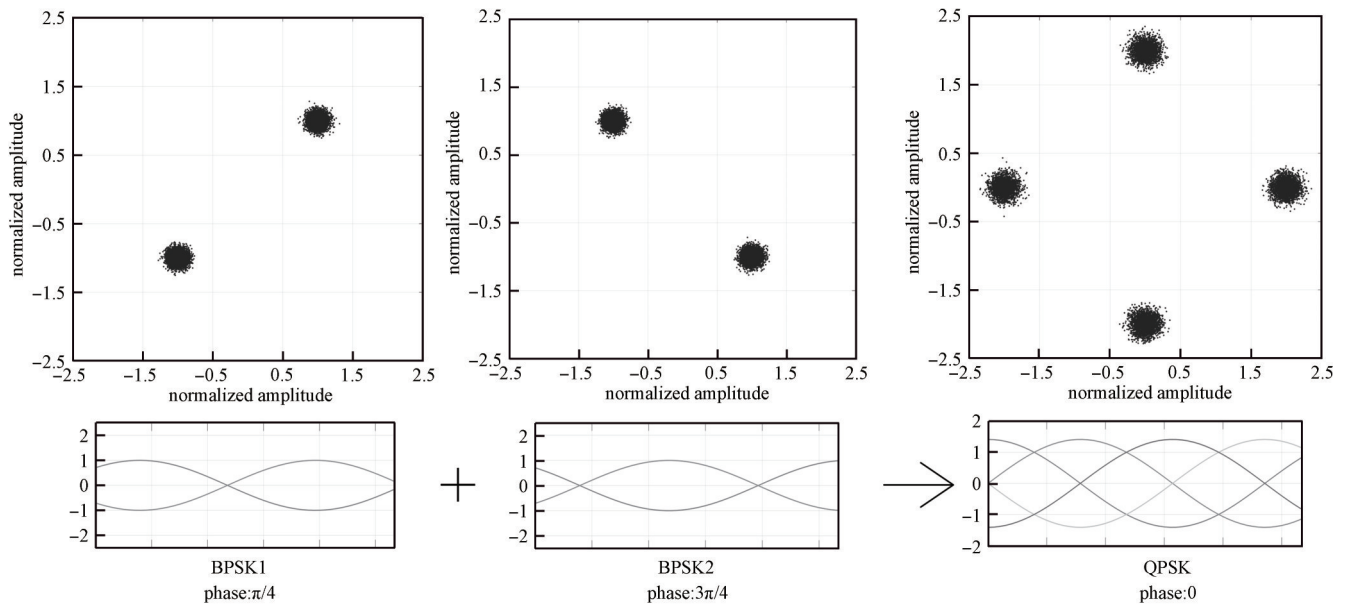


Fig.2 Converting BPSK signal to QPSK

图2 BPSK信号转换成QPSK

两路 BPSK 光信号相干叠加后形成一路 QPSK 信号示意图如图 2 所示, 设置不同的初始相位, 可得到星状或方块状的 QPSK 星座图。

同理, 设两路 QPSK 光信号分别为 E_{QPSK1} 、 E_{QPSK2} , 其中对第二路信号通过 6 dB 的增益放大。

$$\begin{cases} E_{\text{QPSK1}} = A_m \exp[j\phi_1(t)] \\ E_{\text{QPSK2}} = 2A_m \exp[j\phi_2(t)] \end{cases} \quad (8)$$

QPSK 星座变换时, 将原始比特映射后进行归一化处理。

表 1 为 QPSK 光调制相位与比特序列对应的编码关系。

设两路 QPSK 光信号通过耦合器后合为 E_{QCO} :

$$E_{\text{QCO}} = E_{\text{QPSK1}} + E_{\text{QPSK2}} = A_m \{ \exp[j\phi_1(t)] + 2\exp[j\phi_2(t)] \} \quad (9)$$

两路 QPSK 光信号相干叠加形成一路 16QAM 信号示意图如图 3 所示。

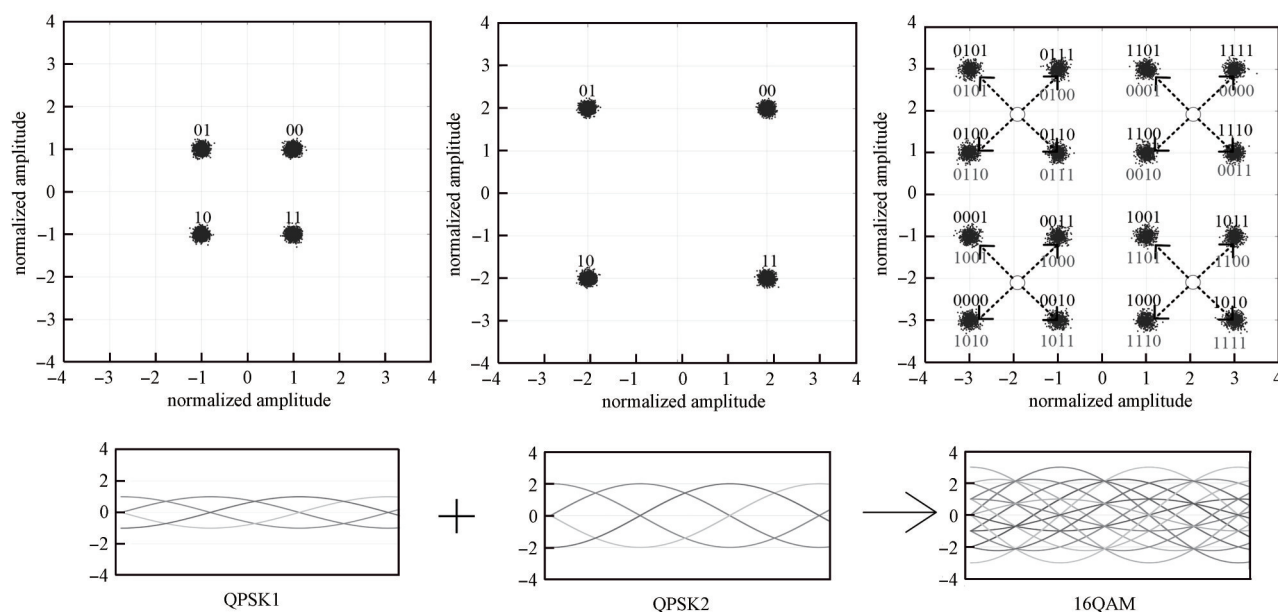


Fig.3 Converting QPSK signal to 16QAM

图3 QPSK 信号转换成 16QAM

2.2 接收端转换电路

虽然光信号通过叠加方式转换成了 QPSK 和 16QAM 星座, 但每个星座点的编码和标准 QPSK 和 16QAM 星座码元有所差别。图 3 中使用格式转换方法生成 16QAM 4 bit 码元序列为星座点上方信号, 使用标准 16QAM 调制器编码后序列为星座点下方信号; 因此在接收端需要增加信号转换电路使星座码元正确映射恢复, 转换电路位置如图 1 所示。在 BPSK-QPSK 结构中, 设经过 QPSK 解码输出的 2 bit 信号分别为 a_i 、 b_i , 转换电路输出的 2 bit 信号为 a_o 、 b_o , 输出方程如式(10):

$$\begin{cases} a_o = b_i \\ b_o = a_i \oplus b_i \end{cases} \quad (10)$$

最后按照 $a_o b_o$ 的顺序合成一路信号输出, 其中 $\oplus$ 代表异或运算。

在 QPSK-16QAM 结构中, 设经过 16QAM 解码输出的 4 bit 信号分别为 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i , 转换电路输出的 4 bit 信号为 a_o 、 b_o 、 c_o 、 d_o , 输出方程如式(11):

$$\begin{cases} a_o = b_i, b_o = a_i \oplus b_i \\ c_o = d_i, d_o = c_i \oplus d_i \end{cases} \quad (11)$$

最后按照 a_o 、 c_o 、 b_o 、 d_o 的顺序合成一路信号输出。

3 实验仿真

实验使用 Optisystem 对 BPSK-QPSK 和 QPSK-16QAM 的转换模型进行仿真, 并在不同光信噪比、光源线宽和信号功率下, 利用 MATLAB 统计出误码性能曲线。

3.1 BPSK-QPSK

BPSK-QPSK 转换系统主要部分包括两路 BPSK 信号产生、BPSK 光信号相干叠加以及接收端 QPSK 信号解调恢复。实验采用激光波长为 1 550 nm (193.414 THz), 功率为 10 dBm, 光波通过分束器形成 2 束频率、相位、功率相等的光载波作为 2 个 MZM 调制器的输入光源。电信号测试源由伪随机序列发生器生成, 长度为 2^{16} bit, 传输速率设为 10 Gb/s; 信号经串并转换生成的两路 5 Gb/s 信号, 分别经由 2 个初相不同的 BPSK 调制器生成 I、Q 信号。MZM 输出的两路光信号由耦合系数为 0.5 的合波器合成一路 QPSK 光信号传输, 光纤链路中通过设置增益和增加噪声, 将信号传输到接收端。图 4(a) 为噪声功率为 -37 dBm 时, 光纤中 QPSK 信号的光谱。

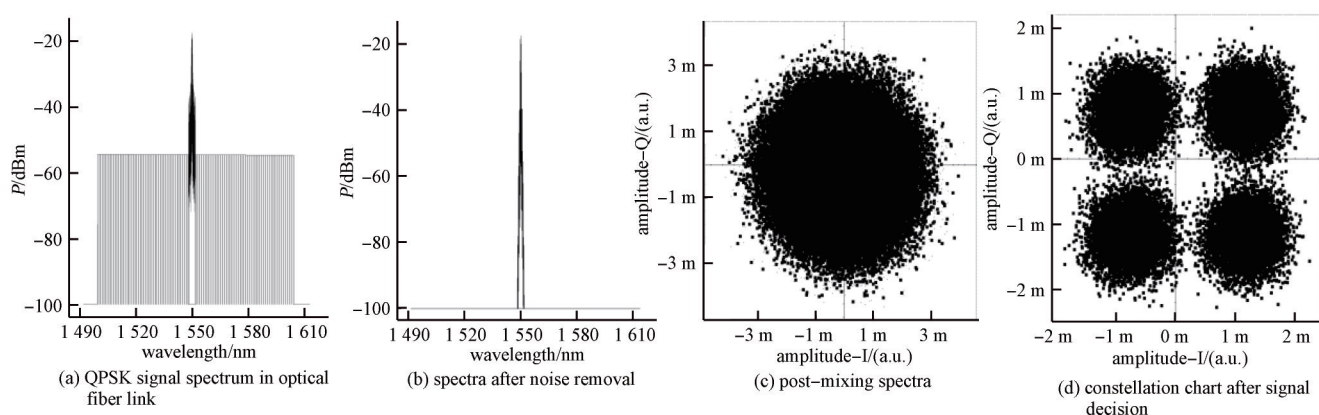


Fig.4 BPSK-QPSK conversion results

图4 BPSK-QPSK 转换结果图

接收端光信号通过中心频率为 193.414 THz, 带宽为 20 GHz 的带通滤波器, 并由高斯滤波器滤出噪声, 滤噪后的 QPSK 信号光谱如图 4(b) 所示。信号通过滤波后使用 90° 混频器和平衡接收机完成两路 I、Q 信号与本振光源的相干接收, 混频输出的信号经光电转换后相位图如图 4(c) 所示, 噪声和信号分布在圆周内。数字信号处理模块对电信号进行再滤波和解调处理, 最后将通过判决输出的 I、Q 信号解码, 并由转换电路恢复出原始数据。图 4(d) 为经过解调后的两路信号相位关系, 表明这种结构实现了信号 BPSK 到 QPSK 的调制格式转换。

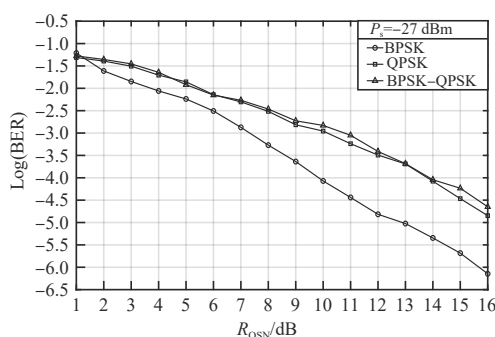


Fig.5 BPSK, QPSK and BPSK-QPSK BER under OSNR

图5 OSNR 下 BPSK、QPSK 和 BPSK-QPSK 误码曲线

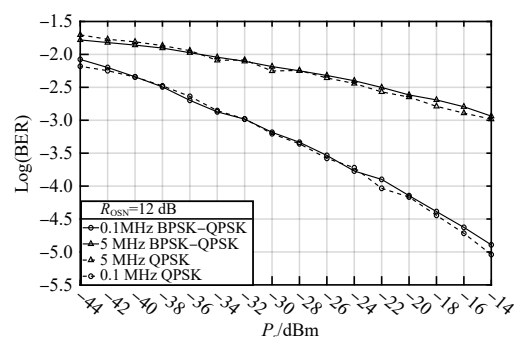


Fig.6 QPSK and BPSK-QPSK BER under signal power

图6 信号功率下 QPSK 和 BPSK-QPSK 误码曲线

采用两路光波承载 BPSK 信号, 接收端通过 QPSK 解调, 并由转换电路输出。图 5 为信号功率为 -27 dBm 时, 在不同光信噪比(OSNR)下 BPSK 与 QPSK 传输以及 BPSK-QPSK 的误码函数图像, 此时激光器的线宽为 0.1 MHz。在相同的信噪比下 BPSK 传输的误码性能最优, BPSK-QPSK 与 QPSK 传输误码差异小于 0.3 dB; 并且在光信噪比大于 8 dB 时误码性能低于 7% 的硬件判决前向纠错阈值 -2.42 dB^[13]。图 6 是 OSNR 为 12 dB 时, 激光器线宽分别为 0.1 MHz 和 5 MHz 时, BPSK-QPSK 与 QPSK 的误码率与信号功率关系图。在激光线宽为 0.1 MHz 时

信号有更低的误码, 并且随着信号功率的增加误码率逐渐下降, 无论是在 0.1 MHz 还是 5 MHz 的光源线宽下, BPSK-QPSK 有着与 QPSK 高度一致的误码性能, 表明这种转换结构具有稳定性。由图 5 和图 6 可以看出信号功率和光信噪比越高, 激光器线宽越小, 误码率越低, 并且这种结构能够实现无差错的格式转换。

3.2 QPSK-16QAM

QPSK-16QAM 转换系统与 BPSK-QPSK 系统类似, 主要区别在于发射端其中一路 QPSK 信号需通过功率为 6 dB 的增益, 接收端采用的是 16QAM 的解调方式, 以及后面转换电路不同。

图 7(a) 为无噪声时两路 QPSK 光信号合并形成的一路光谱信号。图 7(b) 为接收端通过混频器和光电检测后 I、Q 两路信号关系图, 可以看出信号和噪声分布在 3 个圆周上, 对应 16QAM 中信号 3 种不同模长。图 7(c) 为解调后 I 路通道对应的眼图, 图中信号存在 4 种不同的状态, 即对应归一化后 16QAM I 路信号 4 种电平。图 7(d) 为信噪比 15 dB 时, 解调后的两路信号星座图, 表明实现了 QPSK 到 16QAM 的星座转换, 并且星座边界清晰明显, 易于判决。

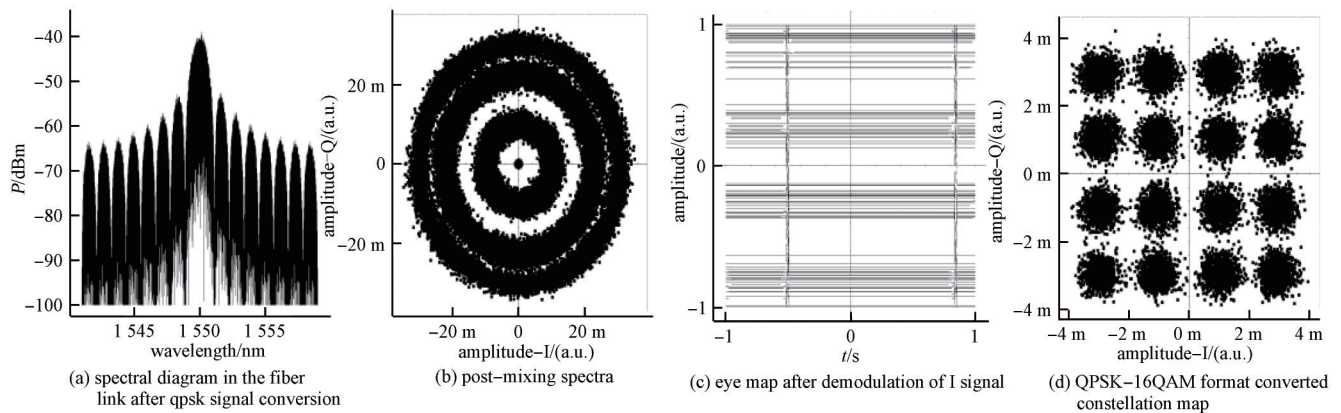


Fig.7 QPSK-16QAM conversion results

图 7 QPSK-16QAM 转换结果图

图 8 显示了信号功率为 -20 dBm 时, 在不同 OSNR 下 QPSK 与 16QAM 传输以及 QPSK-16QAM 的误码函数图像, 此时激光器的线宽为 0.1 MHz。在相同的信噪比下 QPSK 的误码性能最优, QPSK-16QAM 与 16QAM 直接传输误码差异小于 0.3 dB; 并且在光信噪比大于 9 dB 时误码性能低于 7% 的硬件判决前向纠错阈值 -2.42 dB。图 9 是 OSNR 为 12 dB 时, 在激光器线宽 0.1 MHz 和 5 MHz 时, 16QAM 与 QPSK-16QAM 的误码率与信号功率关系图。在激光线宽为 0.1 MHz 时信号有更好的误码率, 无论是在 0.1 MHz 还是 5 MHz 的光源线宽下, QPSK-16QAM 有着与 16QAM 高度一致的误码性能。由图 8 和图 9 可以看出大部分误码曲线低于 -2.42 dB 的阈值, 说明信号经格式转换后能够成功接收。

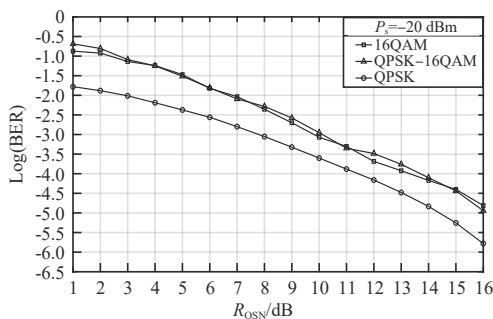


Fig.8 QPSK, 16QAM and QPSK-16QAM BER under OSNR

图 8 OSNR 下 QPSK, 16QAM 和 QPSK-16QAM 误码曲线

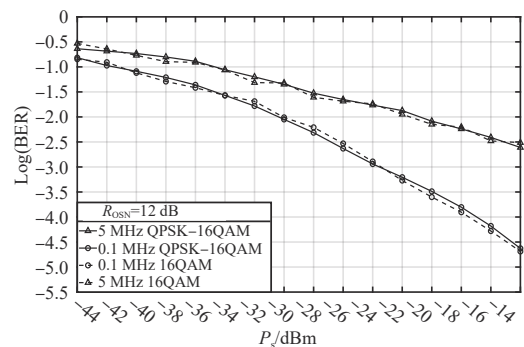


Fig.9 QPSK, 16QAM and QPSK-16QAM BER under OSNR

图 9 OSNR 下 QPSK, 16QAM 和 QPSK-16QAM 误码曲线

4 结论

本文研究的光信号 BPSK-QPSK、QPSK-16QAM 的转换结构, 其优点是不需要对光信号锁相和预留带宽。同时 BPSK、QPSK 和 16QAM 的调制格式在光通信上得到了普遍应用, 因此基于它们之间的格式转换有实际用处。

文章使用计算机软件对格式转换方法进行仿真分析,通过星座图反映出调制格式的成功转换,并以误码率作为光信噪比和接收功率的函数对系统性能做了评估,证明了这种结构能够实现信号调制格式的转换。

参考文献:

- [1] 赵明明,余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):931-937. (ZHAO Mingming, YU Jianjun. Research status and application prospects of terahertz communication systems[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):931-937.) doi:10.11805/TKYDA201806.0931.
- [2] 余少华,何伟. 光纤通信技术发展综述[J]. 中国科学:信息科学,2020(50):1361-1376. (YU Shaohua, HE Wei. An overview of fiber optic communication technology development[J]. Chinese Science:Information Science, 2020(50):1361-1376.) doi:10.1360/SSI-2020-0093.
- [3] WINZER P J. High-spectral-efficiency optical modulation formats[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012,30(24):3824-3835. doi:10.1109/JLT.2012.2212180.
- [4] WILLNER A E, KHALEGHI S, CHITGARHA M R, et al. All-optical signal processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014,32(4):660-680. doi:10.1109/JLT.2013.2287219.
- [5] WEBB R P, DAILEY J M, MANNING R J, et al. Phase discrimination and simultaneous frequency conversion of the orthogonal components of an optical signal by four-wave mixing in an SOA[J]. Optics Express, 2011,19(21):20015-20022.
- [6] ISHIKAWA H, UETAI M, GOTO N. All-optical modulation format conversion between OOK, QPSK, and 8QAM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019,37(16):3925-3931. doi:10.1109/JLT.2019.2918815.
- [7] KISHIKAWA H, SEDDIGHIAN P, GOTO N, et al. All optical modulation format conversion from binary to quadrature phase shift keying using delay line interferometer[C]// IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting. Arlington, VA, USA: IEEE, 2011. doi:10.1109/PHO.2011.6110647.
- [8] MORI K, KISHIKAWA H, GOTO N. Modulation format conversion from QPSK to 16QAM using delay line interferometer and spectral shaping filter[C]// 2016 21st OptoElectronics and Communications Conference(OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching(PS). Niigata, Japan: IEEE, 2016.
- [9] ZHANG Banghong, ZHANG Hongyu, YU Changyuan, et al. An all-optical modulation format conversion for 8QAM based on FWM in HNLF[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013,25(4):327-330. doi:10.1109/LPT.2012.2236547.
- [10] TOTÓVIĆ A R, CRNJANSKI J V, KRSTIĆ M, et al. An efficient semi-analytical method for modeling of traveling-wave and reflective SOAs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014,32(11):2106-2112. doi:10.1109/JLT.2014.2317478.
- [11] LORENCES-Riesgo A, ERIKSSON T A, MAZUR M, et al. Quadrature decomposition of a 20 Gbaud 16-QAM signal into 2×4 -PAM signals[C]// ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication. Dusseldorf, Germany: VDE, 2016.
- [12] 郭显成, 陈坤. DP-QPSK 相干光传输系统性能分析[J]. 信息通信, 2018(4):52-54. (GUO Xiancheng, CHEN Kun. Performance analysis of DP-QPSK coherent optical transmission system[J]. Information Communication, 2018(4):52-54.) doi:CNKI:SUN:HBVD.0.2018-04-021.
- [13] XU Kehang, TANG Jun, LI Yuan, et al. Transmission performance of 112 Gb/s PDM-PAM4 signal over unrepeatable Raman-amplified link[C]// 2018 Asia Communications and Photonics Conference(ACP). Hangzhou, China: IEEE, 2018:1-3. doi:10.1109/ACP.2018.8595982.

作者简介:

林 昭(1996-), 男, 硕士, 主要研究方向为光纤通信硬件系统实现、FPGA 开发 .email:1808748775@qq.com.

冯世杰(1992-), 男, 硕士, 主要研究方向为电子通信、GNSS 导航算法.

王兴财(1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为电子科学技术.