

DOI:10.16136/j.joel.2022.01.0217

偏振复用光通信系统中一种极化交织器

胡伟国, 张建勇*, 王含颖

(北京交通大学 电子信息工程学院 光波技术研究所, 北京 100044)

摘要: 由于高阶调制具有比特相关性, 从而导致极化码在光通信系统中无法有效的进行信道极化。本文提出了一种适用于偏振复用光通信系统的极化交织器。该极化交织器使用一个统一的编码器对系统的信息比特进行极化编码, 再对编码后的序列进行比特交织, 打破了高阶调制的比特相关性, 降低了对极化码信道极化的影响, 提升了通信系统的性能。同时, 对比分析了 2D 和 4D 调制编码方案, 并在解码符号度量计算时加入缩放因子, 提升了系统的误码性能。仿真显示, 信道为加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN) 时, 极化交织方式与传统比特交织编码调制 (bit interleaved coded modulation, BICM) 相比, 在相同的信噪比下误码性能提升了约 1 个数量级, 在加入缩放因子后, 系统的误码性能提升了约 0.5 dB。在偏振复用 16 进制正交幅度调制 (polarization multiplexing 16 quadrature amplitude modulation, DP-16QAM) 相干光通信系统中, 在误码率为 10^{-4} 的情况下, 4D 极化交织方案相比传统 BICM 方案, 性能提升了约 1.3 dB。且在不同偏振模色散 (polarization mode dispersion, PMD) 下, 4D 调制方案对系统 PMD 的容忍度比 2D 调制方案更优。

关键词: 相干光通信; 偏振复用; 极化交织; 缩放因子

中图分类号: TN929 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)01-0098-06

A polarization interleaver in polarization multiplexing optical communication system

HU Weiguo, ZHANG Jianyong*, WANG Hanying

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Due to the bit correlation of high-order modulation, polarization code can not effectively polarize the channel in optical communication system. In this paper, a polarization interleaver for polarization multiplexing optical communication system is proposed. The proposed interleaver uses a unified encoder to encode the information bits of the system, and then interleaves the coded sequence, which breaks the bit correlation of high-order modulation, reduces the impact on the channel polarization of the polarization code, and improves the performance of the communication system. At the same time, the 2D and 4D modulation and coding schemes are compared and analyzed, and the scaling factor is added in the decoding symbol metric calculation to improve the bit error rate (BER) performance of the system. Simulation results show that compared with the traditional bit interleaved coded modulation (BICM), the BER performance of the polarization interleaver is improved by about one order of magnitude when the channel is additive white Gaussian noise (AWGN), and the BER performance of the system is improved by about 0.5 dB when the scaling factor is added. In DP-16QAM coherent optical communication system, the performance of 4D polarization interleaving scheme is improved by about 1.3 dB compared with the traditional BICM scheme when the BER is 10^{-4} . Moreover, the tolerance of 4D modulation scheme to polarization mode dispersion (PMD) is better than that of 2D modulation scheme under different PMD.

Key words: coherent optical communication; polarization multiplexing; polarization interweaving; scaling factor

* E-mail: jyzhang@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2021-04-08 修订日期: 2021-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61671047) 资助项目

1 引言

随着社会信息化的快速发展,人们对光通信系统的规模、传输容量和通信速率的需求越来越高,提高光通信系统的性能和信道容量显得尤为迫切。而且随着传输带宽和传输距离的增加,对光信噪比、色散和光纤非线性要求越来越高。针对这种情况,一种有效的方法是采用高阶调制和信道极化编码相结合,提高频谱利用率,从而提高信息传输速率。目前,应用于光通信系统的纠错码是低密度奇偶校验码(low density parity check codes, LDPC),但其缺点是编码复杂度高,对硬件资源的需求量大,相比而言,极化码具备更优的性能。近年来,众多学者的研究目光也聚焦在极化码的编译码技术发展中。

ARIKAN^[1]首次提出了极化码的设计理论和方案。极化码是理论上第一个达到香农极限的编码方案。它具有规则的编码结构和低复杂度的编解码算法。2016年,在5G增强移动宽带场景编码技术方案中,3GPP选择极化码作为控制信道编码方案。当前,极化码主要应用于无线通信场景,而在光通信领域,也只有少数的应用在光接入网中,所以极化码在光纤通信领域的潜力值得进一步探索。

当前极化码在光通信领域的应用已有若干研究^[2-6],但现有的偏振复用光通信系统并未将两个偏振方向进行统一编码调制处理,没有结合极化现象进行极化编码调制,因此性能较差,对偏振模色散(polarization mode dispersion, PMD)及非线性等系统损伤容忍度较差。本文提出了适用于偏振复用光通信系统的极化交织编码调制方案,将信息比特统一极化编码后按照一定规则交织于两个偏振中进行传输,在信道容量较高的二进制信道之中传输信息比特位,在容量较低的二进制信道中传输冻结比特位,解决了高阶调制比特相关性的问题。同时,提出了2D和4D极化交织方案,并在解码符号度量计算时加入缩放因子,提高了系统误码性能。

2 基于极化交织的偏振复用光通信系统

2.1 极化码编码原理

Arikan提出的极化码的基本理论是基于信道极化现象。 N 个独立的二进制信道被合并和拆分。在这个过程中,每个子信道都会表现出不同的可靠性。

互信息链式法则解释,该过程不会损失信息传输的能力,而是使信道容量发生转移,当码长 N 持续增加且趋近于无穷大时,一部分信道将趋向于容量为1的无误码信道,另一部分信道趋向于纯噪声情况,成为容量为0的信道,从而呈现出信道极化现象。在本文中信道可靠性的衡量是通过蒙特卡洛法实现的,本文选取蒙特卡洛错误数少的 K 个子信道传输信息比特,记子信道下标的集合为 $\mathbf{A}$;剩下的 $N-K$ 个子信道用于传输冻结比特位,记该子信道下标集合记为 $\mathbf{A}_c$,则极化编码可描述为:

$$\mathbf{x} = \mathbf{u}\mathbf{G}_N = \mathbf{u}_A\mathbf{G}_N(\mathbf{A}) \oplus \mathbf{u}_{A_c}\mathbf{G}_N(\mathbf{A}_c), \quad (1)$$

式中,待编码比特矢量 $\mathbf{u}$ 包含了信息比特 $\mathbf{u}_A$ 和具有固定冻结比特值 $\mathbf{u}_{A_c}$, $\mathbf{G}_N = \mathbf{B}_N\mathbf{F}^{\otimes n}$ 为生成矩阵, $\mathbf{B}_N$ 为比特翻转矩阵, $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 为极化码的核心矩阵, $\otimes$ 表示克罗内克积, $n = \log_2 N$ 。

2.2 2D与4D极化交织的DP-16QAM相干光通信系统

基于偏振复用16进制正交幅度调制(polarization multiplexing 16 quadrature amplitude modulation, DP-16QAM)^[7]的相干光通信系统而言,16QAM调制中比特映射成符号后,每个符号有两个偏振,而每个偏振的映射包含两个二进制信道。这两个信道的可靠性不同,在这两个信道中使用相同的码率传输数据将导致信道容量的损失。为了解决高阶调制具有比特不平衡问题^[9],本文提出了2D与4D极化交织^[8]方案。

在2D极化交织方案中,用四个比特位映射成一个符号位,使用2D星座图在比特到符号的映射时只考虑偏振幅度,但是在映射之前先进行比特交织打破比特之间的相关性。首先,按照极化编码原理对信息比特进行统一的极化编码产生新的比特序列 x^N 。在该系统中,对应于 X 偏振的两个二进制信道是 $S_{x,1}^i$ 和 $S_{x,2}^i$;对应于 Y 偏振的两个二进制信道是 $S_{y,1}^i$ 和 $S_{y,2}^i$ 。则交织式如下:

$$\begin{aligned} S_{x,1}^i &= x^{2i-1}, S_{x,2}^i = x^{N/2+2i-1}, S_{y,1}^i = x^{2i}, \\ S_{y,2}^i &= x^{N/2+2i}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $1 \leq i \leq N/2$,然后将交织后的序列通过16QAM调制器映射成符号再送入光纤信道进行传输。

在4D极化交织方案,同时考虑偏振幅度和相位两个变量,采用4D星座图将8个比特位映射成一个符号位。本文提出的基于4D极化交织DP-16QAM系统架构如图1所示,经过极化编码后产生的比特序列 x^N 。对应于 X 偏振的4个二进制信道是 $(S_{x,1}^i, S_{x,2}^i)$ 和 $(S_{x,3}^i, S_{x,4}^i)$;对应于 Y 偏振的4个二进制信道是 $(S_{y,1}^i, S_{y,2}^i)$ 和 $(S_{y,3}^i, S_{y,4}^i)$ 。在本方案中,采用比特

交织器对两个偏振进行联合交织,编码序列映射到两个偏振的二进制信道。交织式如下:

$$\begin{aligned} S_{x,1}^i &= x^{4i-3}, S_{x,2}^i = x^{4i-2}, \\ S_{x,3}^i &= x^{N/2+4i-3}, S_{x,4}^i = x^{N/2+4i-2}, \\ S_{y,1}^i &= x^{4i-1}, S_{y,2}^i = x^{4i}, \end{aligned} \quad (3)$$

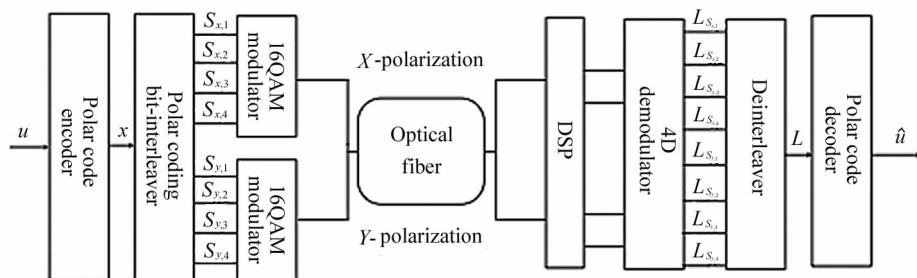


图1 极化交织 DP-16QAM 系统架构

Fig. 1 The architecture of polarization interleaved DP-16QAM system

2.3 符号度量与解交织

信道为加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)时,接收信号可以表示为:

$$y = x + z, \quad (5)$$

式中, y 为接收信号, x 为发射信号, z 为加性高斯白噪声。

假设 z 是均值为零、方差为 δ_z^2 的高斯随机变量,则接收符号的概率可表示为:

$$P_{Y|X}(y|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta^2}} \exp\left(-\frac{|y-x|^2}{2\delta^2}\right). \quad (6)$$

在本文所给出的系统中,将接收端接收的符号包含 m 个比特视为独立的,在2D中 $m=4$,在4D中 $m=8$ 。其解码度量由与后验概率 $P_{B_j|Y}(b|y)$ 的乘积成比例的符号解码度量给出为:

$$q(x, y) = \prod_{j=1}^m q_j(b_j(x), y), \quad (7)$$

$$q_j(b_j(x) = b, y) = P_{Y|X}(y|x), \quad (8)$$

式中, b_j 表示符号 x 第 j 位的比特, $j=1, 2, \dots, m, b=\{0, 1\}$ 。则对数似然比(log-likelihood ratio, LLR)的计算由在第 j 位取0的星座图符号集合 S_0 的符号度量累加和与第 j 位取1的星座图符号集合 S_1 的符号度量累加和比值的对数给出为:

$$LLR_{m(k-1)+j} = \log \left(\frac{\sum_{x_k \in S_0} q_j(b_j(x_k) = 0, y)}{\sum_{x_k \in S_1} q_j(b_j(x_k) = 1, y)} \right), \quad (9)$$

式中, $k=1, 2, \dots, N/m, x_k$ 表示第 k 个符号。

计算出LLR值后再进行解交织,假设二进制信

$$S_{y,3}^i = x^{N/2+4i-1}, S_{y,4}^i = x^{N/2+4i}, \quad (4)$$

式中, $1 \leq i \leq N/4$ 。 N 为8的整数倍, $k=1, 2$ 。式(3)表示 X 偏振的比特交织规则,式(4)表示 Y 偏振的比特交织规则。

交织后的比特序列经过光通信系统后,在接收端进行解调和解交织,具体方式在下一节中描述。

道经过4D解调后输出8位似然比序列: $L_{S_{x,1}}, L_{S_{x,2}}, L_{S_{x,3}}, L_{S_{x,4}}, L_{S_{y,1}}, L_{S_{y,2}}, L_{S_{y,3}}, L_{S_{y,4}}$,解交织式如下:

$$\begin{aligned} L^{4i-3} &= L_{S_{x,1}}^i, L^{4i-2} = L_{S_{x,2}}^i, L^{N/2+4i-3} = L_{S_{x,3}}^i, \\ L^{N/2+4i-2} &= L_{S_{x,4}}^i, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} L^{4i-1} &= L_{S_{y,1}}^i, L^{4i} = L_{S_{y,2}}^i, L^{N/2+4i-1} = L_{S_{y,3}}^i, \\ L^{N/2+4i} &= L_{S_{y,4}}^i. \end{aligned} \quad (11)$$

将序列 L 作为SC(successive cancellation)^[10]译码迭代的初始值,送入译码器中进行译码。

2.4 失配解码和缩放因子

比特交织编码调制(bit interleaved coded modulation, BICM)已经成为通信系统事实上的编码标准。在BICM系统中,根据文献[11]中指出如果符号度量随信道转移概率成比例则视为匹配的解码器,否则视为一个不匹配的解码器。在本文构建的通信系统中,出于降低计算复杂度的考量,解码的符号度量采用的是最大对数近似的方法求解,该系统是一个失配解码系统。

$$LLR_{m(k-1)+j} = \log \left(\frac{\max_{x_k \in S_0} q_j(b_j(x_k) = 0, y)}{\max_{x_k \in S_1} q_j(b_j(x_k) = 1, y)} \right). \quad (12)$$

经典的BICM系统被建模为一组独立的并行二进制输入通道,广义互信息(generalized mutual information, GMI)被用作BICM系统性能的度量,且证明了BICM的广义互信息量I型曲线等于各二进制位I型曲线之和,得出可以通过调整二进制位I型曲线的峰值对齐来增加系统的广义互信息,从而提高BICM的性能^[12]。本文提出的2D和4D极化交

织方案中,通过对解码符号度量计算时添加缩放因子 S ,可以调整二进制位 I 型曲线的对齐,从而提高本系统的解码性能,其计算公式为:

$$LLR_{m(k-1)+j} = \log \left[\frac{\max_{x_k \in S_0} q_j(b_j(x_k) = 0, y)}{\max_{x_k \in S_1} q_j(b_j(x_k) = 1, y)} \right]^S. \quad (13)$$

3 仿真结果与分析

3.1 实验仿真

通过 VPI 仿真平台搭建了基于极化交织的 DP-

16QAM 光纤通信系统如图 2 所示。首先将信息比特用一个统一的编码器进行极化编码,然后再进行比特交织,将经过极化交织后的序列分组,通过激光器和 16QAM 调制器作用,映射成两路垂直偏振传输的光信号,再通过偏振耦合器实现偏振复用后,将光信号发送到光纤中传输,DP-16QAM 系统参数设置如表 1 所示。在接收端首先进行相干解调,再对解调后的信号进行数字信号处理,得到接收符号。接收符号经过软解调、解交织、SC 译码得到译码结果,完成信息的传输。

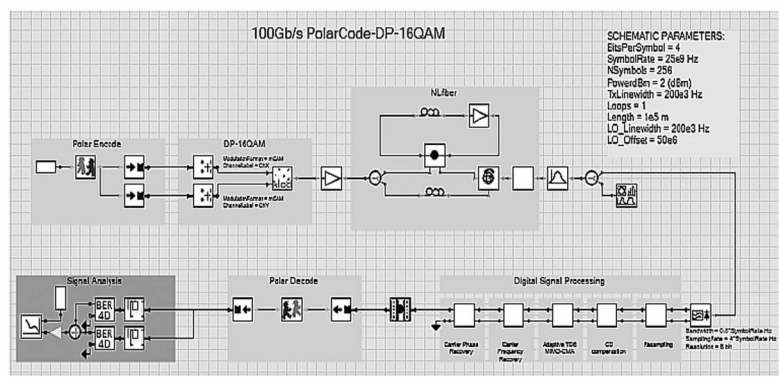


图 2 基于极化交织的 DP-16QAM 光纤通信系统

Fig. 2 DP-16QAM optical fiber communication system based on polarization interleaving

表 1 DP-16QAM 系统参数设置

Tab. 1 Parameters setting of DP-16QAM system

Fiber length /km	Wavelength /nm	Fiber loss /(dB/km)	Dispersion /(ps/nm/km)	PMD /(ps/km ^{1/2})	Nonlinear index /(m ² /W)
1000	1550	0.2	16	0.3	2.6×10 ⁻²⁰

3.2 仿真结果分析

本文对比了传统 BICM^[13,14]、2D 极化交织方案和 4D 极化交织方案等 3 种方法在 AWGN 信道下的误块率(block error rate, BLER)性能,如图 3 所示。首先对 AWGN 信道下的交织算法进行了仿真测试,与传统的 BICM 方案相比,极化交织方案在信噪比为 6 dB 时,误码性能提高了约一个数量级,在相同误码率 10⁻³下,极化交织方案比传统 BICM 性能提升了 0.5 dB。仿真结果充分证明了极化交织方案的优越性。

同时在解码符号度量 LLR 值计算时加入缩放因子 S 得到 2D 和 4D 极化交织与缩放因子的关系如图 4 所示。在 2D 方案中, S 为 0.5 时有 0.5 dB 性能的提升,在 4D 方案中, S 为 1.7 时有 0.5 dB 性能的提升。

进一步在 DP-16QAM 光通信系统中讨论这两种方案,3 种方法在不同光信噪比(optical signal-to-

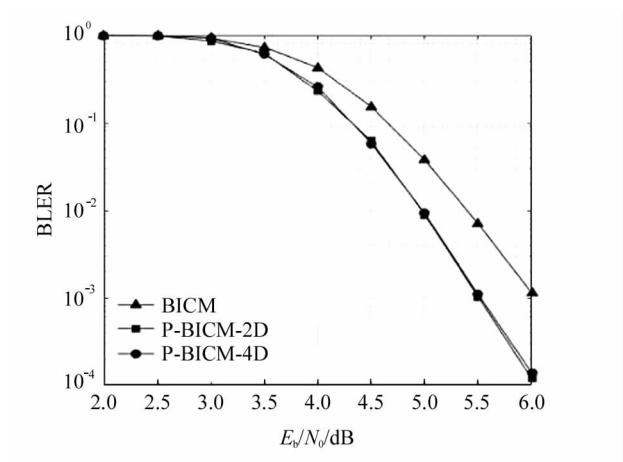


图 3 3 种方法的 AWGN 信道下的 BLER 性能对比

Fig. 3 Comparison of BLER performance of three methods in AWGN channel

noise ratio, OSNR)下的 BER 性能对比如图 5 所示。与传统的 BICM 方案相比,2D 极化交织方案的

性能提高了 1 dB 左右,而 4D 极化交织方案在误码率 10^{-4} 条件下的性能提高了 1.3 dB 左右,可以得出

极化交织方案的有效性。2D 和 4D 在不同 PMD^[15,16] 下的 BER 性能对比如图 6 所示。4D 极化

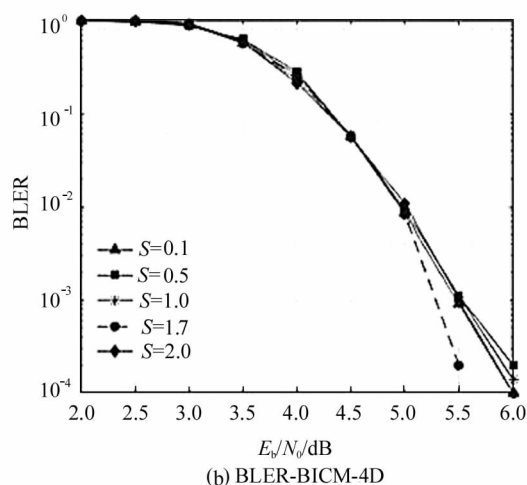
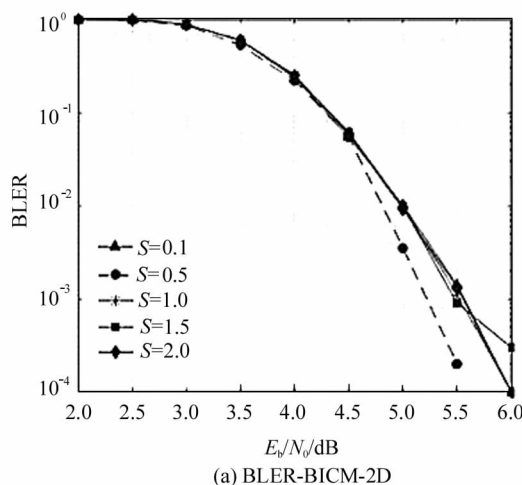


图 4 2D 和 4D 极化交织与缩放因子

Fig. 4 2D and 4D polarization interleaving and scaling factors

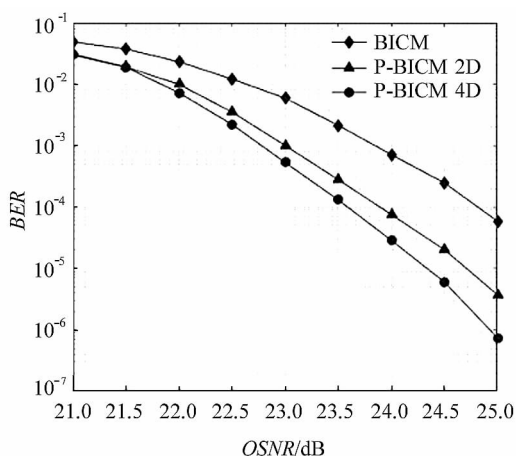


图 5 3 种方法在不同 OSNR 下的 BER 性能对比

Fig. 5 BER performance comparison of three methods under different OSNR

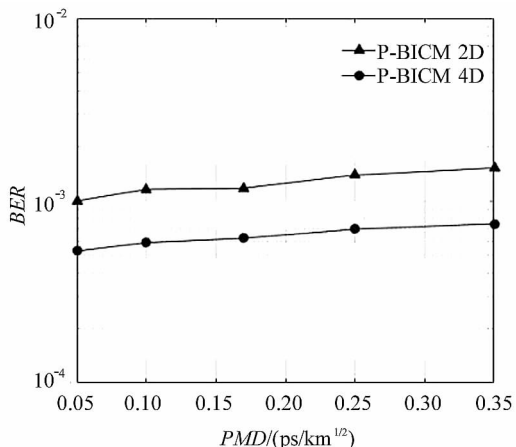


图 6 2D 和 4D 在不同 PMD 下的 BER 性能对比

Fig. 6 Performance comparison of 2D and 4D demodulation methods under different PMD

交织方案在不同 PMD 下的误码率性能均优于 2D 极化交织方案,可以得出 4D 极化交织方案,对系统 PMD 有着更高的容忍度,有利于信号的传输。

4 结 论

本文提出了一种适用于偏振复用光通信系统的极化交织器,并给出了具体的交织方式、解交织方法及符号度量的计算。通过使用一个统一的编码器对信息比特进行极化编码,再进行比特交织,降低了高阶调制比特相关性对信道极化的影响,提升了极化码编码增益。同时,对比分析了 2D 和 4D 极化交织方案,并与传统的 BICM 方式进行了比较。从仿真结果可以得出,信道为 AWGN 时,极化交织方式比传统 BICM 在信噪比为 6 dB 时误码性能提升了约 1 个数量级。在 DP-16QAM 相干光通信系统中,在误码率为 10^{-4} 的情况下,4D 极化交织方案相对于传统 BICM 方案,性能提升了约 1.3 dB。且在不同 PMD 下,4D 方案对系统 PMD 的损伤容忍度对比 2D 解调更优,该方案提高了系统对 PMD 的容忍度和频谱利用率。

参考文献:

- [1] ARIKAN E. Channel Polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051-3073.
- [2] LIU L, XIAO S, BI M, et al. Performance evaluation of

- high-speed polar coded CO-OFDM system with nonlinear and linear impairments[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 1-9.
- [3] LIU B, ZHANG L, XIN X, et al. Robust generalized filter bank multicarrier based optical access system with electrical polar coding[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(5): 1-7.
- [4] LIU L, XIAO S, FANG J, et al. High performance and cost effective CO-OFDM system aided by polar code[J]. Optics Express, 2017, 25(3): 2763-2770.
- [5] ZHANG S Y, SHAHARRAVA B. Polar-coded OFDM with index modulation[J]. IEEE Access, 2021, 9: 237-247.
- [6] ZHENG H T, WU K Q, CHEN B, et al. Experimental demonstration of 9.6 Gbit/s polar coded infrared light communication system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(24): 1539-1542.
- [7] LI W P, KONG M, YU J J. Generation of PDM-16QAM radio frequency signal based on a polarization multiplexing optical modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2306002.
李韦萍, 孔森, 余建军. 基于偏振复用光调制器产生 PDM-16QAM 射频信号[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2306002.
- [8] MAHDAVIFAR H, ELKHAMY M, LEE J, et al. Polar coding for bit-interleaved coded modulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5): 3115-3127.
- [9] IONITA C I, MANSOUR M F, ROH J C, et al. On the design of binary polar codes for high-order modulation[C]// IEEE Global Communications Conference, December 8-12 2014, Austin, TX, USA. New York: IEEE, 2014: 3507-3512.
- [10] XIANG L P, LIU Y, EGILMEZ Z B K, et al. Soft list decoding of polar codes[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 13921-13926.
- [11] Martinez A, Guillen i Fabregas A, Caire G, et al. Bit-interleaved coded modulation revisited: a mismatched decoding perspective[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(6): 2756-2765.
- [12] NGUYEN T T, LAMPE L. Bit-interleaved coded modulation with mismatched decoding metrics[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(2): 437-447.
- [13] CAIRE G, TARICCO G, BIGLIERI E. Bit-interleaved coded modulation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 44(3): 927-946.
- [14] DAI J C, NIU K, SI Z W. Asynchronous polar-coded modulation[C]// IEEE International Symposium on Information Theory, June 21-26, 2020, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2020: 19910674.
- [15] XU W, DUAN G Y, FANG G Q, et al. Analysis of polarization mode dispersion compensation performance for different modulation formats[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(2): 226.
许玮, 段高燕, 方光青, 等. 不同调制格式的偏振模色散补偿性能分析[J]. 光学学报, 2008, 28(2): 226.
- [16] ZHU Q L, CHEN G X. Combined effects of polarization mode dispersion and polarization dependent loss on optical pulse broadening and jittering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(5): 59.
朱巧玲, 陈根祥. 光纤偏振模色散和偏振相关损耗对超短光脉冲传输的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(5): 59.

作者简介:

张建勇 (1977—), 男, 博士, 副教授, 博士、硕士生导师, 主要从事非线性光纤信道、光纤通信、新型特种光纤、光电器件及光纤传感、信道编码等方面的研究。