

基于频谱压缩的斯托克斯空间复用系统

李霞, 张黎杰, 黄斌, 常雪峰, 隋琪*

暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 511486

摘要 在传统的直接检测光通信系统中,色散和光探测器的平方检测相互作用会带来不可避免的性能损失。基于斯托克斯空间复用的直接检测光通信系统,提出通过频谱压缩算法进行发射信号序列相关的相位优化,将三维斯托克斯信号转化为四维带宽为 3/4 的琼斯空间信号,以实现无性能损失、无需额外硬件成本的色散预补偿。鉴于上述理想的频谱压缩方法需要复杂度过高的全局优化算法,提出一种基于查表的简化相位优化算法。仿真结果表明,当优化长度为 7 个符号时,频谱峰值和谷值之间落差约为 17 dB,可有效降低发射机带宽需求。

关键词 光通信; 频谱压缩; 相位优化; 斯托克斯空间复用; 直接检测

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.090602

Stokes Space Multiplexing System Using Spectrum Compression

Li Xia, Zhang Lijie, Huang Bin, Chang Xuefeng, Sui Qi*

Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 511486, China

Abstract In a traditional direct detection (DD) optical communication system, performance loss is inevitably caused by the interaction between dispersion and square-law detection of a photodetector. Based on a DD optical communication system using Stokes space multiplexing, a spectrum compression algorithm is proposed to optimize the phase of a transmitted signal sequence, which transforms a three-dimensional Stokes space signal to a four-dimensional Jones spatial signal with 3/4 bandwidth, thus enabling the dispersion pre-compensation without performance loss and extra hardware cost. Since this ideal spectrum compression requires global optimization algorithm with high complexity, we propose a simplified look-up-table based phase optimization algorithm. Simulation results show that when the optimization length is 7 symbols, the difference between the peak and the valley of the spectrum is about 17 dB, which effectively decreases the bandwidth requirement of the transmitter.

Key words optical communications; spectrum compression; phase optimization; Stokes space multiplexing; direct detection

OCIS codes 060.4510; 070.4790; 060.5060

1 引言

近些年,以因特网为媒介的高清视频和大数据等应用极大地推动了光通信行业的发展。在过去的 20 年中,骨干网光通信系统先后经历了密集波分复用、基于相干检测的偏振复用以及未来的空分复用三次更新迭代。与骨干网相比,短距离互联光网络系统则尚未经以上变革,目前商用短距离互联光网络依然以直调直检系统为主,但色散和光探测器的平方检测相互作用会带来不可避免的性能损失,

使接收信号非线性失真,到目前为止也没有一个完美的解决方案,于是基于斯托克斯接收机的直检系统应运而生。

斯托克斯接收机是可用来实现偏振复用的直接检测系统^[1-4],目前已经提出了三种斯托克斯发射器结构。第一种方案是 2014 年澳大利亚墨尔本大学的 William Shieh 研究组提出的,该方案中发射机的两个偏振态分别由未调制的直流光和经过同相正交调制的信号组成,这等效于二维调制^[5-7]。从理论上讲,这也可以从斯托克斯空间得到解释,在斯托克斯

收稿日期: 2019-12-27; 修回日期: 2020-01-20; 录用日期: 2020-02-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1802300)、国家自然科学基金(61605066,61871408)

* E-mail: sui-qi@hotmail.com

空间中,两个维度被用于调制信号,第三个维度则被用于调制直流光,相当于浪费了一个维度。2015年, David V. Plant 研究组对发射机进行了改进^[8-9],即第二种方案,在一个偏振态上进行强度调制,而在另一个偏振态上进行强度和相位调制,即三维调制。这相当于利用一般的斯托克斯空间对信号进行三维调制和接收,但是无法补偿色散。之后 Plant 研究组又在 2015 年 ECOC 会议的 post deadline 中发表了对该方案进行改进的文章^[10-11],即加入了相邻符号间的差分相位进行信息传输,发射机结构也从三维调制升级成了和相干系统相同的四维调制。这种方案虽然将传输速度提高了 1/3,但是接收机复杂度几乎翻了一倍,接收机的响应度也受到影 响,代价过高。

综合上面的工作,本文提出一种能进行色散预补偿的斯托克斯空间复用系统,通过频谱压缩算法进行相位优化以处理输入信号,在发射端将三维斯托克斯信号转化为四维的带宽为 3/4 的琼斯空间信

号,使得在成本和复杂度不变的情况下,信号在发射机处多了一个维度,进而可以在发射机对色散进行预补偿。本文系统地分析了利用相位优化实现频谱压缩的理论极限,量化了压缩率对性能的影响,设计频谱压缩算法,从而实现了无性能损失、无需额外硬件成本的斯托克斯空间复用系统。

2 斯托克斯空间复用发射机结构

斯托克斯空间复用发射机的传统结构如图 1(a)所示。先利用数字信号处理(DSP)模块将待发送的斯托克斯信号映射到琼斯空间^[12-14],再进行三维调制。加入相位优化的结构会在映射到琼斯空间之前利用斯托克斯信号产生一个优化的相位信息,结合原始的斯托克斯信号进行计算后再将其映射到琼斯空间,并进行四维调制^[15-16],如图 1(b)所示。由于相位信息不会对接收信号的斯托克斯参数产生影响,因此无需对接收机作任何改变,如图 2 所示。

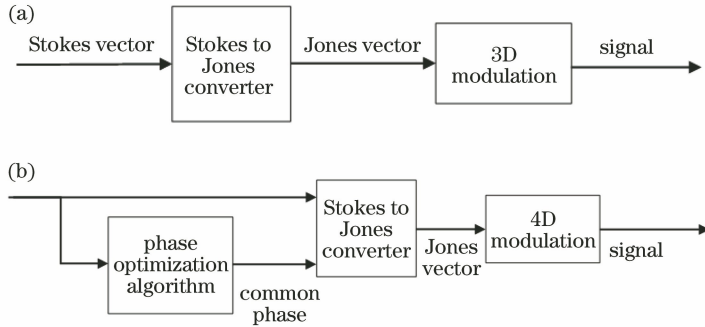
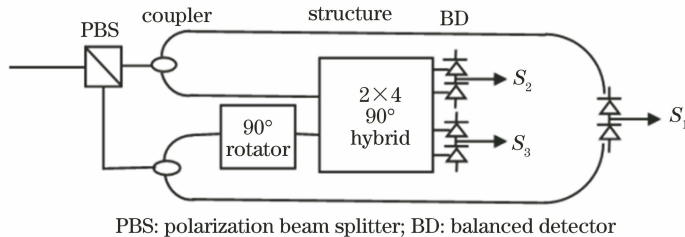


图 1 Stokes 空间复用发射机结构。(a)传统结构;(b)利用相位优化的结构

Fig. 1 Stokes spatial multiplexing transmitter structures. (a) Traditional structure; (b) phase optimization based structure



PBS: polarization beam splitter; BD: balanced detector

图 2 Stokes 接收机结构

Fig. 2 Structures of Stokes receiver

基于频谱压缩的斯托克斯空间复用系统定义了一个伴随信息,这个伴随信息在接收机是无法被检测到的,文中以相位 φ 表示。在这种情况下,使用不可检测的伴随信息来优化接收器的带内信息,其中信号是定义在接收端的,并且相位 φ 取决于斯托克斯空间的信息。此时的接收信号变为四个维度,其中 φ 是一个维度, (S_1, S_2, S_3) 是另外的三个维

度,比传统的接收信号多了一个维度,可以用来补偿色散。通过优化相位 φ 可以实现与色散无关的斯托克斯空间复用系统。

给定在琼斯空间的四维信号:

$$\mathbf{J} = [\mathbf{E}_x \ \mathbf{E}_y]^T, \quad (1)$$

式中: \mathbf{E}_x 、 \mathbf{E}_y 分别为 x 、 y 偏振的电矢量。斯托克斯向量 $\mathbf{S} = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ 定义为^[17]

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_x|^2 + |E_y|^2 \\ |E_x|^2 - |E_y|^2 \\ 2\text{Re}(E_x E_y^*) \\ 2\text{Im}(E_x E_y^*) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:Re 和 Im 分别为变量的实部和虚部;“*”代表复共轭。 S_0 可以表示为 $S_0 = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$, 斯托克斯向量(S_1, S_2, S_3)在三维空间的分布可以通过斯托克斯向量接收机直接检测。将琼斯空间的信号映射到斯托克斯空间,展开琼斯空间的信号并且提取公共相位 φ , 则有

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \exp(j\varphi) \begin{bmatrix} x \\ y + jz \end{bmatrix}, \quad (3)$$

剩余的 x 是大于零的正数,由于公共相位 φ 不影响信号的偏振态,因此斯托克斯空间的(S_1, S_2, S_3)和(3)式右侧的(x, y, z)是一一对应的。给定斯托克斯空间传输信号(S_1, S_2, S_3)时,在琼斯空间中对其进行调制,通过映射关系求解 x, y 和 z , 可得

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{\sqrt{3} + S_1}{2}} \\ \frac{S_2 \sqrt{\sqrt{3} - S_1}}{2} \\ \frac{S_3 \sqrt{\sqrt{3} - S_1}}{2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

(4)式中(x, y, z)被调制到光载波上,即图 1(a)的三维调制。

对于给定的(S_1, S_2, S_3),在(x, y, z)上乘以与调制信号有关的相位 $\varphi(t)$ 。尽管获得的信号是四维的,但是压缩了琼斯空间的频谱并且减小了带宽,带宽变成原来的 3/4。可以认为两个发射机的成本和复杂度是等效的,求解相位 $\varphi(t)$ 相当于等效替换。因为发射机使用了四维调制,可以在发射机处对色散进行预补偿。通过频谱压缩实现了色散无关的斯托克斯空间复用的直调直检系统。

3 频谱压缩的理论性能研究

为了方便理解和实现,这里用有限长度、一倍采样的序列进行说明。信号的功率谱密度(PSD)为

$$|f_m|^2 = |\mathcal{F}[\alpha_m \exp(j\varphi_m)]|^2, \quad (5)$$

式中: α_m 为第 m 个信号; φ_m 为第 m 个信号的相位; f_m 为第 m 个信号的功率谱; \mathcal{F} 代表傅里叶变换。

对于单偏振系统来说,给定一个长度为 N 的序列 $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\}$, 对其进行相位调制,相位调制序列为 $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N\}$, 频谱压缩可以理解为使得

$\{\alpha_1 \exp(j\varphi_1), \alpha_2 \exp(j\varphi_2), \dots, \alpha_N \exp(j\varphi_N)\}$ 的功率谱密度 $\{|f_1|^2, |f_2|^2, \dots, |f_N|^2\}$ 重新分布的过程。对于理想的频谱压缩, $\{|f_1|^2, |f_2|^2, \dots, |f_N|^2\}$ 中应有尽可能多的项等于零,等效于求解 $f_m = 0, 1 \leq m \leq M$ (M 代表压缩频率内的信号长度)的方程组。由于 f_m 为复数, $f_m = 0, 1 \leq m \leq M$ 实际上包含了 $2M$ 个实数方程。保证方程组有解则需要满足 $2M \leq N$, 即不考虑任何限制的情况下,单偏振系统至多将频谱压缩至波特率的一半。

对于双偏振系统的斯托克斯空间复用来讲,令 M 个功率谱密度等于 0 则包含了 $4M$ 个实数方程,对应两个偏振态上的实部和虚部。所以双偏振系统至多将频谱压缩至波特率的 3/4。然而事实上不能保证任何序列都有解,因此实际的求解是找到压缩范围内的频谱功率最小值,但是对于数值较大的 N 来说,该过程比较复杂。为了预估系统的极限性能,初步以局部极小值作为参考,例如对于任意一个序列,随机产生一个初始相位序列,以该相位序列作为起点并利用最陡下降法搜索压缩频率内的功率的最小值,其数学模型可表示为

$$\varphi(t) = \underset{\varphi(t)}{\text{argmin}} \int_{|f| \geq \frac{3}{8T}} |\mathcal{F}\{E(t)\varphi(t)\}|^2 df, \quad (6)$$

式中: $E(t)$ 是通过映射斯托克斯信号而获得的琼斯空间的信号; T 为符号周期。本文实现了相位优化,使得信号在 1/4 频率处有最小的功率,确保带内频率处有最大的功率。

在仿真中,对于斯托克斯空间调制系统, $S_{1/2/3}$ 上使用二进制相移键控(BPSK)调制,令 $N = 1024$, M 从 $N/8$ 增加至 $7N/8$, 每个 M 被随机生成 100 个序列,利用最陡下降法寻找压缩频率内的功率最小值,结果如图 3(a)所示,横轴是压缩比(M/N),纵轴是压缩频率内的功率占信号总功率的比例,即泄漏功率的比例。可见在压缩比大于 1/4 时,泄漏功率开始明显增加,压缩比在 1/4 内时带外功率是可以忽略不计的,符合之前的预期。图 3(b)显示了在压缩比为 1/4 时的平均功率谱密度,频谱被压缩到原来的 3/4。

图 3(c)和图 3(d)是压缩之前和压缩之后滤除带外功率的信号星座图。压缩前后的信号分布基本不变,然而其高复杂性使其不适用于实际系统。

4 相位优化的实现

理想的频谱压缩需要对整个序列进行整体的相

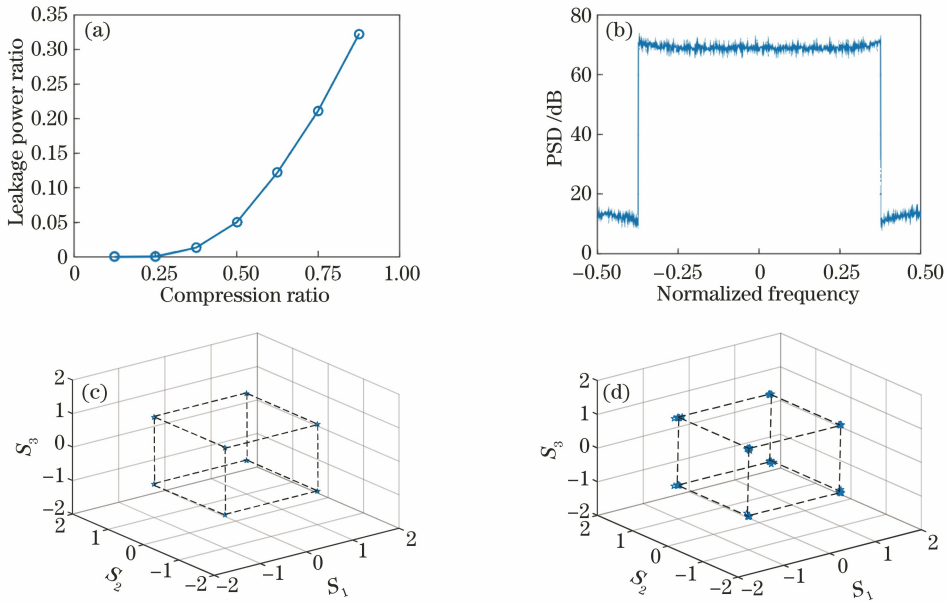


图3 使用最陡下降法获得的光谱压缩结果。(a)泄漏功率比例随压缩比的变化;(b)压缩比为1/4时的平均功率谱密度;压缩(c)之前和(d)之后的信号星座图

Fig. 3 Results of spectral compression obtained using steepest descent method. (a) Leakage power ratio varies with compression ratio; (b) average power spectral density at compression ratio of 1/4; constellation diagrams of signal (c) before and (d) after compression

位优化,但该过程往往复杂度很高且不易实现。频谱压缩中起决定性作用的是小范围内相邻码元之间的相位优化程度,因此,可以通过算法实现针对给定长度内的相位优化,本文采用查表法实现相位优化,具体步骤如下。

1) 建立表格

对于给定的优化长度 L ,先枚举所有长度为 L 的可能的序列,然后对于每种序列,先补零至一定长度 L_N ,再对第 2 至第 L 位以固定的相位步进(如 $2\pi/N_\theta$)穷举所有的相位序列的组合(共 $L_N^{N_\theta}$ 种序列),将所有的相位组合调制到该序列上,并搜寻目标频率范围内功率最小的相位序列。得到的结果可表示为 $\{\alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_L\}$,然后计算 $\{\varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_L\}$,其中 $\varphi_2 = \alpha_2, \varphi_k = \alpha_k - \alpha_{k-1}, 2 \leq k \leq L$ 。这样 φ_k 就代表该序列相位优化时,第 k 位和第 $k-1$ 位的相位差。

尽管穷举所有序列和相位计算量比较大,但该表格一旦建立完成就无需再更改,相位优化算法仅需要存储并调用该表格。

2) 相位优化算法

相位优化算法结构如图 4 所示,其本质上是利用长度为 L 的滑动窗口,根据窗口内的发送序列查表,每一位会出现在 L 个窗口中,该位相对于前一

位的相位差一共会得到 $L-1$ 个查表值,对这 $L-1$ 个查表值进行圆周平均就可以得到最终每一位的优化相位。图 4 中优化长度 $L=4$ 。

加权圆周平均公式为

$$\varphi_1 + \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} [\text{mod}(\varphi_2 - \varphi_1 + \pi, 2\pi) - \pi], \quad (7)$$

式中: φ_1, φ_2 为相位; ω_1, ω_2 分别为相位 φ_1, φ_2 对应的权重。依次计算多个相位的加权圆周平均,将中间结果的权重进行累加,初始权重均为 1。

在计算得到 S_k 与 S_{k+1} 之间的最优相位 φ_{k+1} 后, S_{k+1} 的绝对相位由 S_k 的绝对相位 θ_k 计算得到,即

$$\theta_{k+1} = \text{mod}(\theta_k + \varphi_{k+1}, 2\pi), \quad (8)$$

最后输出为

$$E'_k = \exp(j\theta_{k+1}) E_k, \quad (9)$$

式中: E_k 为由 S_k 直接计算得到的 Jones 空间的电场强度。

在仿真中,令 $L=1024$,对于斯托克斯空间复用系统, $S_{1/2/3}$ 上采用 BPSK 调制,优化后的结果如图 5 所示,其中每条频谱曲线的结果都来源于 500 次仿真结果的平均值。随着 L 的增加,频谱滚降速度逐渐加快,在 $L=7$ 时,频谱峰值和谷值之间相差约 17 dB。该结果表明通过相位优化实现频谱压缩是可行的。

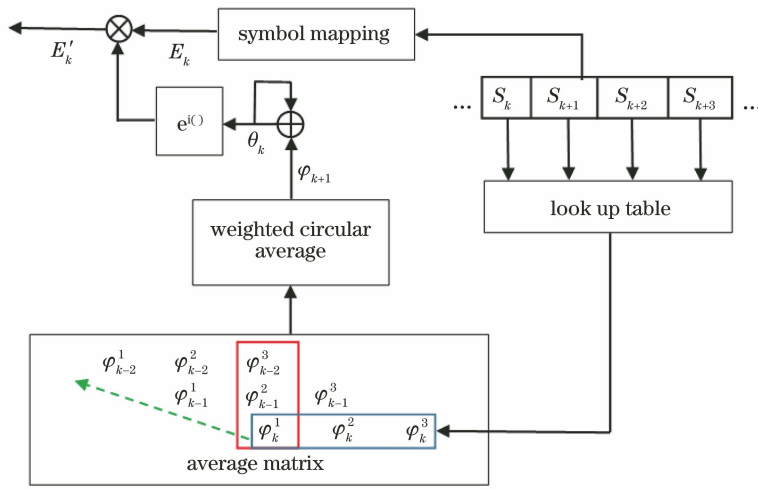


图 4 相位优化算法结构图。虚线箭头代表寄存器移位方向

Fig. 4 Diagram of phase optimization algorithm. Dotted arrow represents shifting direction of register

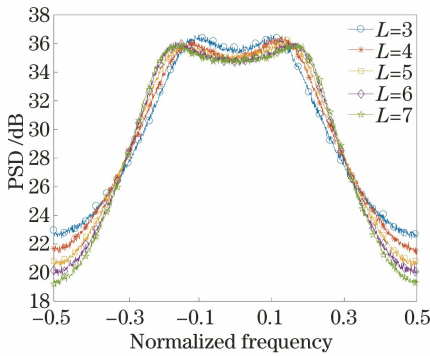


图 5 Stokes 空间复用系统频谱压缩结果

Fig. 5 Stokes spatial multiplexing spectrum compression results

5 结 论

首先分析了斯托克斯空间复用发射机的结构,在信号映射到琼斯空间之前加入相位优化的结构,利用斯托克斯信号产生一个优化的相位信息,结合原始的斯托克斯信号进行计算后,将所得结果映射到琼斯空间进行四维调制。提出一种新的信号定义方法,尽管获得的信号是四维的,但是该方法压缩了琼斯空间的频谱并且减小了带宽,带宽变成原来的 3/4,即该方法通过优化伴随信息实现发射机信号的频谱压缩。通过理论和仿真完成了频谱压缩的理论性能研究,量化了压缩比对性能的影响,优化相位使得信号在 1/4 频率处有最小的功率,确保了带内频率处有最大的功率。文中设计了基于查表的简化的相位优化算法,提出利用相位优化实现频谱压缩的概念,在发射端将三维斯托克斯信号转化为四维的、带宽为 3/4 的琼斯空间信号,信号在发射端多了一个维度,实现了无性能损失、无需额外硬件成本的色散

预补偿。

参 考 文 献

- [1] Che D, Li A, Chen X, et al. Stokes vector direct detection for short-reach optical communication[J]. Optics Letters, 2014, 39(11): 3110-3113.
- [2] Li A, Che D, Chen V, et al. Spectrally efficient optical transmission based on Stokes vector direct detection[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15662-15667.
- [3] Che D, Li A, Chen X, et al. Stokes vector direct detection for linear complex optical channels [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(3): 678-684.
- [4] Che D, Chen X, Li A, et al. Optical direct detection for 100G short reach applications [C] // Asia Communications and Photonics Conference 2014, November 11-14, 2014. Shanghai. Washington, D.C.: OSA, 2014.
- [5] Che D, Li A, Chen X, et al. 160-Gb/s Stokes vector direct detection for short reach optical communication[C] // Optical Fiber Communication Conference: Postdeadline Papers, March 9-13, 2014. San Francisco, California. Washington, D.C.: OSA, 2014.
- [6] Hu Q, Che D, Wang Y F, et al. Advanced modulation formats for high-performance short-reach optical interconnects[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 3245-3259.
- [7] Che D, Li A, Hu Q, et al. Implementing simplified stokes vector receiver for phase diverse direct detection[C] // Optical Fiber Communication

- Conference, March 3, 2015. Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2015.
- [8] Morsy-Osman M, Chagnon M, Plant D V. Polarization division multiplexed intensity, inter polarization phase and inter polarization differential phase modulation with stokes space direct detection for $1\lambda \times 320$ Gb/s 10 km transmission at 8 bits/symbol[C] // 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 27-October 1, 2015. Valencia, Spain. IEEE, 2015.
- [9] Chagnon M, Osman M, Patel D, et al. 1λ , 6 bits/symbol, 280 and 350 Gb/s direct detection transceiver using intensity modulation, polarization multiplexing, and inter-polarization phase modulation[C] // Optical Fiber Communication Conference Post Deadline Papers, March 22-26, 2015, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2015: th5b.2.
- [10] Morsy-Osman M, Chagnon M, Plant D V. Four-dimensional modulation and stokes direct detection of polarization division multiplexed intensities, inter polarization phase and inter polarization differential phase[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(7): 1585-1592.
- [11] Chagnon M, Morsy-Osman M, Patel D, et al. Digital signal processing for dual-polarization intensity and interpolarization phase modulation formats using stokes detection [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 188-195.
- [12] Savory S J. Digital filters for coherent optical receivers[J]. Optics Express, 2008, 16(2): 804-817.
- [13] Savory S J. Digital coherent optical receivers: algorithms and subsystems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(5): 1164-1179.
- [14] Liu X, Chandrasekhar S, Winzer P J. Digital signal processing techniques enabling multi-Tb/s superchannel transmission: an overview of recent advances in DSP-enabled superchannels [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(2): 16-24.
- [15] Winzer P J, Essiambre R J. Advanced modulation formats for high-capacity optical transport networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4711-4728.
- [16] Winzer P J. High-spectral-efficiency optical modulation formats [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3824-3835.
- [17] Shieh W, Che D, Hu Q, et al. Linearization of optical channels with stokes vector direct detection[C] // Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2015: th1e.5.