

灵活速率的高性能改进双波相位共轭技术研究

郭婉桢, 张子恒, 赵建*

(华南理工大学 电子与信息学院, 广州 510641)

摘要:针对传统双波相位共轭(PCTW)非线性补偿方法存在的频谱效率低的问题,尽管改进的PCTW(M-PCTW)方法能够在一定程度上提升频谱效率,但它同时也引入了因误码传播而导致的性能损伤。提出了一种灵活速率的高性能M-PCTW(FH-M-PCTW)方法,通过在相位共轭信号中叠加一个经过纠错编码且速率可变的相位信号,在提升谱效的同时,克服了误码传播问题并提高了谱效调节的灵活性,并在64 GBaud和100 GBaud光纤传输系统中验证其性能。仿真结果表明:FH-M-PCTW方法在保证非线性补偿性能的同时,相比传统PCTW方法,在8阶正交幅度调制(8QAM)和16QAM方式下分别将频谱效率提高了50%和35%。此外,该方法还支持灵活的速率调整,其性能明显优于M-PCTW方法。

关键词:非线性补偿;双波相位共轭;正交振幅调制;前向纠错编码;频谱效率

中图分类号:TN91 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)05-0051-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.05.009

Research on high-performance improved phase-conjugated twin-wave technology with flexible rate

GUO Wanzhen, ZHANG Ziheng, ZHAO Jian*

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Aiming at the issue of low spectral efficiency in traditional phase-conjugate twin-wave (PCTW) based nonlinear compensation methods, although the modified PCTW (M-PCTW) approach can improve spectral efficiency to some extent, it also introduces performance degradation due to error propagation. A flexible-rate high-performance M-PCTW (FH-M-PCTW) method is proposed, which enhances spectral efficiency while overcoming error propagation and improving flexibility in spectral efficiency adjustment by superimposing an error-correction-coded and rate-variable phase signal onto the phase-conjugated signal. The method is validated in both 64 GBaud and 100 GBaud optical fiber transmission systems. Simulation results demonstrate that the FH-M-PCTW method not only ensures nonlinear compensation performance but also improves spectral efficiency by 50% and 35% under 8-ary quadrature amplitude modulation (8QAM) and 16QAM formats, respectively, compared to the conventional PCTW method. Furthermore, the proposed method supports flexible rate adaptation and exhibits significantly better performance than the M-PCTW method.

Key words: nonlinear compensation, phase-conjugated twin-wave, quadrature amplitude modulation, forward error correction, spectral efficiency

收稿日期:2025-01-13。

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2903002)资助;广东省“珠江人才计划”青年拔尖人才项目(2019QN01X165)资助;广东省自然科学基金项目(2024A1515010384)资助。

作者简介:郭婉桢(1997—),女,在读博士。主要研究方向为光纤通信与信号处理,包括光纤非线性补偿算法、时钟同步算法、线性均衡算法等,参与国家重点研发计划、国家自然科学基金、华为等项目,发表SCI论文3篇、会议论文5篇。

***通信作者:**赵建(1980—),男,博士,教授,主要研究方向为光纤与无线光通信。



0 引言

随着移动互联、第五代移动通信技术(5G)网络、云计算服务等技术的迅猛发展,带宽需求急速增长。相干探测、高增益编码、概率整形等新型技术应运而生,以应对光纤骨干通信网络不断提升的扩容需求。但是,光纤克尔非线性这一关键问题始终制约着光传输容量和距离的持续增长,被称为“非线性香农极限”^[1]。到目前为止,已经有了大量关于非线性补偿的研究,包括数字反向传播算法(DBP)^[2]、非线性滤波器^[3]、神经网络^[4]等。DBP通过分步傅里叶法反向求解

非线性薛定谔方程补偿非线性,但是这种方法的复杂度高,不利于实际应用。非线性滤波器的复杂度也随着距离的增加迅速上升。神经网络是一类高性能补偿方法,但是其泛化性还需要深入研究,且需要大量的训练数据。除了接收端非线性补偿外,也可以通过发射端信号的设计抑制非线性效应,例如采用具有优化载波间隔的数字多载波技术^[5]、优化的概率整形序列长度^[6]、多维调制^[7]等。

双波相位共轭(PCTW)技术首次被 LIU X 等人^[8]提出,该方法结合了发射端的信号设计与接收端的非线性补偿。该研究指出,当 x 偏振与 y 偏振信号构成共轭关系时,在光纤传输后两偏振态上的非线性噪声呈现相关性,因而在接收端仅需将 x 偏振信号与 y 偏振的共轭信号简单相加,即可有效消除非线性噪声。该方法具有复杂度低、无需训练数据的特点。其原理已在单载波^[8]、多载波^[9]及模分复用系统中^[10]得到应用,并被广泛验证有效。但是,因为 x 偏振和 y 偏振的信号需要为相位共轭信号,所以相比传统双偏振光传输系统,此系统的频谱效率(SE)降低了一半。为了克服此问题,一些改进的方法被相继提出^[11-14]。文献[12-13]提出一种新型的改进双波相位共轭(M-PCTW)方法,此方法在 x 和 y 偏振的信号互为相位共轭的基础上,在 y 偏振信号上额外叠加了一个调制信号。研究表明,当叠加的信号为相位信号并且当此相位信号在接收端被正确检测时,基于检测出的相位信号处理原有的2个互为相位共轭的信号仍然可以消除非线性噪声,从而保证了非线性补偿性能。相比传统的PCTW方法,叠加的相位信号增加了额外信息,提升了SE。但是,此研究主要基于正交相移键控(QPSK)调制。文献[14]将研究进一步扩展到包括8阶正交幅度调制(8QAM)的高阶调制信号,但是此工作并未对所叠加的相位信号的编解码进行深入研究。当叠加在 y 偏振上的相位信号在检测中出现错误时,此错误会传播到后续检测中,从而降低了整体性能。此外,叠加的相位信号具有有限的比特可调精细度,不利于光传输系统灵活速率的实现。

本文提出一种灵活速率的高性能改进双波相位共轭(FH-M-PCTW)方法,并将此方法应用到8QAM和16QAM光传输系统。

1 FH-M-PCTW 方法原理

在传统PCTW系统中, x 偏振和 y 偏振的调制信号($E_{x,k}$ 和 $E_{y,k}$)被设计为相位共轭信号,即 $E_{y,k} = E_{x,k}^*$,其中

k 表示符号索引。接收端通过将接收到的 x 偏振信号和 y 偏振信号的共轭相加,可在恢复发送信号的同时有效抑制非线性噪声^[8]。该方法虽简单有效,但存在SE较低的问题。为提高SE,可在 $E_{y,k}$ 额外调制一个由比特流 b_i 映射得到的一个相位调制信号 $E_{a,k}$,其中 i 为比特索引。

$$E_{y,k} = E_{x,k}^* \times E_{a,k} \quad (1)$$

在接收端,经过色散补偿、解偏振和相位估计等处理后,可以证明:当信号 $E_{a,k}$ 为相位调制信号时,接收到的 x 偏振和 y 偏振上的非线性噪声($\delta E_{x,k}$ 和 $\delta E_{y,k}$)具有以下关系^[12]:

$$\delta E_{x,k} \times E_{y,k}^* = -\delta E_{y,k} \times E_{x,k} \quad (2)$$

因此,如果首先根据接收信号检测出 $E_{a,k}$,然后再根据检测的 $E_{a,k}$ 联合处理 $E_{x,k}$ 和 $E_{y,k}$,由此获得的 $E_{r,k}$ 仍可以抑制非线性噪声,其表达式为

$$E_{r,k} = E_{x,k} + \delta E_{x,k} + \left((E_{y,k} + \delta E_{y,k}) / E_{a,k} \right)^* = 2E_{x,k} + \delta E_{x,k} + \delta E_{y,k}^* / E_{a,k}^* = 2E_{x,k} \quad (3)$$

其中, $E_{a,k}$ 采用如下的检测方法:

$$E_{est,a,k} = \arg \max_{E_{a,k} \in \Theta} \left[E_{r,x,k} + \left(E_{r,y,k} / E_{a,k} \right)^* \right] \quad (4)$$

其中, $E_{est,a,k}$ 为 $E_{a,k}$ 的估计值, Θ 为 $E_{a,k}$ 可以选择的符号集合, $E_{r,x,k}$ 和 $E_{r,y,k}$ 分别为接收的 $E_{x,k}$ 和 $E_{y,k}$ 。对于8QAM和16QAM, Θ 的最大的元素个数为4。当 Θ 为 $\{1, -1\}$ 时, $E_{a,k}$ 在传统PCTW的基础上增加了1个比特;当 Θ 为 $\{1, j, -j, -1\}$ 时, $E_{a,k}$ 增加了2个比特。

但是,上述方案存在以下问题:1)该推导是在假设 $E_{a,k}$ 已经被正确检测出来的前提下进行。在实际系统中, $E_{a,k}$ 不可避免地会出现错误,从而影响后续 $E_{x,k}$ 的检测;2) $E_{a,k}$ 只能增加有限精细度的比特数,例如1个或2个比特,不利于速率灵活可调光传输系统的实现。

针对上述问题,本文提出了以下改进方案:1)FH-M-PCTW方法的原理图如图1所示。在发射端, $E_{x,k}$ 通过对输入比特流 c_i 进行符号映射而生成。该方法改进的核心在于 y 偏振信号:将用于生成 $E_{a,k}$ 的原始比特流 a_i 首先进行前向纠错(FEC)编码,得到编码后的比特流 b_i ,再将 b_i 映射至 $E_{a,k}$,并根据式(1)得到 $E_{y,k}$ 。在接收端,经相干接收与数字信号处理后,根据式(4)解码获得 b_i ,并经过FEC得到比特流 a_i 。FEC编码不仅提高了 b_i (即 $E_{a,k}$)的检测准确性,还可通过调整编码码率灵活控制SE。因此,将经FEC解码后得到的 $E_{a,k}$ 代入式(3)并解码得到 c_i 时,错误传播问题得到有效缓解。2)除了调节 $E_{a,k}$ 的相位调制阶数外(例如 Θ 采用 $\{1, -1\}$ 或者

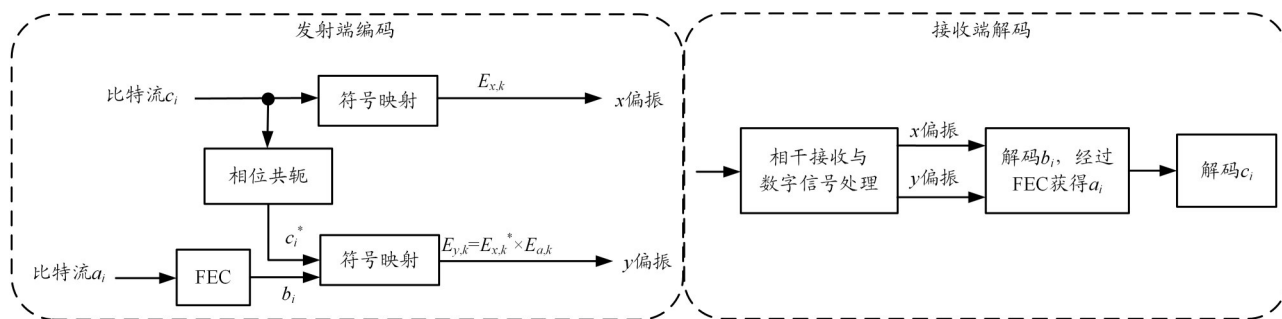
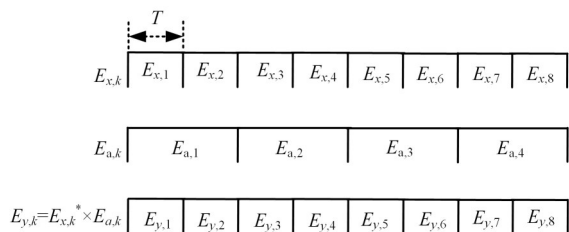


图1 FH-M-PCTW原理图

{1, j, -j, -1}等星座点)外,还可将同一 $E_{a,k}$ 符号与连续多个 $E_{x,k}^*$ 相乘以生成 $E_{y,k}$,从而提高 $E_{a,k}$ 符号率设置的灵活性,具体如图2所示。在此例中,同一个 $E_{a,k}$ 被叠加在2个 $E_{x,k}$ 符号上。在y偏振上,若同一 $E_{a,k}$ 符号与连续2个 $E_{x,k}^*$ 相乘时,则其符号率降低为原来的一半(图中的 T 为符号周期)。类似地,该符号也可与更多连续的 $E_{x,k}^*$ 相乘。实际系统中,可联合调整 $E_{a,k}$ 的调制阶数和符号率,以实现传输速率的灵活配置。

图2 通过改变 $E_{a,k}$ 的符号率调节SE

假设系统的符号率($E_{x,k}$ 和 $E_{y,k}$ 的符号率)为 R_1 , $E_{x,k}$ 或 $E_{y,k}$ 中每个符号中的比特数为 m_1 , $E_{a,k}$ 的符号率为 R_a ,每个符号中的比特数为 m_a ,FEC的开销为 r 。相对于传统双偏振方案,所提方法的归一化SE可以表示为

$$F_{SE} = [(m_1 \times R_1 + m_a \times R_a / (1 + r)) / (2m_1 \times R_1)] \quad (5)$$

由式(5)可知,归一化SE受 m_a 、 R_a 和 r 共同影响。 m_a 和 R_a 的值越大、 r 越小,归一化SE越高。然而, m_a 和 R_a 的增大将导致正确检测 $E_{a,k}$ 所需的信噪比升高,或在相同信噪比下检测准确率下降;而 r 减小则意味着FEC开销降低,纠错的能力随之减弱。因此,在实际系统中,需通过协调这些参数,以在传输性能和频率之间取得平衡。在式(5)中,当 $R_a=0$,归一化SE为0.5,对应传统PCTW方法;而当 $r=0$ 且 $R_a=R_1$ 时,归一化SE为 $(m_1+m_a)/(2m_1)$,对应传统M-PCTW方法。

本文提出的FH-M-PCTW方法在传统M-PCTW的基础上增加了一对FEC编解码器。由于对 $E_{a,k}$ 的编码主要用于抑制错误传播,且在解码 $E_{a,k}$ 后还需进一步用于 $E_{x,k}$ 的解码,因此所选FEC应具备较低的复杂

度和时延。本文采用易于在硬件实现的BCH码和Hamming码,其中BCH码性能更优,将作为主要研究的编码方案。相比传统PCTW,FH-M-PCTW还需通过式(4)实现 $E_{a,k}$ 的检测,该操作仅需2个(当 $m_a=1$)或4个(当 $m_a=2$)除法器、相同数量的加法器以及1个判决器,其复杂度远低于接收端数字信号处理(DSP)中的同步、色散补偿和相位恢复等模块,可忽略不计。与数字反向传输(DBP)等非线性补偿方法相比,本方法无需复杂信号处理,能够在实际应用中更好地兼顾频谱效率、系统性能与实现复杂度。此外,FH-M-PCTW无需改变现有收发信号处理架构,仅需在发射端调制x、y偏振前和接收端信号处理之后嵌入图1的方案,从而具有良好的系统兼容性。

2 仿真分析

2.1 仿真装置

本文在双偏振8QAM和16QAM仿真系统中所提方法进行了验证,信号波特率分别为64 GBaud和100 GBaud,仿真装置如图3所示。其中,收发端DSP由Matlab实现,传输链路基于VPIphotonics Design Suite构建。在发射端,随机比特流根据前述原理映射为双偏振8QAM或16QAM信号,默认采用BCH码作为FEC方案。映射后的信号经过波形成型和50%色散预补偿后,通过数/模转换器(DAC)转换为电信号,并由双偏振同相正交(IQ)调制器调制到光载波上。在64 GBaud和100 GBaud系统中,DAC采样率分别设置为128 GSa/s和200 GSa/s,带宽分别为40 GHz和60 GHz;调制器带宽也相应设置为40 GHz和60 GHz。光纤链路包含 K 个跨段,每段由80 km标准单模光纤(SSMF)、1个掺铒光纤放大器(EDFA)和1个光滤波器组成。光纤参数如下:损耗为0.2 dB/km,非线性系数为 $1.31 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,色散系数为 $17 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。EDFA增益为16 dB,噪声系数为4.5 dB。光滤波器带宽在64 GBaud和100 GBaud系统中分别设为100 GHz和150 GHz。

郭婉桢, 张子恒, 赵建: 灵活速率的高性能改进双波相位共轭技术研究

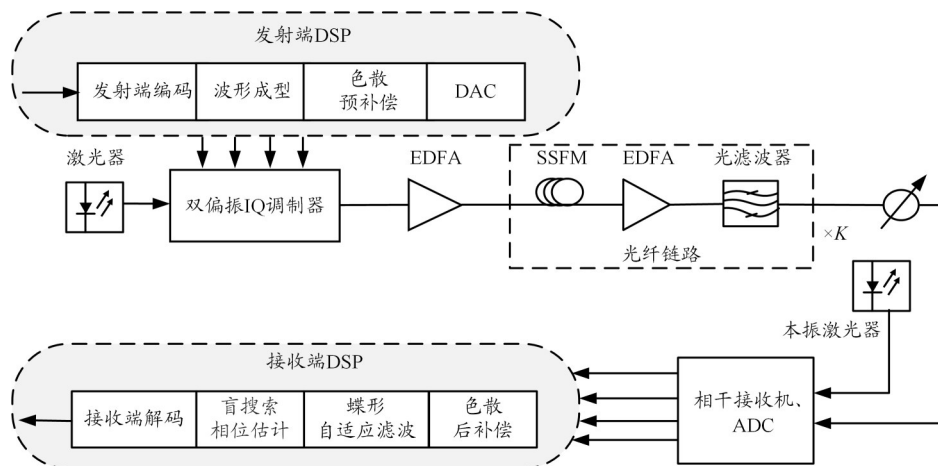


图3 仿真装置图

接收端光信号经相干接收机转换为电信号,并通过模/数转换器(ADC)采样后送入接收端DSP处理。接收机带宽设置为 26 GHz 或 40 GHz。接收端 DSP 流程包括 50% 色散后补偿、多输入多输出蝶形滤波器(基于最小均方算法优化抽头系数)和盲搜索相位估计^[15]。最终, x 和 y 偏振信号根据前述方法进行检测与解码。

2.2 仿真结果

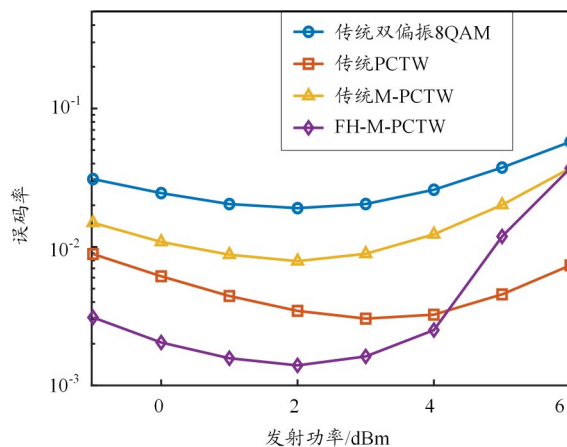
本文在 64 GBaud 8QAM 系统中首先对所提方法进行评。根据定义, $R_1=64$ GBaud, $m_1=3$ 。将 R_a 和 m_a 分别设为 64 GBaud 和 2, 传输距离为 3 200 km, 得到的误码率随发射功率的变化曲线如图 4(a) 所示。其中 FEC 采用 BCH 码, 码长为 16 383, 校验比特个数为 4 907, 该配置下 FH-M-PCTW 的 SE 较传统 PCTW 提高了 46%。可以看出, 所有方法的误码率均随发射功率呈先降后升的趋势。当发射功率较低(小于 2 dBm)时, 噪声占主导地位, 误码率随功率增加而下降; 当功率超过 2 dBm 后, 非线性效应逐渐显著, 导致误码率在达到最低值后转而上升。与传统双偏振 8QAM 相比, 传统 PCTW 显著降低了误码率; 传统 M-PCTW 虽然将 SE 提升了 67%, 但由于 $E_{a,k}$ 的误码较多, 性能反而显著下降。而本文提出的 FH-M-PCTW 在 SE 上虽略低于传统 M-PCTW, 但误码性能得到大幅改善, 尤其在信号发射功率低于 4 dBm 时, 其性能甚至优于传统 PCTW。这主要得益于 $E_{a,k}$ 几乎无误码, 同时 $E_{x,k}$ 的性能与 PCTW 相当, 从而其整体误码率更低。

随后, 本文通过调整 BCH 码的码率以改变 FH-M-PCTW 的 SE。在最优发射功率下, 误码率随归一化 SE(相对于传统双偏振 8QAM 系统)的变化曲线如图 4(b) 所示。可以看出, FH-M-PCTW 能够通过灵活选择 FEC 码率实现 SE 的调节。由于 BCH 码具有较强

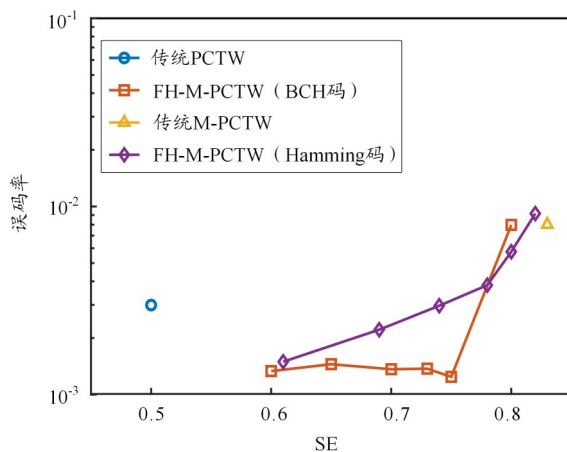
的纠错能力, 采用 BCH 码的 FH-M-PCTW 在性能上优于使用 Hamming 码的方案。具体地, 在采用 BCH 码时, FH-M-PCTW 在保持与传统 PCTW 相当的误码率性能的同时, 可将 SE 提高 50% 以上(归一化 SE 从 0.5 提升至 0.75 以上)。当归一化 SE 处于 0.6~0.75 内时, FH-M-PCTW 的误码性能甚至优于传统 PCTW。这主要得益于 FEC 对 $E_{a,k}$ 的有效保护, 使其误码率极低, 而 $E_{x,k}$ 仍能维持与传统 PCTW 相近的性能, 从而系统整体

误码率得以降低。因此, 在后续研究中, 本文将统一采用 BCH 码作为 FEC 方案。

当 FEC 的码长为 16 383, $m_a=1$, $R_a=64$ GBaud 或



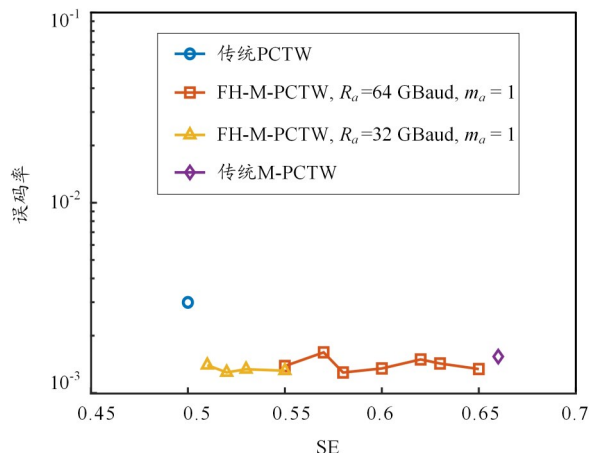
(a) 误码率随发射功率变化曲线



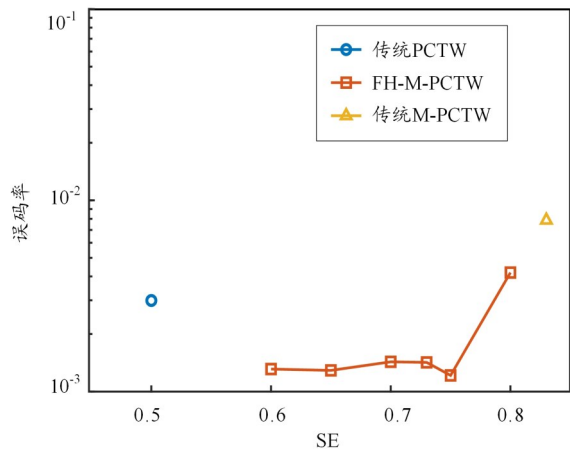
(b) 最优发射功率下, 误码率随归一化 SE 的变化曲线

图4 传输距离为 3 200 km 时, 误码率随着发射功率的变化曲线和在最优发射功率下的误码率随归一化 SE 的变化曲线

32 GBaud时,在最优发射功率下的误码率随归一化SE变化的曲线如图5(a)所示。可以看出,改变 R_a 和 m_a 可以实现更为精细的SE分辨率。当归一化SE为0.5~0.65时,FH-M-PCTW的误码性能均优于传统PCTW与M-PCTW。然后,将FEC的码长由16 383变为1 023,得到的在最优发射功率下的误码率随归一化SE的变化曲线如图5(b)所示。对比图4(b)可知,改变FEC的码长对FH-M-PCTW的误码性能影响较小,本文提出的方法仍然可以在保证性能的前提下将SE提高50%以上(相比传统PCTW,其归一化SE从0.5提升到0.75以上)。



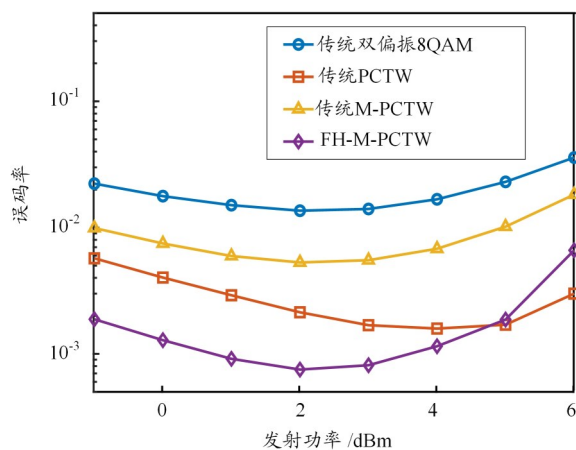
(a) 码长为 16 383



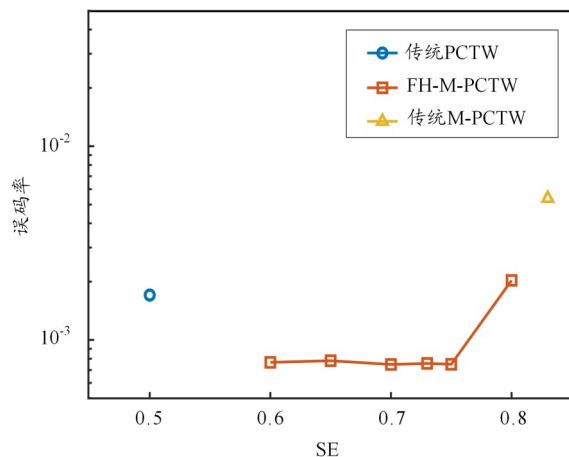
(b) 码长为 1 023

图5 传输距离为 3 200 km时, 最优发射功率下的误码率随归一化SE变化的曲线

当 $m_a=2$ 时,64 GBaud 8QAM系统在传输距离为2 400 km下的性能如图6所示。可以看出,尽管传输距离缩短使所有方案的性能均有所提升,但各方案间的相对关系与图4结论基本一致。具体地,所提出的FH-M-PCTW在保持与传统PCTW相当的非线性容限



(a) 误码率随发射功率的变化曲线

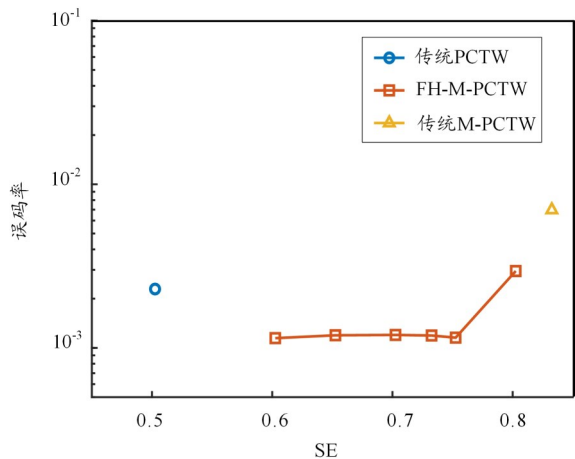


(b) 误码率随归一化SE的变化曲线

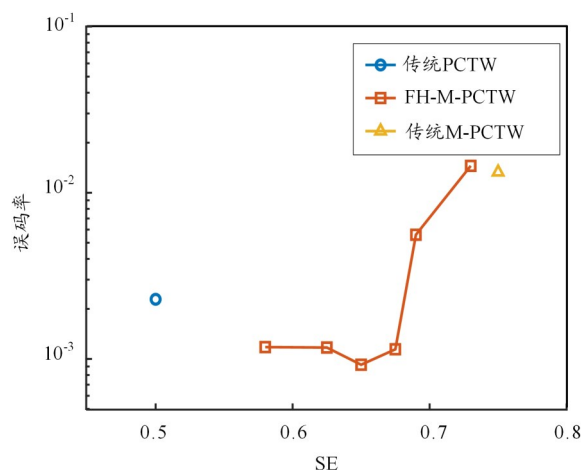
图6 传输距离为 2 400 km时,误码率随着发射功率的变化曲线和 在最优发射功率下的误码率随归一化SE的变化曲线

的同时,将SE提高了50%以上。相较于传统M-PCTW,FH-M-PCTW虽在SE上略有降低,但误码性能显著改善。结果表明,所提方法在较短传输距离下仍保持明显优势。

本文进一步评估了所提方法在不同波特率和调制格式下的性能。当传输距离为2 400 km时,在最优发射功率下误码率随归一化SE的变化曲线如图7所示。可以看出,对于100 GBaud 8QAM,所提出的FH-M-PCTW仍可较传统PCTW将SE提高50%以上。然而,在64 GBaud 16QAM系统中,SE增益则有所下降。由于该系统中 $m_1=4$,当 $m_a=2$ 时,传统M-PCTW的归一化SE从8QAM的 $5/6=0.83$ 降至 $6/8=0.75$,因此FH-M-PCTW的SE上限也相应降至0.75。此外,由于 $E_{a,k}$ 的调制阶数更高、承载比特数更多, $E_{a,k}$ 的错误将引发更多比特错误,从而对整体性能造成更大影响。由图7(b)可知,FH-M-PCTW在保持与传统PCTW相当的非线



(a) 100 GBaud 8QAM 系统



(b) 64 GBaud 16QAM 系统

图7 不同波特率和调制格式下, 最优发射功率时的误码率随归一化SE的变化曲线

性补偿性能的同时, 仍可实现 35% 的 SE 提升(归一化 SE 从 0.5 提高至 0.675 以上)。

3 结束语

本文提出了一种 FH-M-PCTW 方法。该方法通过对叠加相位调制信号 $E_{a,k}$ 进行 FEC 编码, 并将其加载至 y 偏振方向, 同时灵活调整 $E_{a,k}$ 的符号率, 有效抑制了误码传播, 提升了系统的 SE 及其调节灵活性。基于 64 GBaud 和 100 GBaud 光纤传输仿真系统, 本文研究了 FEC 码率与码长、叠加信号符号率、传输距离、波特率及调制格式对系统性能的影响。实验结果表明: 所提出的 FH-M-PCTW 方法在保持与传统 PCTW 相当的非线性补偿性能的同时, 在 8QAM 和 16QAM 系统中分别实现了 50% 和 35% 的频谱效率提升, 并具

备更灵活的速率调节能力, 其性能显著优于传统的 M-PCTW 方法。

参考文献

- [1] ELLIS A D, ZHAO JIAN, COTTER D. Approaching the non-linear Shannon limit[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 423–433.
- [2] YI X W, HUANG X T, ZHANG J, et al. Imbalance digital back-propagation for nonlinear optical fiber transmissions[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(14): 4622–4628.
- [3] LIU X, LIU Y H U C J, et al. Experimental demonstration of low-complexity trigonometric-memory-polynomial decision-feed-back equalizer for nonlinear compensation in IM/DD optical systems[J]. Optics Express, 2024, 32(3): 3329–3341.
- [4] MING H, CHEN X Y, FANG X S, et al. Ultralow complexity long short-term memory network for fiber nonlinearity mitigation in coherent optical communication systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(8): 2427–2434.
- [5] LOWERY A J, DU L B Y. XPM efficiency versus symbol rate[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(9): 2850–2861.
- [6] FEHENBERGER T, MILLAR D S, KOIKE-AKINO T, et al. Analysis of nonlinear fiber interactions for finite-length constant-composition sequences[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(2): 457–465.
- [7] RABBANI H, AYAZ M, BEYGI L, et al. Analytical modeling of nonlinear fiber propagation for four dimensional symmetric constellations[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(9): 2704–2713.
- [8] LIU X, CHRAPLYVY A R, WINZER P J, et al. Phase-conjugated twin waves for communication beyond the Kerr nonlinearity limit[J]. Nature Photonics, 2013, 7(7): 560–568.
- [9] HUSAIN S S, HMOOD J K, HARUN S W. Efficiency enhancement of phase-conjugated twin waves technique by shaping envelopes of subcarriers in all-optical OFDM systems[J]. Optics Communications, 2020, 472: 125864-1–125864-9.
- [10] HMOOD J K, RADHI S S. Influence of physical dimensions on efficiency of phase-conjugated twin waves in coherent optical communication systems[J]. Optics Communications, 2018, 428: 113–119.
- [11] LE S T, MCCARTHY M E, SUIBHNE N M, et al. Demonstration of phase-conjugated subcarrier coding for fiber nonlinearity compensation in CO-OFDM transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(11): 2206–2212.
- [12] YUKUI Y, JIAN Z. Modified phase-conjugate twin wave schemes for fiber nonlinearity mitigation[J]. Optics Express, 2015, 23(23): 30399–30413.
- [13] YUKUI Y, DENG N, JIA W, et al. Comparison of polarization-switched QPSK and modified phase conjugated twin waves in long-haul links [C]//Optical Fiber Communications Conference, March 20–22, 2016, Anaheim, USA. Washington: Optica Publishing Group, 2016: 1–3.
- [14] TONG X G, WEI H, WEIWEI C, et al. Nonlinearity-tolerant transmission using modified phase-conjugate twin wave for M-PSK signals[EB/OL]. (2024-1-16) [2025-01-13]. <http://www.creder.com/news/20011219/200112190019.html>.
- [15] ZIHENG Z, WANZHEN G, JIATING L, et al. A robust timing recovery algorithm with enhanced DPLL performance for Nyquist digital multi-band optical systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(1): 29–41.