

基于 SV-DD 接收机的简化无中继光纤传输系统

李欣¹, 智远¹, 徐健², 龙函^{2*}, 孙淑娟², 余磊², 易祥²

(1. 国家电网公司西北分部, 西安 710048; 2. 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430205)

摘要: 随着无中继光纤传输系统的广泛应用, 其复杂度与成本成为需要考虑的因素。提出了一种简化的无中继传输系统, 采用斯托克斯矢量-直接检测(SV-DD)代替相干接收机。仿真研究了单波与三波复用情况下的 128 Gb/s 16QAM 信号传输系统性能。仿真结果表明: 该系统能够很好地将信号解调出来, 前向与后向喇曼泵浦在功率为 0.6 W 和 0.8 W 情况下性能较好, 能够承受约 $400 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1}$ 的残余色散。

关键词: 斯托克斯矢量; 无中继; 光纤通信; 喇曼放大; 单模光纤

中图分类号: TN256 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)06-0020-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.06.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simplified unrepeated optical fiber transmission system based on SV-DD receiver

LI Xin¹, ZHI Yuan¹, XU Jian², LONG Han^{2*}, SUN Shujuan², YU Lei², YI Xiang²

(1. Northwest Branch of State Grid, Xi'an 710048, China; 2. Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan 430405, China)

Abstract: With the wide application of repeatless optical fiber transmission system, its complexity and cost become factors to be considered. A simplified transmission system without relay is proposed, in which Stokes vector direct detection (SV-DD) is used instead of coherent receiver. The performance of 128 Gb/s 16QAM signal transmission system with single wave and three wave multiplexing is simulated. The simulation results show that the system can demodulate the signal well, and the performance of forward and backward Raman pump is better when the power is 0.6 W and 0.8 W, and it can withstand the residual dispersion of about $400 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1}$.

Key words: Stokes vector; unrepeated; optical fiber communication; Raman amplifier; single mode fiber

0 引言

随着现代社会信息化程度的不断提高, 信息网络覆盖范围也变得越来越广。但在原始森林、沙漠以及岛屿等特殊地理环境下, 由于输电线路的建设和维护难度较大, 使得这些地区的网络建设一直停滞不前。为了给这些偏远地区提供高速的网络服务, 近年来, 研究人员提出了无中继光纤传输系统^[1-5]。无中继光纤传输系统以其在链路中间不需要额外增加有源中继设备而得名。因此, 该系统能够较为方便地铺设传输

收稿日期: 2019-10-08。

作者简介: 李欣(1976—), 男, 本科, 高级工程师, 长期从事电力信息、通信系统建设运行管理, 完成多项网络、信息安全及业务应用系统, 以及西北电网陕甘光环网改造、陕北-宁夏超长距光传输系统建设等重点通信工程建设工作。

* 通信作者: 龙函(E-mail: longhan106@163.com)。



链路。在仅使用掺铒光纤放大器(EDFA)情况下, 文献[2]证明了基于 4 通道 400 Gb/s 的无中继传输系统的可行性。在 349 km 喇曼放大链路上, 文献[3]实现了实时处理的 24 Tb/s 无中继 C 波段传输。文献[4]使用喇曼放大、远程增益单元和大有有效面积光纤, 演示了一个单载波 400 Gb/s 的无中继波分复用(WDM)传输系统, 其传输距离长度超过 403 km。为了提高无中继光纤传输系统的整体性能, 以上提及的各系统大多采用成熟但昂贵的相干接收技术。此外, 复杂的喇曼放大技术以及新型超低损光纤的应用也直接增加了系统成本。因此, 如何控制总成本将是未来无中继系统的一个研究重点。

近年来, 有学者在短距离光纤通信系统中提出了很多降低系统成本的方案^[6-8]。其中, 部分技术可作为参考方案, 用于降低无中继系统的系统成本。文献[6]提出一种斯托克斯矢量-直接探测(SV-DD)的方法,

在160 Gb/s 正交频分复用(OFDM)信号传输中验证了该方案的可行性。文献[7]结合 SV-DD 和 Kramers-Kronig 检测,在 80 km 标准单模光纤(SSMF)上实现了 480 Gb/s 偏振复用-16 正交幅度调制 (PDM-16QAM) 的传输。文献[8]作者提出了一种简化的接收方式,实现了 2 个偏振复用-强度调制/直接探测 (PDM-IM/DD)系统的复用与解复用。但是,这几种方案虽然在降低系统成本方面有显著优势,但其传输距离一般都在 100 km 以下。

因此,本文提出一种基于 SV-DD 接收机的简化无中继光纤传输系统方案,以实现 128 Gb/s 16QAM 信号的无中继传输。

1 基于 SV-DD 接收机的系统原理及仿真

本文使用 VPI transmission Maker™ 软件对 3×128 Gb/s 16QAM 信号的无中继传输 SV-DD 接收机进行了仿真研究,其仿真系统如图 1 所示。在发射端,外腔激光器(ECL)产生光载波,经过一个偏振分束器将光载波分为 2 束光功率相等且偏振态正交的 2 路光:一路光信号经过 IQ 调制器后将 3×128 Gb/s 16QAM 信号调制到光载波上;另一路经过一个光可调衰减器 1 与调制后的光信号在偏振合束器处合成为一束光。此处,光可调衰减器 1 用于平衡 2 路光信号之间的功率。单波长系统的光载波波长分别设置为 1553.6 nm;三波复用系统的光载波波长分别设置为 1552.8 nm、1553.6 nm 和 1554.4 nm,合成信号的光谱分别对应于 CH1、CH2 和 CH3,其光谱图如图 1 中插图所示。每个载波之间间隔为 100 GHz,波分复用器将发送端各载波光信号复用在一起并合成 3×128 Gb/s 16QAM 信号。波分复用后的光信号经过一段色散补偿光纤经

EDFA 放大后与 1450 nm 的喇曼泵浦光源复用在一起注入到光纤链路中。此处的光纤采用 SSMF,其损耗为 0.2 dB/km,二阶色散为 $16 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}^{-1}$,偏振模色散设置为 $0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$,有效面积约为 $72 \text{ } \mu\text{m}^2$,喇曼峰值增益约为 $0.72 \text{ W} \cdot \text{km}$ 。在光纤的另一端,后向 1450 nm 喇曼泵浦光源通过一个波分复用器耦合到光纤中。在接收端,光信号经过一个波分解复用器将各波长信号滤出来,然后经过 EDFA 后将光信号注入到 SV-DD 接收机。SV-DD 接收机由 1 个偏振分束器、2 个光可调衰减器、2 个光电探测器、1 个 90° 偏振旋转器、1 个 90° 光学混频器和 2 个平衡探测器构成。

SV-DD 接收机中的光可调衰减器用于平衡各路之间的功率,使得最后得到的电信号满足 Stokes 关系,经过离线数字信号处理(DSP)在 Matlab 中将数据恢复出来。详细的离线算法大致可以分为以下几个步骤:①重采样。此处将信号重新采样为 4 倍过采样。②信号幅度归一化。以信号的总功率为标准对各路信号做归一化处理。③信号下采样。采用 Gardner 算法将 4 倍采样数据下采样到 1 倍。④偏振追踪。基于训练序列方法对接收到的信号进行解调。⑤判决与误码率计算。其中最为核心的算法为偏振追踪,其实现过程如下:

接收端信号输入到 SV-DD 接收机,经过偏振分束器将信号分成 E_x 与 E_y ,根据文献[6],最后得到的电信号为:

$$\begin{aligned} I_0 &= \alpha |E_x|^2 \\ I_1 &= \beta \text{Re}(E_x E_y^*) \\ I_2 &= \gamma \text{Im}(E_x E_y^*) \\ I_3 &= \eta |E_y|^2 \end{aligned} \quad (1)$$

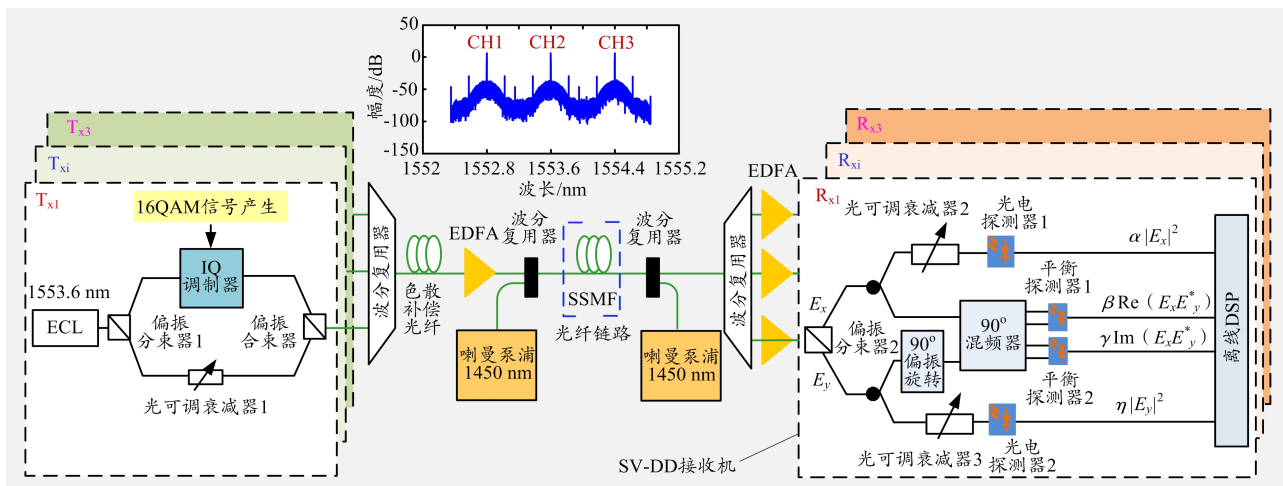


图 1 基于 SV-DD 接收机的 3×128 Gb/s 16-QAM 无中继传输系统仿真系统图

其中, α 、 β 、 γ 和 η 是由耦合器分光比以及光电探测器响应决定的参数; I_0 、 I_1 、 I_2 和 I_3 分别表示接收端电信号。假设发送端偏振合束器的主轴与接收端偏振分束器的主轴对齐,则发送端信号可以直接由式(1)得到。例如,当发送端信号为强度调制时, I_0 即可解调出发送端信号;当发送端信号为 QAM 时, I_1 即为发送端信号实部, I_2 即为发送端信号虚部。但是,经光纤传输后,光信号的偏振状态会发生随机扰动。因此,需要相应方法对偏振随机扰动进行跟踪。适当调整 α 、 β 、 γ 和 η 的值,同时经过处理,可得到以下关系:

$$\begin{aligned} S'_1 &= |E_x|^2 - |E_y|^2 \\ S'_2 &= 2\text{Re}(E_x E_y^*) \\ S'_3 &= 2\text{Im}(E_x E_y^*) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中, S'_1 、 S'_2 和 S'_3 为接收端 Stokes 矢量。一般情况下,Stokes 矢量的偏振变化由 Muller 矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, S_1 、 S_2 和 S_3 为发送端信号 Stokes 矢量; M 为表示传输过程的 Stokes 矩阵; m_{ij} 表示 M 矩阵的元素; i 和 j 取值为 $\{1, 2, 3\}$ 。因此,只需将矩阵 M 计算出来即可实现偏振态追踪,进而通过式(1)将发送端信号解调出来。此处, M 矩阵可以通过训练序列方法估计出来,即在已知部分 S_1 、 S_2 和 S_3 情况下,结合接收到的 S'_1 、 S'_2 和 S'_3 将 M 矩阵训练出来。

2 仿真结果与性能分析

2.1 单波长系统

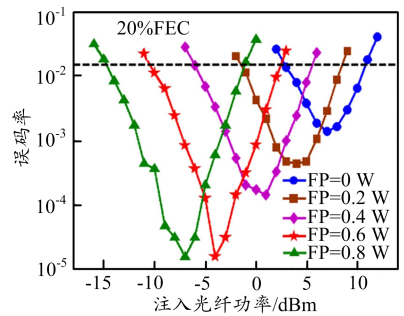
无中继系统中单波长 128 Gb/s 16QAM 信号传输结果如图 2 所示。图中 FP 表示前向喇曼泵浦功率; BP 表示后向喇曼泵浦功率。图 2(a)中固定后向喇曼泵浦功率为 0.8 W, 传输距离为 200 km, 链路的色散值由色散补偿光纤完全补偿。可以看出,随着注入光纤功率的不断增大,系统的误码率先变小,然后由于科尔非线性效应增强,系统的误码率又进一步增加。此外,随着前向喇曼泵浦功率不断增大,系统最佳注入功率点慢慢变小,最佳注入功率下的性能也在慢慢变好。在没有前向喇曼泵浦情况下,系统的性能最差,前向喇曼泵浦功率增加到 0.6 W 时,系统性能基本上不会有很大的提升。因此,在后续的结果中,取前向喇曼泵

浦值为 0.6 W。从图 2(b)中可看出,随着后向喇曼泵浦的增加,在 20% 前向纠错码(FEC)参考值下,系统可传输的距离在不断提高。当后向喇曼泵浦增加到 2.5 W 时,系统可传输距离最远。继续增加功率到 3 W 时,系统性能开始下降。这是因为随着后向喇曼泵浦提高,信号光、泵浦光与信号光之间的非线性效应增强并直接影响了系统性能。因此,后向喇曼泵浦功率的增大对系统的影响比较有限,最大可提升传输距离小于 10%。在后续仿真中,后向喇曼泵浦功率可选取较为常用的 0.8 W。

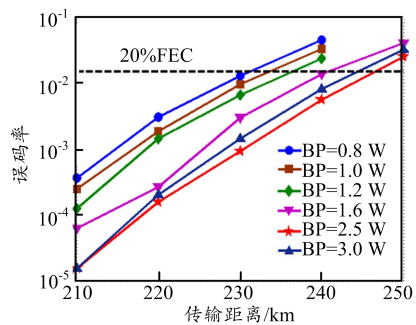
由于 SV-DD 接收方案不能像相干接收那样用 DSP 的方式补偿色散,因此本文使用了色散补偿光纤对系统色散进行补偿,残余色散将成为一个必须考虑的问题。设置前向喇曼泵浦功率为 0.6 W,后向喇曼泵浦功率为 0.8 W,传输距离为 200 km。本文给出了所用算法在不同色散值情况下的系统误码率性能。单波长 SV-DD 无中继系统中残余色散与误码率之间的关系如图 3 所示,色散对本方案的影响较大。其主要原因在于随着色散的增加,传输信号脉冲发生形变,使得算法不能完全采样到最佳采样点。同时,信号之间也存在串扰,直接影响了系统性能。以 20% FEC 为参考,配合所使用的算法,本方案可承受的残余色散范围为: $-400 \sim 400 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1}$, 该值相当于 SSMF 25 km 的色散值。

2.2 三波复用系统

为了研究 WDM 系统中本文所提方案的性能,在单波长系统基础上研究三波复用的系统,其结果如图 4 所示。图 4(a)为注入不同光纤功率下,单波长系统与三波长复用系统的性能比较图。此时,系统的前向和



(a) 不同 FP 情况下, 注入光纤功率与误码率之间的关系



(b) 不同 BP 情况下, 传输距离与误码率之间的关系。

图 2 单波长 SV-DD 无中继系统中

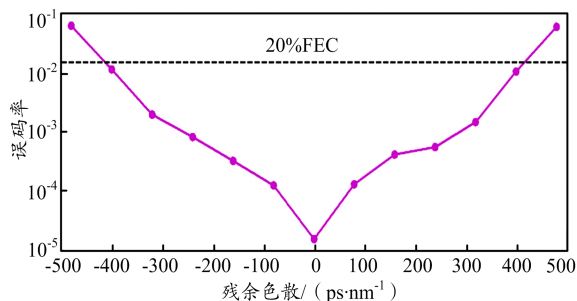


图3 单波长 SV-DD 无中继系统中残余色散与误码率之间的关系

后向喇曼泵浦功率分别设置为 0.6 W 和 0.8 W, 传输距离为 200 km。可以看出, 三波复用系统的各波长性能基本一致, 其中第二个波长的性能偏差, 这是因为第二个波长受到来自另外 2 个波长光信号的交叉相位调制效应最强。此外, 单波长传输系统的最佳功率点在 -4 dBm, 而三波复用系统的最佳入纤功率为 1 dBm 左右。如果考虑三波复用系统每个波长的平均功率, 则其最佳注入光纤功率点基本上与单波系统差不多。图4(b)为不同后向泵浦功率情况下传输距离与误码率之间的关系。此时, 前向与后向喇曼泵浦功率分别设置为 0.6 W 和 0.8 W, 注入光纤功率设置为图 4(a)中的最佳功率点。由图 4(b)可以看出, 在 20% FEC 条件下, 单波系统与三波复用系统的性能基本无差异。

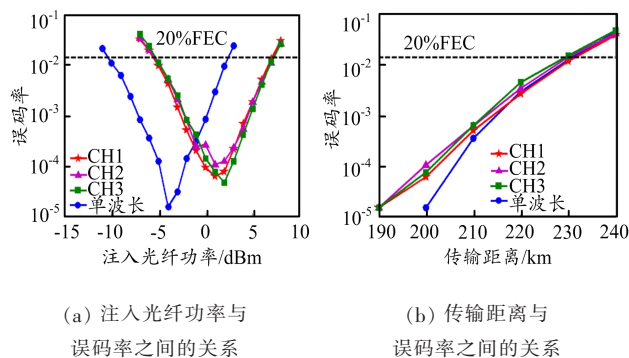


图4 单波长与三波复用 SV-DD 接收无中继系统的关系

3 结束语

本文针对无中继传输系统中系统复杂度越来越高的特点, 提出了一种基于 SV-DD 接收机的简化无中继光纤传输系统方案。在接收机方面, SV-DD 系统不需要本振光源; 在算法方面, 本方案不需要载波恢复算法。此外, 本文分别研究了在单波长传输情况下

喇曼泵浦功率和残余色散对系统性能影响, 并分析了单波长与三波复用系统的性能。仿真结果表明: 前向喇曼泵浦与后向喇曼泵浦在功率分别为 0.6 W 和 0.8 W 情况下, 系统性能即可达到较优水平; 虽然继续增大前向泵浦能够在一定程度上降低发送端注入光纤的功率, 但对系统的性能影响有限; 增大后向泵浦的功率也仅能提高小于 10% 的系统传输距离。此外, 离线 DSP 算法能够承受 SSMF 约为 25 km 的色散值, 且多波复用系统与单波系统性能基本一致。因此, 本文方案能够一定程度上降低接收端的硬件及算法复杂度, 从而达到降低整个系统成本的目的。

参考文献:

- [1] 项旻, 王伟, 张瑞强, 等. 遥泵系统无中继超长跨距传输的研究[J]. 光通信技术, 2016, 40: 19-21.
- [2] ZHANG Junwen, YU Jianjun, CHIEN Hungchang. 1.6 Tb/s (4×400G) Unrepeated Transmission over 205-km SSMF Using 65-GBaud PDM-16QAM with Joint LUT Pre-Distortion and Post DBP Nonlinearity Compensation [C]// Optical Fiber Communication Conference 2017 (OFC2017), March 19-23, 2017, Los Angeles, United States. Washington: OSA, 2017: Th2A.51-1-Th2A.51-3.
- [3] BISSESSUR H, BASTIDE C, ETIENNE S, et al. 24 Tb/s unrepeated C-band transmission of real-time processed 200 Gb/s PDM-16-QAM over 349 km [C]// Optical Fiber Communication Conference 2017 (OFC2017), March 19-23, 2017, Los Angeles, United States. Washington: OSA, 2017: Th4D.2-1-Th4D.2-3.
- [4] JANUÁRIO J C S S, ROSSI S M, JOSE H C, et al. Unrepeated WDM transmission of single-carrier 400G (66-GBd PDM-16QAM) over 403 km [C]// Optical Fiber Communication Conference 2017 (OFC2017), March 19-23, 2017, Los Angeles, United States. Washington: OSA, 2017: Th4D.1-1-Th4D.1-3.
- [5] KEHANG XU, HONG ZHANG, QIN JING, et al. Transmission Performance of 5 × 112-Gb/s Super-Nyquist PDM-QPSK over Unrepeated Raman-amplified Link [C]// Asia Communications and Photonics Conference 2017 (ACP2017), November 10-13, 2017, Guangzhou, China. Washington: OSA, 2017: Su2A.35-1-Su2A.35-3.
- [6] DI CHE, AN LI, XI CHEN, et al. Stokes Vector Direct Detection for Linear Complex Optical Channels [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015(33): 678-684.
- [7] HOANG T M, SOWAILEM M Y S, ZHUGE Q, et al. Single wavelength 480 Gb/s direct detection over 80km SSMF enabled by Stokes vector Kramers Kronig transceiver [J]. Opt. Express, 2017(25): 33534-33542.
- [8] PAN Y, YAN L, YI A, et al. Cost-effective Demultiplexing Scheme for Two PDM-PAM4 Joint IM/DD Links Utilizing Stokes Receiver [C]// Conference on Lasers and Electro-Optics 2018 (CLEO2018), May 13-18, 2018, San Jose, United States. Washington: OSA, 2018: JTu2A.48-1-JTu2A.48-2.