

频偏条件下的低复杂度主从载波盲相位搜索算法

瞿思炜, 杨彦甫*, 向前, 张群

哈尔滨工业大学(深圳)电子信息与工程学院, 广东 深圳 518055

摘要 针对存在残余频偏的光频梳波分复用系统, 提出一种基于盲相位搜索算法的主从载波恢复方案, 该方案适用于存在频偏的光频梳相干波分复用系统。该系统使用盲相位搜索算法获取主通道的相位噪声, 获取的相位噪声进一步用于初始化从通道相位噪声; 使用测试相位自适应的相位追踪器对从通道的相位噪声进行校正。通过自适应调整测试相位的个数和中心位置, 实现了可容忍频偏的低复杂度载波相位恢复。仿真结果表明, 当使用 80 GHz 间隔的五线光频梳作为发射端和本地振荡光源时, 相对于各通道独立的载波恢复方案, 本方案在不牺牲相位噪声容忍度的前提下, 将从通道的计算复杂度降低了 80%。

关键词 光通信; 光频梳; 主从载波恢复; 盲相位搜索算法

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1706003

Low-Complexity Blind Phase Search Algorithm for Master-Slave Carrier Under Frequency Offset Conditions

Qu Siwei, Yang Yanfu*, Xiang Qian, Zhang Qun

School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen),
Shenzhen, Guangdong 518055, China

Abstract A scheme for master-slave carrier recovery upon the blind phase search algorithm is proposed in this paper, and the scheme is suitable for coherent wavelength division multiplexing systems based on optical frequency comb with frequency offset. Firstly, the blind phase search algorithm is used to obtain the phase noise of the master channel, which is in turn used to initialize the phase noise of the slave channel. Then, the initialized results are corrected with phase trackers that can test phases automatically. By adaptively adjusting the number and central position of the test phases, this scheme achieves low-complexity tolerant carrier phase recovery of frequency offset. The simulation results show that when a five-line optical frequency comb with an 80 GHz interval is used as the transmitter and the local oscillating light source, the calculation complexity of the slave channel can be reduced by 80% without sacrificing phase noise tolerance compared with carrier recovery schemes that have channels independent from each other.

Key words optical communications; optical frequency comb; master-slave carrier recovery; blind phase search algorithm

OCIS codes 060.1660; 060.2330; 060.4510

1 引言

随着大数据、云计算和实时视频等新型数据业务的出现, 互联网流量呈现日益增长的趋势^[1]。相

干检测技术结合波分复用^[2](WDM)系统可有效提高信道容量, 是当前实现大容量通信系统的可靠方案。由于利用了载波相位传输数据, 载波相位恢复(CPR)是相干通信系统数字信号处理(DSP)中至关

收稿日期: 2021-02-05; 修回日期: 2021-02-25; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 深圳市科技计划基础研究面上项目(JCYJ20190806142407195)

通信作者: *yangyanfu@hit.edu.cn

重要的模块^[3]。绝大多数应用在单载波系统的 CPR 算法可用于补偿 WDM 系统中子通道的相位噪声^[4],但这一补偿过程需要与子通道数目相同的本地振荡光源和 CPR 模块,由此带来的成本和能耗将制约 CPR 算法在短距离光互联场景下的应用。

为了降低硬件成本和软件功耗,光频梳技术被引入相干 WDM 系统中。光频梳^[5-6]拥有宽带相位相干性,各频率分量间隔稳定,能作为 WDM 系统多波长光源来降低光收发器的复杂性。使用光频梳作为 WDM 系统光源时^[7-8],各子载波源自同一激光器,相位噪声相互关联,可利用该相关性对子通道进行联合载波相位恢复,以减小 CPR 模块的复杂度。而在信号传输过程中,光纤非线性和累计色散会引起相位抖动,接收端的本地振荡相位噪声也会给不同的子通道引入相位漂移,使各通道间存在一定的相位差异^[9]。对此,Lundberg 等^[10]提出了主从式载波恢复(MS-CCPR)方案,该方案首先恢复所选主通道的载波相位,并将估计的相位噪声用于其余从通道的相位初始化,通过决策导向(DD)均衡器反馈补偿从通道残余相位噪声。但这种反馈式结构会因为并行计算的限制影响均衡器的更新速度,从而降低相位噪声补偿效果。Deynu 等^[11]讨论了激光和非线性相位噪声影响下的光频梳 WDM 系统,提出了一种低复杂度的前馈式主从盲相位搜索(BPS)方案。该方案分析了不同传输距离条件下残余相位噪声与 BPS 测试相位角间的对应关系,可在不降低算法性能的前提下减少测试相位角的个数,减小测试范围,从而降低从通道相位追踪的复杂度。该方案实现简单,但对残余的频偏较为敏感。

本文提出一种适用于频偏条件下的低复杂度主从载波盲相位搜索算法以解决上述方案中存在的问题。首先通过传统的 MS-CCPR 方案完成主通道相位恢复及从通道初始化,进一步使用基于 BPS 算法的低复杂度相位追踪器,校正从通道残留的相位噪声。通过自适应修改测试相位个数和中心位置,该方案实现了可容忍频偏的低复杂度载波相位恢复。仿真结果表明,该方案能够在残余频偏的影响下完成从通道相位追踪,传输距离在 400 km 以内时,相对于各通道独立的载波恢复方案,本方案在不牺牲相位噪声容忍度的前提下,将从通道的计算复杂度降低了 80%。

2 基本原理

相位噪声是相干光通信系统的主要损伤之一,

目前主要通过相干光接收机 DSP 中的 CPR 模块来补偿^[12]。传统的相干 WDM 系统需要与子通道数目相同的本地振荡光源和 CPR 模块^[13],由此带来的成本和能耗将降低其适用性。而基于光频梳的 WDM 系统的所有子通道源自同一激光源,光频梳的宽带相位相干性使得 WDM 各子通道相位相关,故该系统在相位噪声处理方面具有天然优势。通过共享各子通道间相位估计的资源,CPR 模块复杂度可以有效降低。

2.1 主从载波联合恢复

主从式载波恢复方案利用基于光频梳的 WDM 系统子通道之间的相位相干性,实现了低复杂度的多载波相位恢复。该方案选定一个通道作为主通道进行相位估计,获得的相位噪声进一步用于初始化从通道相位噪声。由于在实际的光纤链路中,色散走离会使得通道去相关,同时光纤的非线性效应、接收端的光频梳再生等过程将引入额外的相位噪声,故从通道需使用相位追踪器补偿残余相位噪声。

目前使用较多的主从相位恢复方案有前馈式和反馈式两类。典型的反馈式主从相位恢复方案如图 1(a)所示,该方案使用 DD 均衡器比较当前符号与理想星座点距离并更新均衡器系数,以补偿残余的相位噪声和频率偏移,利用均衡器抽头个数,衡量该方案的计算复杂度。在实际硬件的实现过程中,该反馈式结构会因为并行化的限制而无法达到理想的更新速率,从而导致相位恢复性能降低。

图 1(b)为前馈式主从相位恢复方案。完成从通道相位噪声初始化后,分析不同传输距离条件下残余相位噪声与 BPS 测试相位角间的对应关系,通过减少从通道 BPS 算法的测试相位角个数,实现低复杂度从相位追踪器。该方案是一种前馈式的主从恢复方案,硬件实现更为容易,但对相位噪声的容忍性差,且对频偏敏感,难以用于实际的传输场景中。

2.2 一种频偏条件下的低复杂度主从载波盲相位搜索算法

基于盲相位搜索算法的主从载波恢复方案首先使用不同测试相位 θ_i 对主通道采样信号 R_k 进行旋转以逼近理想参考信号。测试相位的表达式为

$$\theta_i = \left(\frac{i}{B} - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{2}, \quad (1)$$

其中, B 为测试相位个数,直接影响算法的精准度和计算复杂度,常用的测试相位个数为 32。因为文中使用的是具有圆点对称星座图的 QAM 信号,取 $i = 0, 1, \dots, B-1$, 即测试相位 $\theta_i \in \left[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4} \right]$ 。随后将

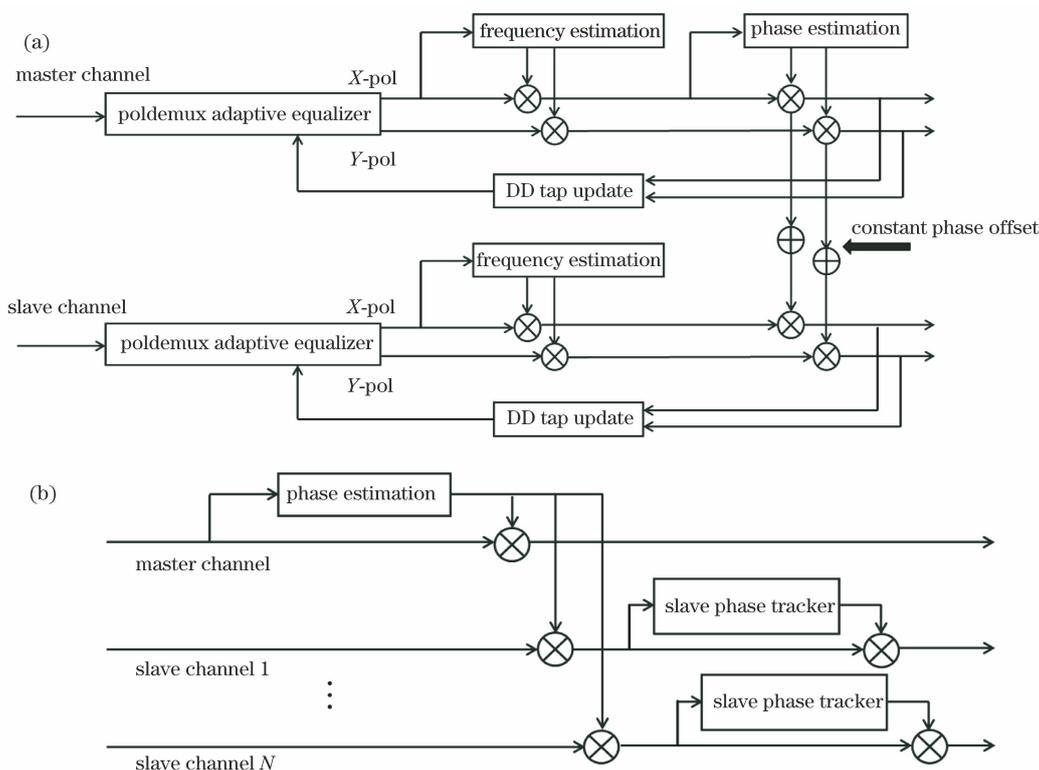


图 1 两种主从相位恢复方案。(a) 反馈式主从相位恢复方案;(b) 前馈式主从相位恢复方案
Fig. 1 Two MS-CCPR schemes. (a) Feedback MS-CCPR scheme; (b) feedforward MS-CCPR scheme

旋转后的符号输入判决电路,计算复平面与最近星座点的欧氏距离的平方 $|d_b|^2$ 。为减少噪声的干扰,对同一测试角度取前后 N 个距离平方和得 S_i , 表达式为

$$S_i = \sum_{l=-N}^N |d_{i+l}|^2. \quad (2)$$

在这 B 个欧氏距离平方和中取最小值,利用最小值对应的相位 θ_{master} 补偿主通道相位噪声并实现从通道相位噪声的初始化。

在从通道实现相位噪声初始化后,使用图 2(b) 所示相位追踪器进一步对从通道 BPS 算法参数进

行自适应修改。步骤如下:1)相位追踪器通过 BPS 算法的全部测试相位角找到不同通道的初始相位,以补偿光频梳 WDM 系统子通道间与通道相关的恒定相位噪声差。2)利用当前滑动窗口内相位噪声的变化速率,自适应修改下一个滑动窗口,测试相位角个数,以光频梳为光源的 WDM 系统保证了各通道相位噪声的相关性,因此初始化后从通道在长度有限的滑动窗口内残余相位噪声变化幅度有限,可以在不牺牲相位噪声容忍度的条件下减少测试相位个数,以降低从通道计算复杂度。3)同步更新测试中心,以消除频偏引入的相位噪声变化。4)最后在当

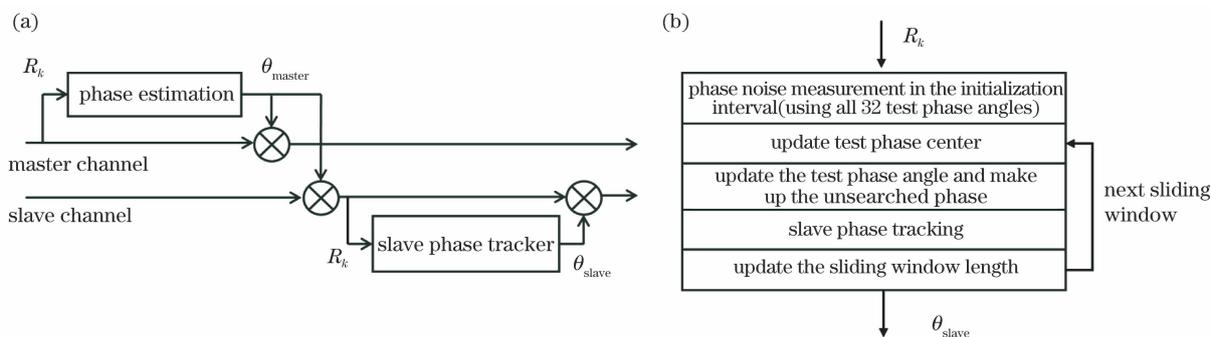


图 2 主从载波恢复方案结构图和从相位追踪器结构图。(a)主从载波恢复方案结构图;(b)从相位追踪器结构图
Fig. 2 Structure diagrams of MS-CCPR and slave phase tracker. (a) Structure diagram of MS-CCPR; (b) structure diagram of slave phase tracker

前滑动窗口相位噪声达到测量相位阈值时更新滑动窗口长度。本方案由于自适应调整盲相位搜索算法参数,可适用于不同的传输环境,同时由于是前馈式主从恢复方案,不受硬件并行化实现限制。

3 结果与讨论

本文使用了基于光频梳的 80 GHz 间隔 5 通道

WDM 系统对提出的 BPS 算法进行了性能测试,系统配置如图 3 所示。该系统基于 VPI transmission Maker v9.1 仿真平台,其中收发机的 DSP 模块使用 Matlab R2018a 联合仿真。通过级联强度调制器和激光器并设置射频幅值和直流偏置电压^[14],产生如图 4 所示的 5 线平坦光学频率梳。其中,光频梳间距与射频频率有关。

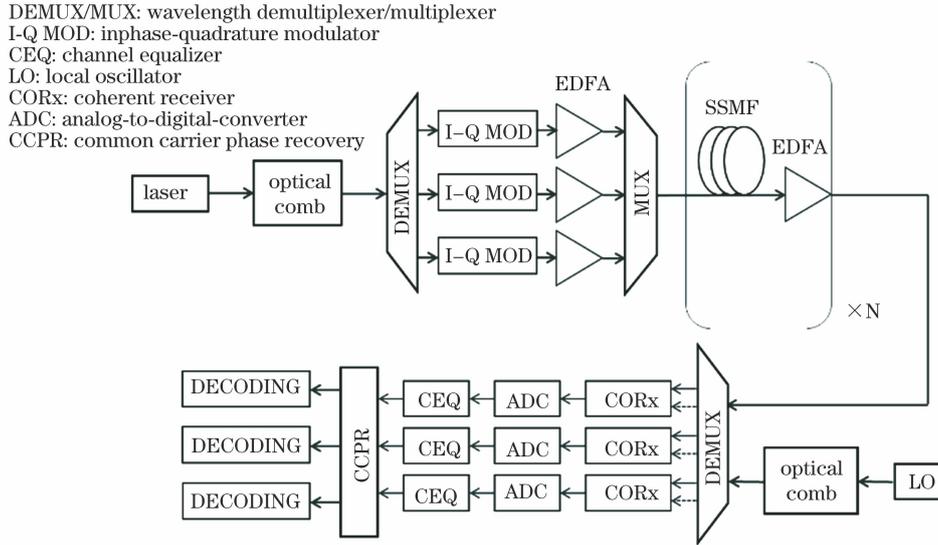


图 3 基于光频率梳的典型 WDM 传输系统

Fig. 3 Typical WDM transmission system based on optical frequency comb

本研究采用单通道波特率为 20 GBaud 的 16QAM 信号进行仿真实验,通过滚降因子为 0.1 的平方根升余弦滤波器进行脉冲整形以限制基带信号的光谱,实现了紧密的通道间隔,减少了符号间串扰。设置发射端激光器线宽为 100 kHz,功率为 0 dBm,通过波分解复用器将 5 个通道分离并单独调制,信号经通道复用后输入传输链路。传输光纤为每段 80 km 的标准单模

光纤,光纤衰减为 $0.2 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$,色散为 $16 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$,非线性系数为 $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2\cdot\text{W}^{-1}$,使用掺铒光纤放大器补偿跨段损耗,增益为 16 dB。在传输过程中添加放大自发辐射(ASE)噪声,以保证仿真条件贴合实际。接收端使用与发送端相同的光频梳作为本地振荡光源进行相干探测,为验证残余频偏影响,设置从通道接收端残余频偏为 500 MHz。

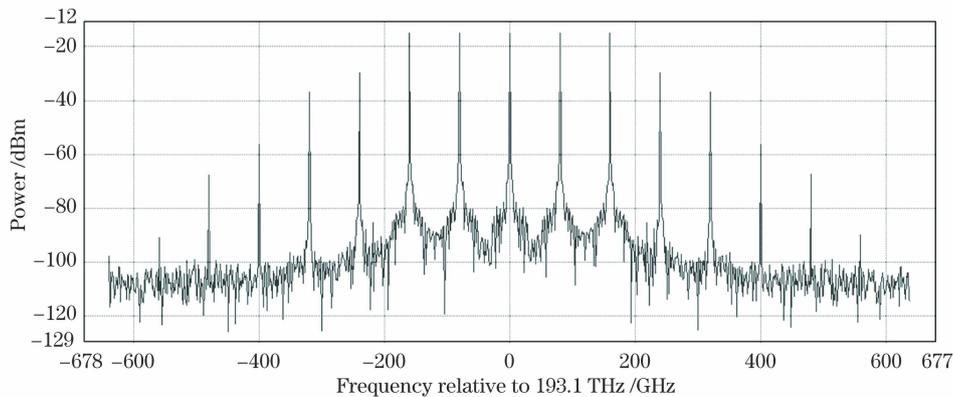


图 4 等幅度五线频率梳仿真光谱图

Fig. 4 Simulated spectrum of five-line frequency comb with equal amplitude

3.1 频偏影响下的从相位追踪

首先通过各通道独立的载波恢复方案,验证光

频梳 WDM 传输系统中不同子通道相位噪声的相关性。由于通道间相位噪声的相关性随通道间距的

增加而减小,如图 5(a)所示,本研究选定通道间距最远的通道 1 及通道 5,测量两通道经 320 km 传输后的相位噪声,两条曲线表现出极高的相关性。图 5(b)是图 5(a)中一段随机区间内相位噪声差值曲线,该差值在 $[0.25 \text{ rad}, 0.7 \text{ rad}]$ 范围内连续变

化且并非以零为波动中心,该现象源自光频梳 WDM 系统各通道间存在的恒定相位差以及光纤传输过程中的色散走离和非线性等效效应引入的额外相位漂移,因此需使用从相位追踪器补偿残余的相位噪声。

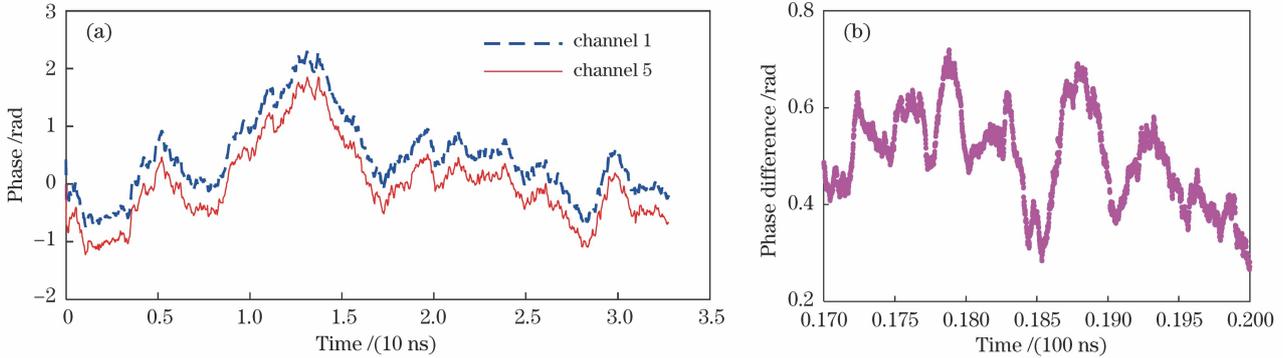


图 5 320 km 传输条件下主从通道相位噪声及其差值曲线。(a)主从通道相位噪声曲线;(b)两通道差值曲线
Fig. 5 Phase noise curves and phase difference curve of master-slave channel under 320 km transmission condition.

(a) Phase noise curves of master-slave channel; (b) phase difference curve of two channels

从通道存在 500 MHz 残余频偏条件下,主从通道的相位噪声如图 6(a)所示。该条件下无法使用文献[11]中的前馈式主从载波恢复方案,这是因为该方案分析不同传输距离条件下残余相位噪声与 BPS 测试相位角间的对应关系时 BPS 算法测试中心固定,但残余频偏会给从通道引入额外的线性变化的相位噪声,这使得该方案无法建立传输距离与

测试相位角对应关系,因此无法减少从通道测试相位角个数。图 6(b)为存在频偏时的通道间相位差及本方案的从通道追踪相位,将通道间相位差增加 0.1 rad 以区分两条曲线。通过自适应调整从相位追踪 BPS 算法的测试中心,本方案在不增加从通道计算复杂度的前提下完成了频偏条件下的从相位追踪。

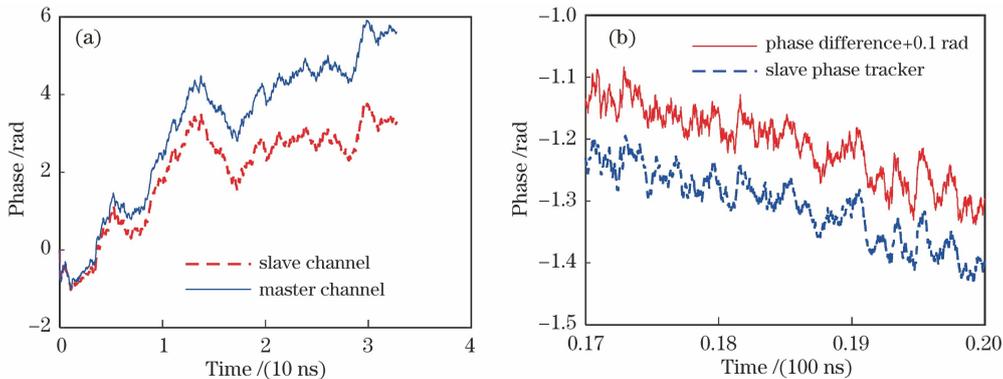


图 6 存在残余频偏条件时的主从通道相位曲线和从相位追踪曲线。(a)主从通道相位曲线;(b)从相位追踪曲线
Fig. 6 Master-slave channel phase curves and slave phase tracking curves under the condition of residual frequency offset.

(a) Master-slave channel phase curves; (b) slave phase tracking curves

3.2 计算复杂度

主从载波恢复方案的目的是降低 DSP 的计算复杂度,因此与独立相位恢复方案相比,保证从相位追踪器的低复杂度是本方案关注的重点。而 BPS 算法所需要的计算复杂度可以通过测试相位角个数和平均窗口长度两方面衡量,本方案的平均窗口长度与独立相位恢复方案相等,因此仅用测试相位角

个数来衡量本方案的计算复杂度。

图 6 条件下从通道 BPS 算法的测试相位角个数变化如图 7 所示。在从通道完成相位噪声初始化后,从相位追踪器首先使用 BPS 算法 32 个测试相位角,来确定因不同通道间可能存在的恒定相位差所导致的从通道初始相位噪声。在 $[-\frac{\pi}{4} \text{ rad}, \frac{\pi}{4} \text{ rad}]$

范围内找到从通道初始相位噪声后,根据初始化区间内的相位变化速度修改下一滑动窗口,测试相位角个数,并将测试中心调整为当前滑动窗口最终测

得的相位噪声。当前滑动窗口相位噪声达到阈值测试相位时,更新下一滑动窗口长度并结束当前滑动窗口。

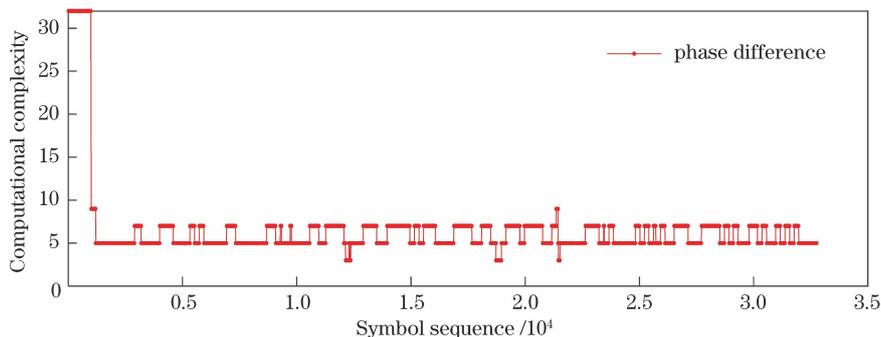


图 7 计算复杂度变化曲线

Fig. 7 Computational complexity curve

传统的 BPS 算法使用 32 个测试相位角,而本方案根据从通道相位噪声变化速度调节测试相位角个数,因此使用平均测试相位角个数来表征不同传输条件下的计算复杂度。当光信噪比为 21 dB 时,表 1 和表 2 为未使用色散补偿算法和使用色散补偿算法时补偿色散效应的从通道计算复杂度。当未补偿光纤传输中的色散效应时,计算复杂度随距离传输变化较大且与主从通道间距相关,该现象源自光

频梳 WDM 系统中色散走离效应引入的与通道相关的相位偏移。考虑实际的传输情况后,本研究使用色散补偿算法补偿光纤传输过程中的色散效应。表 2 结果表明,在 400 km 以内的传输情况中,主从载波相位恢复方案使用的平均相位角个数在 [5.28, 6.40] 范围内,与使用 32 个测试角的独立相位恢复方案相比,本方案将从通道计算复杂度降低了 80%。

表 1 未使用色散补偿算法补偿色散效应的从通道计算复杂度
Table 1 Computational complexity of slave channels without dispersion compensation algorithm to compensate for dispersion effect

Propagation distance /km	Computational complexity of slave channels			
	-160 GHz channel	-80 GHz channel	80 GHz channel	160 GHz channel
0	5.12	5.12	5.18	5.16
80	5.52	5.34	5.27	5.66
160	6.37	5.66	5.65	6.51
240	7.38	6.22	6.52	7.37
320	8.23	7.03	7.68	8.27

表 2 使用色散补偿算法补偿色散效应的从通道计算复杂度
Table 2 Calculation complexity of slave channels with the dispersion compensation algorithm to compensate for the dispersion effect

Propagation distance /km	Computational complexity of slave channels			
	-160 GHz channel	-80 GHz channel	80 GHz channel	160 GHz channel
80	5.28	5.32	5.30	5.35
160	5.38	5.42	5.34	5.41
240	5.52	5.66	5.56	5.59
320	5.84	5.84	5.89	5.89
400	6.28	6.40	6.34	6.21

最后研究本方案在不同传输条件下的性能。利用色散补偿算法的色散作用,本研究测量了从相位追踪器从 0 km(背靠背, B2B)到 400 km 传输的误码率,其结果如图 8 所示。固定中心通道为主通道,选定 [-160 GHz, 160 GHz] 区间内不同频率间距的通道为从通道,图中实线代表传统的各通道独立的载波恢复方案,点线代表主从载波恢复方案。在传输距离较短时,本方案的误码率可能低于传统载

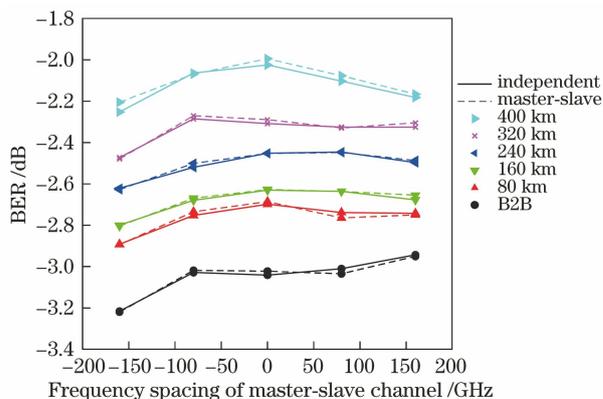


图 8 0~400 km 传输过程中独立载波恢复与主从载波恢复性能比较

Fig. 8 Performance comparison between independent carrier recovery and master-slave carrier recovery during transmission from 0 to 400 km

波恢复方案,这是因为 BPS 算法在旋转相位后需要对同一测试相位角取前后 N 个平方和来减少噪声干扰,而本方案利用主通道相位噪声完成从通道相位噪声初始化,减少了噪声影响。而传输距离较长时,本方案的误码率略高于各通道独立的载波恢复方案,这是因为长距离传输的色散走离效应使得各通道相位噪声去相关,导致本方案误码率的上升。

4 结 论

提出一种新型的基于盲相位搜索算法的低复杂度主从载波恢复方案,解决了传统前馈式主从载波恢复方案不容忍频偏的问题。该方案使用 BPS 算法计算主通道的相位噪声并以此对从通道相位噪声进行初始化;随后通过滑动窗口内相位噪声变化速率自适应地优化测试相位的个数和中心位置,从而实现可容忍频偏的载波相位恢复。

本研究在五线光频梳传输系统中通过数值仿真验证了算法性能,仿真结果表明,该方案可在存在频偏的场景下实现低复杂度的主从通道载波相位恢复。在 400 km 传输距离以内,相对于各通道独立的载波恢复方案,本方案在不牺牲相位噪声容忍度的前提下,将从通道的计算复杂度降低了 80%。

参 考 文 献

- [1] Liu C, Pan J, Detwiler T, et al. Joint digital signal processing for superchannel coherent optical communication systems[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8342-8356.
- [2] 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.
- [3] Liu X, Chandrasekhar S, Zhu B Y, et al. Transmission of a 448-Gb/s reduced-guard-interval CO-OFDM signal with a 60-GHz optical bandwidth over 2000 km of ULAF and five 80-GHz-Grid ROADMs[C]//2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, March 21-25, 2010, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 1-3.
- [4] Deynu F K, Akpari E W, Akama C. Phase noise effects on the performance of joint carrier phase recovery algorithms in phase-locked WDM superchannel transmission systems[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 54: 102104.
- [5] Lundberg L, Karlsson M, Lorences-Riesgo A, et al. Frequency comb-based WDM transmission systems enabling joint signal processing[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(5): 1-25.
- [6] Liu H M, Pan W, Lu B, et al. Generation of flat optical frequency comb based on asynchronous RF-signal-driven cascaded phase modulators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1206002. 刘昊明, 潘炜, 卢冰, 等. 基于异步射频信号驱动级联相位调制器产生平坦光学频率梳[J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1206002.
- [7] Lundberg L, Mazur M, Fülöp A, et al. Phase correlation between lines of electro-optical frequency combs[C]//CLEO: Applications and Technology 2018, May 13-18, 2018, San Jose, California, United States. Washington, D. C.: OSA, 2018: JW2A.149.
- [8] Torres-Company V, Schröder J, Fülöp A, et al. Laser frequency combs for coherent optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(7): 1663-1670.
- [9] Karlsson M. Is there a role for frequency combs in long-haul fiber transmission?[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2019, November 2-5, 2019, Chengdu, China. Washington, D. C.: OSA, 2019: M3B.5.
- [10] Lundberg L, Mazur M, Lorences-Riesgo A, et al. Joint carrier recovery for DSP complexity reduction in frequency comb-based superchannel transceivers[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [11] Deynu F K, Xu B, Akpari E W. Design of feedforward master-slave carrier phase recovery in frequency comb-based superchannel coherent transmission systems with nonlinear phase noise[J]. *Optics Communications*, 2020, 459: 124898.
- [12] Zhang J, Qiu Q. High-precision fourth power carrier phase recovery algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 130604. 张杰, 邱琪. 一种高精度的四次方载波相位恢复算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 130604.
- [13] Wang F, Zhang X. Improved algorithm of carrier phase recovery for 224 Gb/s, WDM-PM-16QAM signals over 640 km transmission system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s2): S206011. 王芳, 张霞. 224 Gb/s, 640 km 传输实验中 WDM-PM-16QAM 信号载波相位恢复改进算法[J]. *光学学报*, 2014, 34(s2): S206011.
- [14] Lin G B. Research on optical frequency comb generation and application in WDM system[D]. Xi'an: Xidian University, 2014: 17-23. 林贵斌. 光学频率梳生成及其在 WDM 系统中应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 17-23.