

DOI: 10.12086/oe.2021.200077

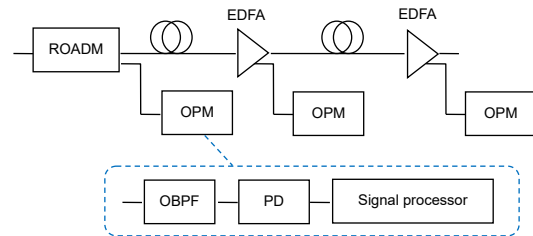
## 一种基于高斯过程回归的光信噪比监测技术

鄢 然<sup>1,2</sup>, 胡春杰<sup>3</sup>, 李 蔚<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>武汉中原电子集团有限公司, 湖北 武汉 430205;

<sup>2</sup>华中科技大学软件学院, 湖北 武汉 430074;

<sup>3</sup>华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074



**摘要:** 提出并通过实验验证了一种新颖的带内光信噪比(OSNR)监测技术, 该技术利用商用的大带宽可调谐光带通滤波器进行采样, 将得到的光功率测量值作为高斯过程回归(GPR)的输入特征值, 能够准确地估计出大动态范围 OSNR 值, 并且不受光链路的配置影响, 具有分布式低成本的特点。针对 32 Gbaud PDM-16QAM 信号的实验结果表明, 在-1 dB~30 dB 的大 OSNR 范围内, 光信噪比监测的均方根误差(RMSE)为 0.429 dB, 平均绝对误差(MAE)为 0.294 dB。此外, 本文提出的技术被证明对色散、偏振模色散、非线性效应和级联滤波效应(CFE)均不敏感。实验表明, 本文提出的技术有潜力被用于在传输信息未知的情况下对中间节点实施链路监控, 且由于不需要校准而更易于操作。

**关键词:** 光链路监控; 光性能监测; 光信噪比; 高斯过程回归; 相干光通信

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

鄢然, 胡春杰, 李蔚. 一种基于高斯过程回归的光信噪比监测技术[J]. 光电工程, 2021, 48(1): 200077

Yan R, Hu C J, Li W. A novel optical signal-to-noise ratio monitoring technique based on Gaussian process regression[J].

*Opto-Electron Eng*, 2021, 48(1): 200077

## A novel optical signal-to-noise ratio monitoring technique based on Gaussian process regression

Yan Ran<sup>1,2</sup>, Hu Chunjie<sup>3</sup>, Li Wei<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Wuhan Zhongyuan Electronics, Wuhan, Hubei 430205, China;

<sup>2</sup>School of Software Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>3</sup>Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract:** We propose and experimentally demonstrate a novel in-band optical signal-to-noise ratio (OSNR) monitoring technique that uses a commercially available widely tunable optical bandpass filter to sample the measured optical power as input features of Gaussian process regression (GPR) can accurately estimate the large dynamic range OSNR and is not affected by the configuration of the optical link, and has the characteristics of distributed and low cost. Experimental results for 32 Gbaud PDM-16QAM signals demonstrate OSNR monitoring with the root mean squared error (RMSE) of 0.429 dB and the mean absolute error (MAE) of 0.294 dB within a large OSNR range of -1 dB~30 dB. Moreover, our proposed technique is proved to be insensitive to chromatic dispersion, polarization mode

收稿日期: 2020-03-11; 收到修改稿日期: 2020-06-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB2200900)

作者简介: 鄢然(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事计算机网络方面的研究。E-mail: 811086789@qq.com

通信作者: 李蔚(1968-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信技术方面的研究。E-mail: weilee@hust.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

dispersion, nonlinear effect, and cascaded filtering effect (CFE). Furthermore, our proposed technique has the potential to be employed for link monitoring at the intermediation nodes without knowing the transmission information and is more convenient to operate because no calibration is required.

**Keywords:** optical link monitoring; optical performance monitoring; optical signal to noise ratio; Gaussian process regression; coherent optical communication

## 1 引言

随着全球 IP 流量引发的带宽需求爆炸性增长,密集波分复用(dense wavelength division multiplexing, DWDM)和高级光调制格式已被广泛研究以扩展传输容量和提高频谱效率<sup>[1]</sup>。此外,可重构光分插复用器(reconfigurable optical add-drop multiplexer, ROADM)的出现也增加了光纤传输系统的灵活性和动态性<sup>[2]</sup>。在这样的光纤传输系统中,光性能监测(optical performance monitoring, OPM)和光链路监测是不可或缺的,因为它们可以提供最佳的资源利用,故障定位和损坏修复等<sup>[3]</sup>。另一方面,色散(chromatic dispersion, CD)等线性损伤可以通过相干接收机中的数字信号处理(digital signal processing, DSP)算法来有效补偿,所以传输性能主要取决于光信噪比(optical signal-to-noise ratio, OSNR)<sup>[4]</sup>。因此,OSNR 监测对于确保传输性能至关重要,应该被广泛部署在包括中间节点等在内的传输链路中。考虑到实际工程中,长途光纤传输系统包含许多标准单模光纤(standard single mode fiber, SSMF)跨段级联,每一跨段光纤长度为 80 km~100 km 并由光放大器补偿传输损耗<sup>[5]</sup>。

传统的标准带外 OSNR 监测方技术对于具有超窄信道间隔的 DWDM 系统或具有 ROADM 的动态光网络已不再适用。为了解决这个问题,目前已经报道了许多带内 OSNR 监测技术。这些技术主要可以分为两种类型:第一种类型为通过数字相干接收机来监测终端节点的 OSNR,例如幅度直方图<sup>[6]</sup>,统计矩<sup>[7]</sup>,误差矢量幅度(error vector magnitude, EVM)<sup>[8]</sup>,斯托克斯参数<sup>[9]</sup>,幅度噪声相关性<sup>[10]</sup>和基于数据辅助<sup>[11]</sup>的技术;第二种类型为通过在中间节点处引入额外光学器件来监测 OSNR,例如偏振归零<sup>[12]</sup>,光延迟干涉仪<sup>[13]</sup>,偏移滤波和光功率测量<sup>[14-15]</sup>,参考光谱<sup>[16-18]</sup>和基于异步延迟采样<sup>[19]</sup>的技术。一般来说,OSNR 监测模块应该是低成本的、可靠的、鲁棒的并且可以在传输链路上广泛部署以获取链路信号质量信息。对于第一类技术,由于需要使用到高采样率的数字相干接收机,价格昂贵而无法广泛部署。因此当监测节点处传输信息未知

并且需要考虑到成本效益时,第二类技术是首要选择。

为了解决鲁棒性的问题,我们把机器学习引入到 OSNR 的精确监测中。在本文中,我们提出了一种基于高斯过程回归(Gaussian process regression, GPR)的机器学习方法,通过利用目前已经商用的低成本大带宽可调谐的光带通滤波器(optical bandpass filter, OBPF)将采样得到的光功率值作为高斯过程回归的输入特征,可以克服上述 OSNR 监测的难题。在我们提出的技术中,所需要的额外硬件设备包括商用的大带宽可调谐 OBPF,其具有超高斯形状的滤波谱,0.2 nm 的 3 dB 带宽,0.02 nm 的波长分辨率,一个低速光电探测器(photodiode, PD)以及信号处理单元。我们以波长分辨率扫描可调谐 OBPF 的中心波长以遍历 C 波段,然后记录相应的光功率测量值。在信号处理单元中,GPR 用于结合所记录的光功率测量值来实现带内 OSNR 监测。我们通过实验证明,该技术无需任何校准即可实现高精度的 OSNR 监测,并且对 CD,偏振模色散(polarization mode dispersion, PMD),非线性效应(nonlinear effect, NLE)和级联滤波效应(cascaded filtering effect, CFE)鲁棒。此外,监测节点处的传输信息对于我们提出的技术并不是必要的,即我们提出的技术可以被广泛部署在链路任意节点中。

## 2 工作原理

高斯过程(Gaussian process, GP)可以看作是机器学习中监督学习方法的一种,它从训练集中构建输入与输出之间的关系,因此在给定新的输入时能够通过已构建的映射关系来预测新的输出。高斯过程通常可以用来解决回归问题和分类问题。回归问题是指在输入集与输出集均为连续变量的情况下进行预测,分类问题是指在输出集为有限个特定范围内的离散变量的情况下进行预测。由于本文只涉及 OSNR 的回归预测建模,以下内容主要研究 GPR。

### 2.1 高斯过程回归(GPR)

GP 被定义为随机变量的集合,且随机变量的任何有限子集的联合概率服从高斯分布<sup>[20]</sup>。GP 的全部统计

特性由其均值函数  $m(\mathbf{x})$  和协方差函数  $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  决定:

$$\begin{cases} m(\mathbf{x}) = E[f(\mathbf{x})] \\ k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = E[(f(\mathbf{x}) - m(\mathbf{x}))(f(\mathbf{x}') - m(\mathbf{x}'))] \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{x}'$  均为任意随机变量。因此 GP 可定义为  $f(\mathbf{x}) \sim GP(m(\mathbf{x}), k(\mathbf{x}, \mathbf{x}'))$ 。(2)

协方差函数  $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  表示为空间中任意两个随机输入变量对应的随机输出变量的中心矩, 能够用于衡量训练集与测试集相似或相关的程度, 是影响 GPR 模型预测性能的关键因素。为了利用 GP 实现回归, 需要选择相应的协方差函数即核函数。核函数的必要条件是 对称且半正定的协方差矩阵。在本文中, 核函数的选择是 Matern 5/2 核函数:

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \sigma_f^2 \left( 1 + \frac{\sqrt{5}r}{\sigma_l} + \frac{5r^2}{3\sigma_l^2} \right) \exp\left(-\frac{\sqrt{5}r}{\sigma_l}\right), \quad (3)$$

式中:  $r = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\|$  是随机变量  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{x}'$  之间的欧氏距离,  $\sigma_f^2$  为信号方差,  $\sigma_l$  为方差尺度。值得注意的是, Matern 5/2 核函数是一种不光滑的核函数, 更适用于实际应用场景。

一般情况下, 如果只用一种评价指标来衡量 GPR 模型的预测性能不具有说服力, 为了更好地体现 GPR 模型的预测性能, 本文主要选用均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 和平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 两种评价指标来对 GPR 模型进行检验。

### 2.2 基于 GPR 的 OSNR 监测原理

提出的带内 OSNR 监测模块的工作原理如图 1 所示, 图中 EDFA (Erbium-doped fiber amplifier) 为掺铒光纤放大器。该监测模块可以被放置在包括中间节点在

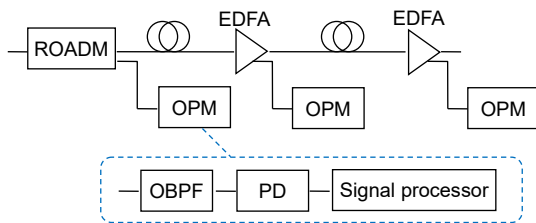


图 1 提出的 OSNR 监测器的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed OSNR monitor

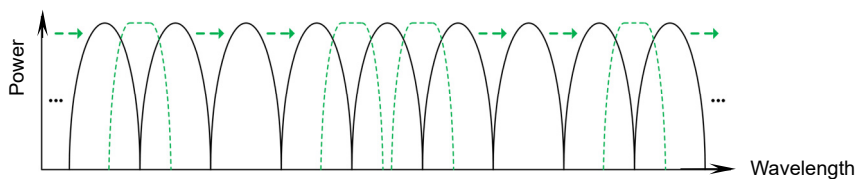


图 2 扫描可调谐 OBPF 的中心波长后的信号光谱。黑色实线表示信号光谱; 绿色虚线表示可调谐 OBPF 的滤波形状

Fig. 2 The signal optical spectrum after scanning the center wavelength of the tunable OBPF. The solid black lines represent the signal optical spectrum; the dashed green lines represent the filter shape of the tunable OBPF

内的传输链路的任意位置。它由一个大带宽可调谐的 OBPF, 一个低速 PD 和一个信号处理单元组成。首先, 该大带宽可调谐 OBPF 对从传输链路分出的待测光信号进行扫频滤波。这里输入光信号的波特率和调制格式可以是任意的。如图 2 所示, 以波长分辨率 ( $\lambda_r$ ) 逐步调整 OBPF 的中心波长以遍历 C 波段, 然后记录相应滤波后的光功率测量值。由于可调谐 OBPF 的中心波长一致时, 相应的光功率测量值在不同的 OSNR 处将是不同的。因此在信号处理单元中, 可以考虑将光功率测量值直接用作 GPR 的输入特征。

当 DWDM 传输系统的信道间隔为  $\Delta\lambda$  时, 我们将光功率测量值的数量  $N$  筛选为  $\Delta\lambda / \lambda_r$  以进行 OSNR 监测, 这相当于在可调谐 OBPF 中心波长落在监测信道时对应的所有光功率测量值。此外, 在监测节点处信号的入纤功率、传输距离和级联波长选择开关 (wavelength selective switch, WSS) 的数目也可以考虑被当作额外的输入特征。因此, 信号处理单元的架构如图 3 所示。在本文中, 训练数据集由训练样本对组成, 每对包含一个上述输入特征向量, 一个代表 OSNR 估计值的输出标量。训练阶段完成后, 利用测试数据集来分析训练后的 GPR 模型的 OSNR 监测性能。在测试阶段, 将输入特征 (测试数据集中的光功率测量值) 作为训练后的 GPR 模型的输入。然后, 可以从输出标量中获得相应的 OSNR 估计值, 并将其与实际 OSNR 进行比较, 进而确定了 OSNR 监测的性能。

在参考文献 [16] 中, OSNR 监测精度取决于可调谐 OBPF 的带宽, 需要低至几 GHz 带宽的可调谐 OBPF 才能提高 OSNR 监测精度。但是如此窄带宽的可调谐 OBPF 价格昂贵, 并且到目前为止尚未在市场上广泛销售。在参考文献 [17] 和 [18] 中, OSNR 监测精度取决于偏移频率和低通滤波器的带宽, 需要将偏移频率设置得更靠近信号频谱的边缘才能保证高 OSNR 监测精度。此外, 以上这两种方法仅利用了单边带光谱信息, 且许多参数需要进行校准才能保证良好的监测精度。本文提出的技术就是对以上两种方法的巨大改进, 在

低成本的前提下,充分利用光谱信息联合机器学习的方式实现了强鲁棒性、高监测精度和无需校准等特性。

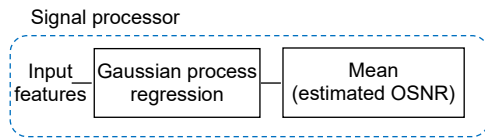


图3 信号处理单元的架构框图

Fig. 3 Block diagram of the signal processing unit architecture

### 3 实验建立与结果分析

用于验证所提出的带内 OSNR 监测技术的实验如图 4 所示。在发射机端,我们在监测信道上添加了左右对称的各 4 个干扰信道,其信道间隔为 50 GHz(0.4 nm)。9 个信道发出的连续光经复用器耦合,然后由偏振复用 IQ 调制器进行调制,以生成 PDM-16QAM 信号。可编程 AWG(Keysight: M9502A)用于产生 32 GS/s 的伪随机信号。于是便生成了 9×32 Gbaud PDM-16QAM 的待测信号。待测信号的入纤功率由 EDFA 进行控制。在传输链路中,利用后向拉曼放大来补偿每一跨段的光纤损耗。传输链路包含若干个(6/12/18/24)跨段长度为 80 km 的 SSMF。在这种情况下,分别改变监测节点处待测信号的入纤功率、传输距离和所经历的级联 WSS 个数,从而形成不同的系统条件。其中,级联 WSS 的个数由加载了各种级联滤波器波形的 Finisar WaveShaper 4000s 可编程滤波器确定。每一级滤波器的带通光谱均设置为具有 50 GHz 带宽的 3 阶超高斯形状。在监测节点处,我们在 ASE 噪声源(EXFO FLS-2300B)后添加一个 VOA 调整待测

信号的 OSNR。光谱仪 OSA 用于测量 OSNR 实际值,所提出的带内 OSNR 监测模块用于获取 OSNR 估计值。它包括一个具有超高斯形状的大带宽可调谐 OBPF,其 3 dB 带宽为 0.2 nm,波长分辨率为 0.02 nm。用波长分辨率调整可调谐 OBPF 的中心波长以遍历 C 波段,然后使用低速 PD 记录相应的光功率测量值。在每一个系统条件下,在相同 OSNR 时收集 5 组独立的光功率测量值。这样可以生成了一组样本数量可观的数据集。我们随机选择其中的 70%和 30%分别作为为训练数据集和测试数据集。在我们的工作中,训练阶段通过 matlab R2019a 回归学习工具箱实现。

为了确保在长距离传输中待测信号具有较宽的 OSNR 范围,并验证所提出的带内 OSNR 监测技术对 CD、PMD、NLE 和 CFE 鲁棒,系统条件如表 1 所示。从表 1 中可以看出,上述系统条件可以分为 3 类:(I)传输链路中无 WSS,传输距离和入纤功率发生改变;(II)传输链路中级联 WSS 的数目为 6,传输距离和入纤功率发生改变;(III)传输链路中级联 WSS 的数目改变,而传输距离和入纤功率均不发生改变。下面将对这些系统条件下得到的实验结果展开讨论。

第一类系统条件类似于当前提出的大多数方案的实验条件,在传输链路中不考虑 WSS。在此类别中生成了一个沿 C 波段的 585 组光功率测量值的数据集。提取监测信道中全部光功率测量值时,根据第 2 节,用于 OSNR 监测的光功率测量值的数量  $N$  为 0.4 nm/0.02 nm(即  $N=20$ )。因此,当利用上述 20 个光功率测量值和传输距离与入纤功率一起作为 GPR 的输入特征,得到如图 5(a)所示的实验结果。在 4 dB~30 dB

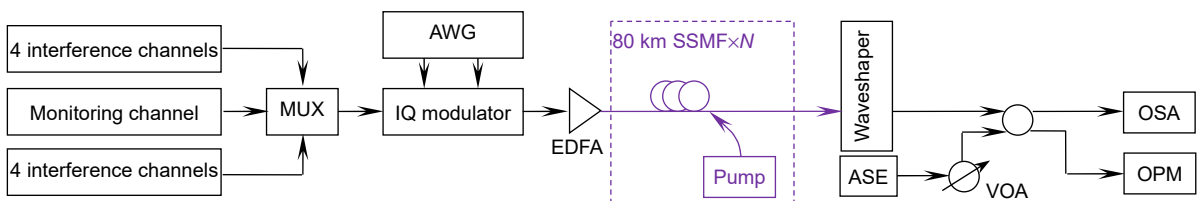


图4 实验装置。MUX: 复用器; AWG: 任意波形发生器; VOA: 可调光衰减器; OSA: 光谱仪

Fig. 4 Experimental setup.

MUX: multiplexer; AWG: arbitrary waveform generator; VOA: variable optical attenuator; OSA: optical spectrum analyzer

表 1 32 Gbaud PDM-16QAM 系统的系统条件

Table 1 System conditions for 32 Gbaud PDM-16QAM system

	I			I/III	II			II/III	III		
Transmission distance/km	480	1440	1920	960	480	1440	1920	960	960	960	960
Launch power/dBm	2	6	8	4	2	6	8	4	4	4	4
Number of cascaded WSSs	0	0	0	0	6	6	6	6	3	9	12

的 OSNR 范围内, RMSE 和 MAE 分别为 0.484 dB 和 0.386 dB, 这表明所提出的 OSNR 监测技术可以正常工作于存在 CD、PMD 以及 NLE 的情况下。由于监测信道中心波长附近的光功率测量值已经包含某些当前功率信息<sup>[15]</sup>, 将上述光功率测量值用作 GPR 的输入特征。于是可以得到如图 5(b)所示的实验结果, RMSE 和 MAE 分别为 0.486 dB 和 0.386 dB, 这表明 OSNR 监测性能几乎没有变化。因此, 对于第一类系统条件的传输方案, 尽管监测节点处的系统条件未知, 但我们提出的 OSNR 监测技术不会受到影响, 仍可以高精度且高效地工作。

为了进一步研究光学滤波元件对 OSNR 监测性能的影响, 将传输链路中级联 WSS 的数目固定为 6。这样在第二类系统条件中, 生成了一个沿 C 波段的 625 组光功率测量值的数据集。与第一类系统条件的对比方法类似, 在图 6(a)中, 将此时的 20 个光功率测量值和传输距离与入纤功率一起作为 GPR 的输入特征, 而在图 6(b)中, 则仅将上述 20 个光功率测量值用作 GPR 的输入特征。在 -1 dB~30 dB 的 OSNR 范围内, 图 6(a)的 RMSE 和 MAE 分别为 0.315 dB 和 0.2 dB, 图 6(b)的 RMSE 和 MAE 分别为 0.311 dB 和 0.208 dB。实验结

果表明, 提出的 OSNR 监测技术可以在存在滤波效应的情况下正常工作且无需知道监测节点处信号的系统条件。与第一类系统条件的实验结果相比, OSNR 监测性能得到了改善。这主要是由于此时实际 OSNR 范围向较低 OSNR 处扩展, 且监测误差在低 OSNR 时比在高 OSNR 时小得多。

为了进一步研究 CFE 对 OSNR 监测性能的影响, 在传输距离为 960 km 且入纤功率为 4 dBm 时改变传输链路中级联 WSS 数目。这样在第三类系统条件中, 生成了一个沿 C 波段的 785 组光功率测量值的数据集。与上述对比方法类似, 在图 7(a)中, 将此时的 20 个光功率测量值和级联 WSS 的个数一起作为 GPR 的输入特征; 而在图 7(b)中, 仅用上述 20 个光功率测量值作为 GPR 的输入特征。在 2 dB~30 dB 的 OSNR 范围内, 图 7(a)的 RMSE 和 MAE 分别为 0.393 dB 和 0.284 dB, 图 7(b)的 RMSE 和 MAE 分别为 0.415 dB 和 0.307 dB。实验结果表明, 我们提出的 OSNR 监测技术可以在存在 CFE 的情况下正常工作且无需知道监测节点处信号的系统条件。与第一类系统条件的实验结果相比, OSNR 监测性能也得到了改善。这主要是由于此时用于训练和测试的数据集有所增加。然而, 与第二类系

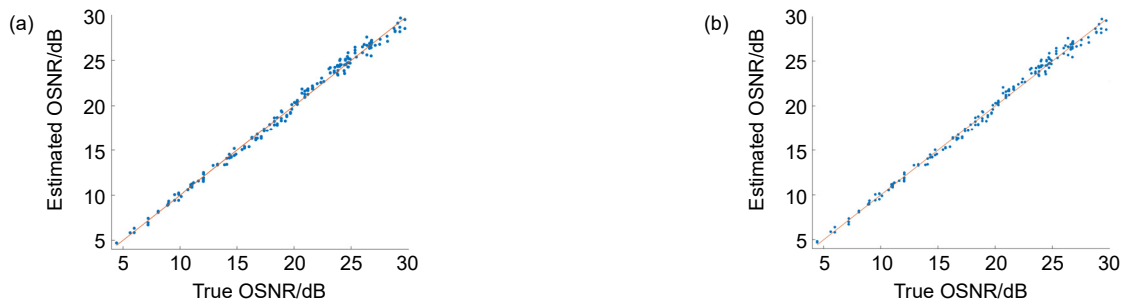


图 5 在第一类系统条件的测试阶段中, PDM-16QAM 信号的 OSNR 监测误差。

(a) 输入特征包括传输距离和入纤功率; (b) 输入特征中没有传输距离或发射功率

Fig. 5 OSNR monitoring error for PDM-16QAM signals during the testing phase in the first category. (a) With the transmission distance and launch power among the input features; (b) Without the transmission distance or launch power among the input features

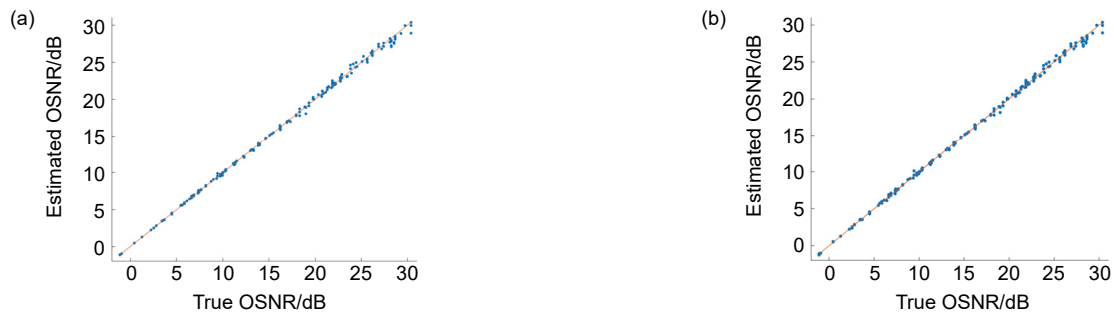


图 6 在第二类系统条件的测试阶段中, PDM-16QAM 信号的 OSNR 监测误差。

(a) 输入特征包括传输距离和入纤功率; (b) 输入特征中没有传输距离或发射功率

Fig. 6 OSNR monitoring error for PDM-16QAM signals during the testing phase in the second category. (a) With the transmission distance and launch power among the input features; (b) Without the transmission distance or launch power among the input features

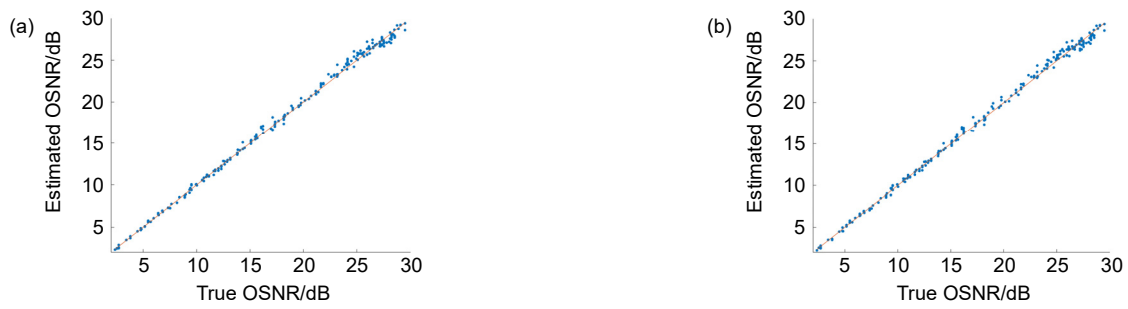


图 7 在第三类系统条件的测试阶段中, PDM-16QAM 信号的 OSNR 监测误差。

(a) 输入特征包括级联 WSS 个数; (b) 输入特征中无级联 WSS 个数

Fig. 7 OSNR monitoring error for PDM-16QAM signals during the testing phase in the third category. (a) With the number of cascaded WSSs among the input features; (b) Without the number of cascaded WSSs among the input features

统条件的实验结果相比, OSNR 监测性能有所下降。这主要是由于此时实际 OSNR 范围向较高 OSNR 处扩展,且监测误差在高 OSNR 时比在低 OSNR 时大得多。

进一步考虑在监测节点处既不知道传输距离和入纤功率也不知道级联 WSS 个数时,提出的 OSNR 监测技术是否仍可以正常工作。我们混合了以上三类系统条件的数据,得到了一个沿 C 波段的 1675 组光功率测量值的数据集。与上述对比方法类似,在图 8(a)中,

将此时的 20 个光功率测量值和传输距离、入纤功率以及级联 WSS 的个数一起作为 GPR 的输入特征,而在图 8(b)中,仅用上述 20 个光功率测量值作为 GPR 的输入特征。在 -1 dB~30 dB 的 OSNR 范围内,图 8(a)的 RMSE 和 MAE 分别为 0.418 dB 和 0.3 dB,图 8(b)的 RMSE 和 MAE 分别为 0.429 dB 和 0.294 dB。显然,OSNR 监测性能几乎没有下降。进一步分析图 8 中的实验结果,以获得图 9。从图 9 可以看出,大多数实

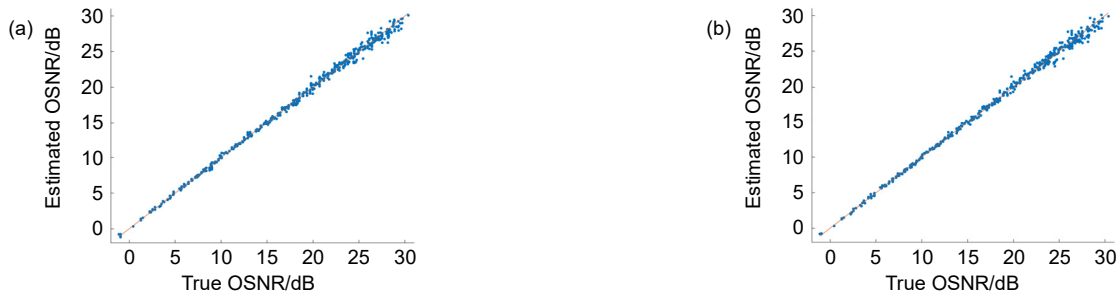


图 8 在上述三类系统条件的测试阶段中, PDM-16QAM 信号的 OSNR 监测误差。(a) 输入特征包括传输距离、入纤功率以及级联 WSS 个数; (b) 输入特征中不包括传输距离、入纤功率和级联 WSS 个数

Fig. 8 OSNR monitoring error for PDM-16QAM signals during the testing phase including the above three categories.

(a) With the transmission distance, the launch power and the number of cascaded WSSs among the input features; (b) Without the transmission distance, the launch power or the number of cascaded WSSs among the input features

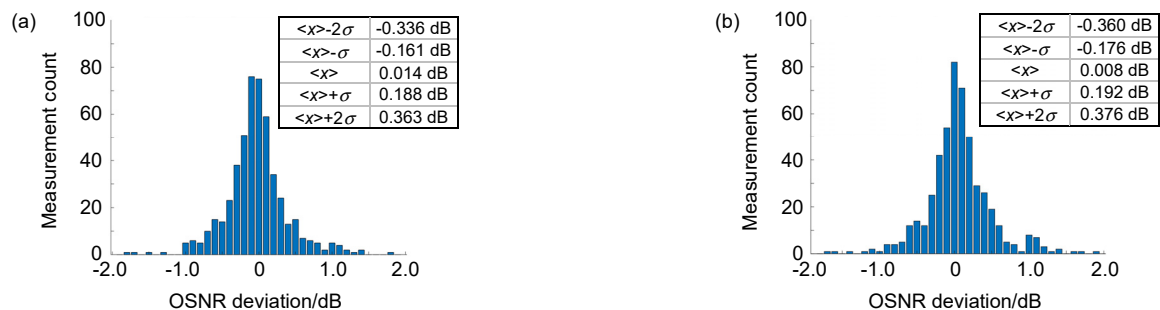


图 9 在上述三类系统条件的测试阶段中, PDM-16QAM 信号与真实 OSNR 的偏差。(a) 输入特征包括传输距离、入纤功率以及级联 WSS 个数; (b) 输入特征中不包括传输距离、入纤功率和级联 WSS 个数

Fig. 9 OSNR deviation from true OSNR for PDM-16QAM signals during the testing phase including the above three categories.

(a) With the transmission distance, the launch power and the number of cascaded WSSs among the input features; (b) Without the transmission distance, the launch power or the number of cascaded WSSs among the input features

验结果都非常好,在-1 dB~30 dB 的 OSNR 范围内,典型偏差(例如 $\langle x \rangle \pm \sigma$ )均在 $\pm 0.2$  dB 以内。也就是说,在无论是否知道系统条件的情况下,本文提出的 OSNR 监测技术都具有高精度及强鲁棒性。

从以上获得的实验结果可以看出,本文提出的 OSNR 监测技术对于 CD、PMD、NLE 和 CFE 均具有很强的鲁棒性,并且可以在无需知道系统条件的情况下保持高监测精度且可以部署在传输链路上的任意节点处。

## 4 结 论

本文提出了一种低成本和分布式的带内 OSNR 监测技术,并在高速相干光通信系统中进行了实验验证。我们通过利用大带宽可调谐的光带通滤波器得到的光功率测量值作为高斯过程回归的输入特征,实现了高精度的 OSNR 监测。实验结果表明,在具有 50 GHz 信道间隔的 9×32 Gbaud PDM-16QAM 系统中, RMSE 和 MAE 在-1 dB~30 dB 的 OSNR 范围内分别低于 0.43 dB 和 0.3 dB。此外,实验结果还表明,我们提出的 OSNR 监测技术对 CD、PMD、NLE 和 CFE 均具有鲁棒性,可以在无需知道系统条件的情况下部署在传输链路的任意节点处。

## 参考文献

- [1] Xue D J, Yu S H, Yang Q, *et al.* Frontier research of ultra-high-speed ultra-large-capacity and ultra-long-haul optical transmission[J]. *Front Optoelectron*, 2016, **9**(2): 123–137.
- [2] Cartledge J C. Performance of coherent optical fiber transmission systems[J]. *Front Optoelectron*, 2018, **11**(2): 128–133.
- [3] Zhang P, Feng Q G, Li W, *et al.* Simultaneous OTDR dynamic range and spatial resolution enhancement by digital LFM pulse and short-time FrFT[J]. *Appl Sci*, 2019, **9**(4): 668.
- [4] Savory S J. Digital coherent optical receivers: algorithms and subsystems[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2010, **16**(5): 1164–1179.
- [5] Downie J D, Hurley J, Pikula D, *et al.* Ultra-long-haul 112 Gb/s PM-QPSK transmission systems using longer spans and Raman amplification[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(9): 10353–10358.
- [6] Khan F N, Zhong K P, Zhou X, *et al.* Joint OSNR monitoring and modulation format identification in digital coherent receivers using deep neural networks[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(15): 17767–17776.
- [7] Zhang L, Zhang X G, Xi L X, *et al.* Modified optical-signal-noise-ratio monitoring method based on high order statistical moment in PM-QPSK coherent optical system[J]. *Chin*

- J Lasers*, 2014, **41**(5): 0505004.  
张磊, 张晓光, 席丽霞, 等. PM-QPSK 相干光通信系统中基于高阶统计矩的光信噪比监测方法的修正[J]. *中国激光*, 2014, **41**(5): 0505004.
- [8] Schmogrow R, Nebendahl B, Winter M, *et al.* Error vector magnitude as a performance measure for advanced modulation formats[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2012, **24**(1): 61–63.
- [9] Lundberg L, Sunnerud H, Johannisson P. In-band OSNR monitoring of PM-QPSK using the Stokes parameters[C]//*Proceedings of 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, Los Angeles, 2015.
- [10] Dong Z H, Lau A P T, Lu C. OSNR monitoring for QPSK and 16-QAM systems in presence of fiber nonlinearities for digital coherent receivers[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(17): 19520–19534.
- [11] Hu C J, Li W, Feng Q G, *et al.* A novel in-band OSNR monitoring technique based on fractional Fourier transform of LFM signal[J]. *Opt Commun*, 2019, **445**: 36–40.
- [12] Lee J H, Choi H Y, Shin S K, *et al.* A review of the polarization-nulling technique for monitoring optical-signal-to-noise ratio in dynamic WDM networks[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, **24**(11): 4162–4171.
- [13] Tao Z N, Chen Z Y, Fu L B, *et al.* Monitoring of OSNR by using a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2001, **30**(1): 63–65.
- [14] Shen S K, Yang A Y, Sun Y N. Improved off-center narrow filter method to monitor in-band optical signal-to-noise ratio[J]. *Acta Opt Sin*, 2009, **29**(S2): 74–78.  
沈世奎, 杨爱英, 孙雨南. 窄带离心滤波准确测量带内光信噪比的修正方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(S2): 74–78.
- [15] Hu C J, Li W, Zheng H, *et al.* A novel cost-effective and distributed in-band OSNR monitoring method using Gaussian process regression[J]. *IEEE Photonics J*, 2019, **11**(4): 7204312.
- [16] Oda S, Yang J Y, Akasaka Y, *et al.* In-band OSNR monitor using an optical bandpass filter and optical power measurements for superchannel signals[C]//*Proceedings of the 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013)*, London, 2013.
- [17] Dong Z H, Zhong K P, Zhou X, *et al.* Modulation-format-independent OSNR monitoring insensitive to cascaded filtering effects by low-cost coherent receptions and RF power measurements[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(12): 15971–15982.
- [18] Yin G, Cui S, Ke C J, *et al.* Reference optical spectrum based in-band OSNR monitoring method for EDFA amplified multispan optical fiber transmission system with cascaded filtering effect[J]. *IEEE Photonics J*, 2018, **10**(3): 7201910.
- [19] Lai J S, Yang A Y, Sun Y N. Optical fiber communication performance monitoring based on asynchronous delay tap sampling[J]. *Acta Opt Sin*, 2012, **32**(11): 1106004.  
赖俊森, 杨爱英, 孙雨南. 基于异步延迟采样的光通信性能监测方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(11): 1106004.
- [20] Meng F, Yan S, Nikolovgenis K, *et al.* Field trial of Gaussian process learning of function-agnostic channel performance under uncertainty[C]//*Proceedings of 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*, San Diego, 2018.

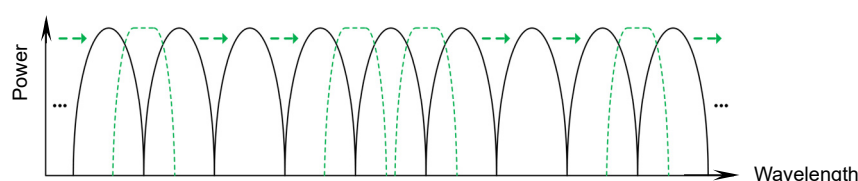
# A novel optical signal-to-noise ratio monitoring technique based on Gaussian process regression

Yan Ran<sup>1,2</sup>, Hu Chunjie<sup>3</sup>, Li Wei<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Wuhan Zhongyuan Electronics, Wuhan, Hubei 430205, China;

<sup>2</sup>School of Software Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>3</sup>Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology Wuhan, Hubei 430074, China



The signal optical spectrum after scanning the center wavelength of the tunable OBPF. The solid black lines represent the signal optical spectrum; the dashed green lines represent the filter shape of the tunable OBPF

**Overview:** The optical performance monitoring (OPM) refers to monitoring various performance parameters of optical signals at intermediate nodes or receiver terminal nodes of the optical fiber communication system in order to reduce network operating costs, ensure full utilization of resources, and guarantee reliable operation and flexible management of the system. The amplified spontaneous emission (ASE) noise introduced by optical amplifiers is the main noise source in the optical fiber communication system. Thus, the optical signal-to-noise ratio (OSNR) parameter used to measure the ASE noise accumulation can accurately reflect the quality of the optical signal, which is one of the most important parameters in OPM. Therefore, accurate monitoring of OSNR is an essential part of optical fiber communication systems. However, with the improvement of the channel capacity and transmission rate of the optical fiber communication system and the evolution of the optical network to the dynamically reconfigurable direction, the traditional out-of-band OSNR monitoring technique based on linear interpolation is facing the problem of failure. Thereupon, the in-band OSNR monitoring technique has received more and more attention. We propose a novel GPR-based in-band OSNR monitoring technique suitable for intermediate nodes. Firstly, the technology changes the center wavelength of the broadband tunable optical bandpass filter (OBPF) in a constant step size, so as to realize the sweep filtering of the whole C-band. Then, the optical power sequence collected from the center wavelength of the broadband tunable OBPF in the midpoint range of the channel to be monitored, and the adjacent channel is taken as the input features of the GPR model. Finally, the in-band OSNR monitoring is realized by utilizing the trained GPR model. By constructing a 9×32 Gbaud PDM-16QAM coherent optical communication system, a comprehensive experiment was conducted to verify the effectiveness and feasibility of our proposed technique. The experimental results show that in a 9×32 Gbaud PDM-16QAM system with 50 GHz channel spacing, the root means squared error and the mean absolute error are below 0.43 dB and 0.3 dB in the OSNR range of -1 dB to 30 dB, respectively. Even better, our proposed technique has the following advantages: higher monitoring accuracy; wider monitoring range; strong robustness to chromatic dispersion, polarization mode dispersion, nonlinear effect, and cascade filtering effect; no prior knowledge of link configuration required; low cost; distributed monitoring. Therefore, our proposed technique can realize OSNR monitoring at any node which is suitable for dynamically reconfigurable high-speed dense wavelength division multiplexing (DWDM) optical fiber communication systems and has huge development prospects and wide practical application potential.

Yan R, Hu C J, Li W. A novel optical signal-to-noise ratio monitoring technique based on Gaussian process regression[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(1): 200077; DOI: 10.12086/oe.2021.200077

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2018YFB2200900)

\* E-mail: weilee@hust.edu.cn