

引用本文: 曹荻非, 郝明祥, 孙晓川. 基于交叉递归图理论的光信道性能分析方法[J]. 光通信技术, 2023, 47(6): 29-31.

基于交叉递归图理论的光信道性能分析方法

曹荻非^{1,2}, 郝明祥^{1,2}, 孙晓川^{1,2*}

(1. 华北理工大学 人工智能学院, 河北 唐山 063210; 2. 河北省工业智能感知重点实验室, 河北 唐山 063210)

摘要: 为了及时准确地识别和处理光路故障, 实现透明和实时的网络智能化管理, 针对光信道状态性能监测提出一种基于交叉递归图理论的光信道性能分析方法。首先, 该方法利用交叉递归图可视化邻近信道的状态参数分析影响信道的动力学特性; 然后, 通过定量分析方法来量化 2 个序列系统的同步特性。仿真结果表明, 光信道性能与邻近信道状态参数具有相似的动力学形态, 证实了其潜在的关联特性。

关键词: 光纤与光网络; 光信道传输质量预测; 交叉递归图理论; 光纤损伤; 信道干扰

中图分类号: TN913.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)06-0029-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.06.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optical channel performance analysis approach based on cross recurrence plot theory

CAO Difei^{1,2}, HAO Mingxiang^{1,2}, SUN Xiaochuan^{1,2*}

(1. College of Artificial Intelligence, North China University of Science and Technology University, Tangshan Hebei 063210, China;

2. Hebei Key Laboratory of Industrial Intelligent Perception, Tangshan Hebei 063210, China)

Abstract: In order to identify and deal with optical path faults timely and accurately, and realize transparent and real-time network intelligent management, an optical channel performance analysis method based on cross recurrence plot theory is proposed for optical channel state performance monitoring. First, the method uses cross recurrence plot to visualize the state parameters of adjacent channels to analyze the dynamic characteristics of the channels. Then, the synchronization characteristics of the two sequential systems are quantified by quantitative analysis method. The simulation results show that the performance of optical channels has similar dynamic morphology with the state parameters of adjacent channels, which confirms their potential correlation characteristics.

Key words: optical fiber and optical networks, optical channel transmission quality prediction, cross recurrence plot theory, optical fiber impairment, channel interference

0 引言

为了实现光网络资源的合理分配, 保证光路连接的可用性, 需要根据光网络性能监测数据制定准确有效的光信道性能分析管理策略。而现有的研究主要使用光信道性能参数质量因子(QF)对光信道性能进行

单变量预测, 没有对光信道性能和邻近光信道状态参数(OCSP)之间的关联特性进行分析。实际上, 随着光网络的重新配置和调制方式的改变, 光信道的性能通常受到色散(CD)、偏振模色散(PMD)、光纤非线性、噪声和发射功率(TP)等多个 OCSP 的综合影响。因此, 仅仅对光信道性能参数进行建模和分析是不够的, 一旦忽略了邻近信道 OCSP 的影响, 将无法保证准确有效的光信道性能预测。

众所周知, 皮尔逊相关系数通常用于衡量 2 个正态分布时间序列之间的相关性。然而, 其改进算法容易受到局部趋势的影响, 而去趋势相关分析则仅从时间序列的部分特征估计 2 个序列之间的相关性^[2]。由于光信道参数数据通常具有显著的非平稳和混沌特

收稿日期: 2022-10-13。

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2021088)资助。

作者简介: 曹荻非(1997—), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 本科毕业于衡水学院物理与电子信息系, 现就读于华北理工大学人工智能学院通信工程专业, 主要研究方向是光纤光网络、数据挖掘、储备池计算理论和 6G 移动通信等。

* 通信作者: 孙晓川(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为机器学习和储备池计算。



曹获非,郝明祥,孙晓川: 基于交叉递归图理论的光信道性能分析方法

性,因此上述方法难以有效预测光信道性能与邻近信道 OCSF 的相关性。交叉递归图理论(CRPT)是一种强大的非线性分析工具,被广泛应用于预测无序列长度和分布依赖性的混沌信号序列的复杂特性,包括交叉递归图(CRP)和交叉递归定量分析(CRQA)。CRPT 通过从动力学特性角度对光信道性能和 OCSF 潜在关联进行分析,以及量化邻近信道 OCSF 对光信道性能的影响程度,直观地揭示了光信道性能和 OCSF 之间的联系。

鉴于此,本文提出一种基于 CRPT 的光信道性能分析方法,通过交叉递归分析探索光信道间隐藏和潜在的关联特性。

1 基于 CRPT 的光信道性能分析方法

CRPT 分析提供了 CRP 的可视化和 CRQA 的测量。CRP 的主要目的是将不同 OCSF 时间序列与光信道性能序列间的动力学特性可视化。相空间重构的过程如下:首先,将上述 2 个序列映射到同一个高维空间,这个过程由最小延迟时间 t 和最大嵌入维度 d 这 2 个因素决定。重构参数(REP)是通过互信息法(MI)^[4]和虚假最近邻法(FNN)这 2 个方法来计算的。最后,得到这 2 个序列的交叉递归矩阵 $R_{i,j}(\varepsilon)$ 如式(1)所示。

$$R_{i,j}(\varepsilon) = \Theta(\varepsilon - \|F_i - F_j\|) \quad (1)$$

其中, F_i 和 F_j 分别为 OCSF 序列和光信道性能序列, i, j 均为非零自然数, ε 为距离阈值, $\Theta(\cdot)$ 为赫维赛德函数,定义为

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

在矩阵中,如果光信道性能序列 F_j 和 OCSF 序列 F_i 的运动轨迹距离大于 ε , 则 $R_{i,j}(\varepsilon) = 0$, 否则 $R_{i,j}(\varepsilon) = 1$, 这分别对应了 CRP 中白色点和黑色点的分布,进而形成了动力学系统的典型特征,通过这些图

形的特征可以分析出 OCSF 序列和光信道性能序列的关联程度。在 CRP 中,水平或垂直线段表示 OCSF 序列与光信道性能序列在特定时刻具有相似的动力学形态,而对角线线段则表示 OCSF 序列在这段时间内与光信道性能序列有相近的运动状态。离散或独立的点表示 OCSF 序列与光信道性能序列的关联特性较弱。

CRQA 可以对 CRP 中的水平线段、垂线段、对角线段进行量化分析,通过数值表示出 OCSF 和光信道性能之间的潜在动力学特性。本文将使用递归率(RR)、确定性(DET)和层流特性(LAM)这 3 个指标来描述上述典型的结构特征。RR 提供了一个关于从 CRP 中得出的递归点密度的衡量标准,它定义了黑点与所有递归点的比例;DET 表示与主对角线平行的线段的递归点与全部递归点的比率,它度量了时序变化的可预测性和规律性;LAM 描述了形成垂线的递归点占有递归点的百分比,表示系统中层流特性的存在情况。

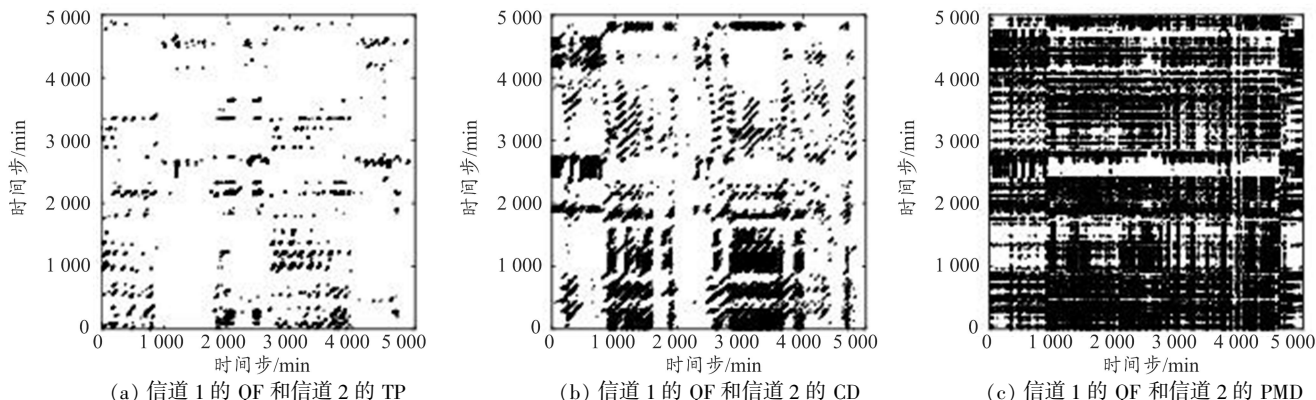
2 Matlab 仿真分析

2.1 数据集描述

本文采用的数据集涵盖了 2015 年 2 月至 2016 年 4 月期间来自北美微软广域光骨干网中的数据,包含 50 个光交叉连接、100 个广域网(WAN)段和 1 000 个光信道,涉及 QF、TP、CD 和 PMD 等 4 个参数,其中 QF 是衡量光信道性能的关键参数。仿真实验选择了 WAN 光段 1 中的信道 1、信道 2 和信道 5 的数据作为分析目标,旨在探索光信道 QF 与邻近信道 OCSF 之间的影响机制。

2.2 动力学特性展示

信道 1 的 QF 与信道 2、信道 5 的 OCSF 间的 CRP 如图 1 所示。可以看出,图 1(a)中的数据点呈现随机



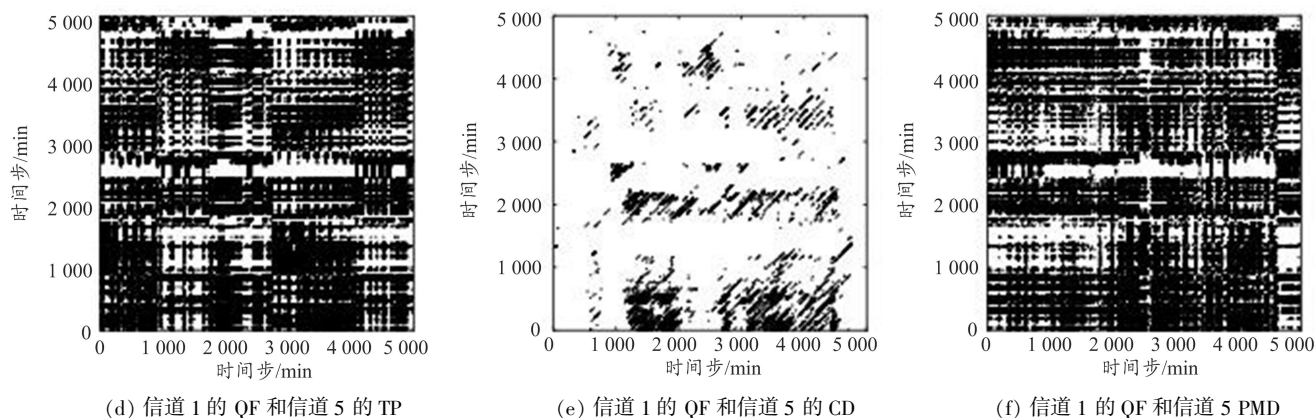


图1 信道1的QF与信道2、信道5的OCSP间的CRP

分布,这表明了信道2的TP与信道1的QF之间存在微弱的相关性。图1(b)则展示了层流结构以及某些对角线特征结构,而图1(c)则大量展示了层流结构的存在。这些特征表明信道1的QF与信道2的CD、PMD之间的相似性较为显著。同样,图1(d)展现的分布特征与图1(c)高度相似,这意味着信道5的TP与信道1的QF序列之间具有高度的同步性。图1(e)的对角线结构有限,黑色聚集点较少,证明2个序列的相关性较弱。图1(f)表现出明显的层流特性,表明信道5的PMD与信道1的QF的运动状态相似。

2.3 定量度量分析

CRP有时难以直观地捕捉光信道性能与OCSP序列系统的同步特征。因此,对QF和每个OCSP之间的具体递归量进行定量度量是至关重要的。信道1的QF与信道2、信道5的OCSP定量分析结果如表1所示。可以看出,在信道1与信道2的关联特性分析中,信道2的PMD具有最高的RR和LAM,这表明这2个序列的相似状态随着时间的推移而频繁出现,系统动力学特性相对稳定;CD具有最大的DET,证明了两序列系统保持在相空间同一区域时间比例较大。在信道1与信道5的关联特性分析中,信道5的TP具有最高

表1 信道1的QF与信道2、信道5的OCSP定量分析结果

OCSP	RR	DET	LAM	GeoM
信道2的TP	0.000 5	0.149 0	0.455 4	0.033 3
信道2的CD	0.004 7	0.365 2	0.648 7	0.103 6
信道2的PMD	0.016 0	0.084 4	0.738 8	0.099 9
信道5的TP	0.053 2	0.546 7	0.822 4	0.288 2
信道5的CD	0.000 4	0.122 4	0.345 7	0.026 3
信道5的PMD	0.016 4	0.147 6	0.713 8	0.120 1

的RR、DET、LAM,它们的含义与上述一致。

虽然所有的RR、DET和LAM都能准确地度量OCSP对光信道性能的影响程度,但它们的决策标准却导致了不同的结论。为了解决这个问题,本文采用了具有不受极端值影响的几何平均策略(GeoM)来全面评估这种影响程度。GeoM值越高,光信道性能序列与OCSP序列的关联性就越强。从表1可以看出,信道2的CD和信道5的TP是信道1的QF影响较大的OCSP。

3 结束语

本文研究了基于CRPT的新颖光信道性能分析方法,通过CRP可视化了邻近信道OCSP与光信道性能的动力学特性,并利用CRQA量化了这些特征。仿真结果表明,邻近信道的OCSP与光信道性能存在明显的递归特性,并证实了其潜在的关联影响。因此,本文提出的分析框架可以有效捕捉影响光信道性能的关键参数,从而更好地为传输性能预测提供先验知识,并有效地预警光网络异常行为的变化。

参考文献:

- [1] LI C, ZHANG F, ZHANG L, et al. Inter-channel fiber nonlinearity mitigation in high baud-rate optical communication systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 39(6): 1653–1661.
- [2] ZHOU J, HUA Z. A new tendency correlation coefficient for bivariate time series [J]. Rendiconti Lincei Scienze Fisiche e Naturali, 2021, 32(3): 479–491.
- [3] LI Y, CAI D, WANG J, et al. Recurrence behavior statistics of blast furnace gas sensor data in industrial internet of things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 5666–5676.
- [4] AMIRI A, SAMET H, GHANBARI T. Recurrence plots based method for detecting series arc faults in photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(6): 6308–6315.