

doi:10.13756/j.gtxyj.2024.230064.

光通信系统与网络技术

安宁. 全光通信网络非线性突变频率干扰检测算法[J]. 光通信研究, 2024(3):230064.

An N. Nonlinear Mutation Frequency Interference Detection Algorithm for All Optical Communication Networks[J]. Study on Optical Communications, 2024(3): 230064.

全光通信网络非线性突变频率干扰检测算法

安宁

(国家电网公司东北分部, 沈阳 110180)

摘要:【目的】针对全光通信网络非线性突变频率干扰问题进行分析时,主要依托于估计信道协方差直接展开干扰检测,并未展开网络通信信号变换处理,使得检测结果的 F_1 -score 值较低,为此提出了基于时域有限差分的全光通信网络非线性突变频率干扰检测算法。【方法】结合数据包抓包和镜像两种方式采集全光通信网络流量数据,并进行清理、转换和规约处理。依托于时域有限差分工作原理,在时域和频域空间内描述信号的时宽和带宽,应用导数与傅里叶变换算法对实时采集信号进行处理,利用变换后的信号分析非线性突变频率干扰情况,再针对变换后的信号进行检测分析。在时间-频率联合特征分析方法辅助下,提取干扰信号的时域、频域特征,依托于反向传播算法和最小化损失函数,简化非线性突变频率干扰检测过程,采用特征距离函数替换网络损失函数,并将其输入基于孪生网络的干扰识别模型中,得出非线性突变频率干扰检测结果。【结果】在不同噪声条件下,所提算法非线性突变频率干扰检测结果的 F_1 -score 值保持在 0.95 以上,检测时间低于 40 ms。【结论】应用时域有限差分方法的新型检测方法,能够更准确地反映当前通信网络的干扰情况,保证通信网络正常运行,更好地满足了全光通信网络干扰检测要求。

关键词:全光通信网络;非线性突变频率干扰;时域有限差分;通信信号;信号变换;干扰检测

中图分类号:TN912

文献标志码:A

Nonlinear Mutation Frequency Interference Detection Algorithm for All Optical Communication Networks

AN Ning

(Northeast Branch of State Grid Company, Shenyang 110180, China)

Abstract: 【Objective】When analyzing the nonlinear mutation frequency interference problem in all optical communication networks, interference detection mainly relies on estimating channel covariance directly, without expanding network communication signal transformation processing, resulting in low F_1 -score values of the detection results. Therefore, a nonlinear abrupt frequency interference detection algorithm based on finite difference time domain is proposed for all-optical communication networks. 【Methods】We collect all optical communication network traffic data by combining packet capturing and mirroring methods, followed by cleaning, conversion, and protocol processing. Relying on the working principle of finite difference time-domain method, we first describe the time width and bandwidth of the signal in time-domain and frequency-domain space. Then we apply derivative and Fourier transform algorithm to transform the real-time collected network communication signal. Next, we use the transformed signal to analyze the nonlinear abrupt frequency interference. Finally the transformed signal is detected and analyzed. With the aid of the time-frequency joint feature analysis method, the time-domain and frequency-domain features of the interference signal are extracted. Relying on the back propagation algorithm and the minimization of the loss function, the detection process of nonlinear abrupt frequency interference is simplified. The characteristic distance function is used to replace the network loss function, and it is input into the interference recognition model based on the twin network to obtain the detection results of nonlinear abrupt frequency interference. 【Results】The experimental results show that under different noise conditions, the F_1 -score value of the proposed algorithm's nonlinear mutation frequency interference detection results remains above 0.95. The detection time is less than 40 ms. 【Conclusion】The new detection method using the finite difference time-domain method can more accurately reflect the interference situation of the current communication network. It ensures the normal operation of the communication network, and meets the interference detection requirements of all-optical communication network.

Key words: all optical communication network; nonlinear mutation frequency interference; finite difference time domain; communication signal; signal transformation; interference detection

0 引言

全光通信网络的入侵干扰信号检测是保证通信网络安全运行的关键,近年来,针对网络干扰信

号的检测算法相继被提出^[1-2]。文献[3]针对通信网络流量数据进行预处理,再将数据划分为多个簇,得出通信网络异常入侵检测结果,但该方法计算过程复杂,干扰检测耗时较长。文献[4]考虑了

收稿日期:2023-04-28; 修回日期:2023-06-05; 纸质出版日期:2024-06-10

作者简介:安宁(1980—),男,辽宁沈阳人。高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统通信。

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

通信网络出现的几种主要干扰信号类型,通过二阶时变检测函数推算出信号检测的决策量,再与门限值进行对比,输出干扰信号检测结果,但该方法检测结果虚警概率较大。文献[5]在检测突变非线性多频干扰时,先考虑通信数据的横向和纵向分布特点,得到非线性多频干扰检测结果,但算法的可靠性较差。

从上述分析可以看出,传统通信网络干扰检测算法存在较多不足之处,为了更好地保证全光通信网络稳定、安全运行,本文提出一种结合时域有限差分算法的非线性突变频率干扰检测算法。

1 基于时域有限差分的全光通信网络非线性突变频率干扰检测算法设计

1.1 全光通信网络流量数据预处理

在全光通信网络干扰检测过程中,先利用数据包抓包策略、全镜像策略,全方面采集网络流量数据。考虑这些流量数据可能存在噪声数据和空缺数据^[6],使得非线性突变频率干扰检测结果出现误差,需要通过清理、转换和规约3个环节完成数据序列预处理。

网络通信数据的清理,主要针对错误和重复的“脏数据”,考虑这些数据出现的原因,提出包含删除、填充等多个环节的数据清理手段。而数据转换的实现,可通过Excel中的归纳、切换等操作^[7],将所有全光通信网络流量数据都转换为数值数据。

在数据预处理的最后一个环节,针对数据的大量属性信息进行规约处理,从所有流量数据中选取最优属性,基于此展开规约处理,计算过程可表示为

$$L' = \frac{L_o - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} \alpha + \beta, \quad (1)$$

式中: L' 为规约后流量数据; L_o 为第 o 个流量数据; $L_{\max}$ 、 $L_{\min}$ 分别为数据集中最大流量数据和最小流量数据; $[\alpha, \beta]$ 为数据规约范围。

通过上述处理得到规约后的全光通信网络流量数据,将其看作非线性突变频率干扰检测的基础。

1.2 设计基于时域有限差分的数据转换方法

依托于有限差分方式下麦克斯韦方程组,建立时域有限差分方法,基于此对预处理后的通信数据进行转换,以避免外界环境影响,准确检测出非线性突变频率干扰^[8]。实际操作过程中,需要模拟空间网格化的处理电磁场,对通信干扰信号进行一系列空间坐标转换,这一过程中涉及的麦克斯韦方程

组为

$$\begin{cases} \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} = \epsilon \frac{\partial \eta_x}{\partial x} + \theta \eta_x \\ \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} = \epsilon \frac{\partial \eta_y}{\partial y} + \theta \eta_y, \\ \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} = \epsilon \frac{\partial \eta_z}{\partial z} + \theta \eta_z \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta_z}{\partial y} - \frac{\partial \eta_y}{\partial z} = -\lambda \frac{\partial A_x}{\partial x} + \theta A_x \\ \frac{\partial \eta_x}{\partial z} - \frac{\partial \eta_z}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial A_y}{\partial y} + \theta A_y, \\ \frac{\partial \eta_y}{\partial x} - \frac{\partial \eta_x}{\partial y} = -\lambda \frac{\partial A_z}{\partial z} + \theta A_z \end{cases} \quad (3)$$

式中: ∂ 为偏导数; (x, y, z) 为空间坐标系; A 为磁场强度; ϵ 为介电常数; η 为电场强度; θ 为等效导率; λ 为磁导率。

结合式(2)和式(3)形成中心差分方程,基于此对预处理后的通信网络信号数据进行转换。先建立一个全部空间电磁场^[9],在磁场中重新得到通信信号,并对其进行基础变换。其中,实时采集的通信信号 $\varsigma(u)$ 可表示为

$$\varsigma(u) = \chi f^{k(u-v)\varphi g}, \quad (4)$$

式中: u 为信号传递因子; v 为传递时延因子; χ 为信号波谱宽度; f 为信号传输距离; φ 为二维空间坐标参数; g 为采集频率; k 为窗口函数。对于网络通信信号来说,其对应的 q 阶导数可以表示为

$$G_q(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi(u, v), \quad (5)$$

式中, G 为通信信号的导数; t 为信号采集时间; ϕ 为信号转换因子。在确定信号采集时间间隔后,若间隔较短,可以建立式(6)所示的信号短时傅里叶变换表达式:

$$G_q(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} t(u) k(u-v) \phi(u, v). \quad (6)$$

针对通信信号进行傅里叶变换时,窗口大小会影响变换后信号的结构变化。在选择窗口时,先在时域和频域空间内描述信号的时宽和带宽。

$$\begin{cases} \iota_\varsigma = \int (u - K_1)^2 \\ \psi_\varsigma = \int (v - K_2)^2 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: ι 为信号时宽; ψ 为信号带宽; K_1 为初始时域转换因子; K_2 为初始频域转换因子。以信号时宽和带宽计算结果为依据,定义合适的傅里叶变换窗口尺寸为

$$\sigma = \min(\iota_\varsigma^2 + \psi_\varsigma^2)^{1/2}, \quad (8)$$

式中, σ 为窗口大小。在确定了窗口尺寸后, 基于该窗口对采集的全光纤网络通信信号进行变换, 并利用变换后的信号分析非线性突变频率干扰情况。

1.3 提取网络干扰信号特征

从变换后的全光网络通信信号入手, 建立一个干扰信号传输模型, 并引入时间-频率联合特征分析原理, 提取网络干扰信号特征。具体过程为: 先确定通信网络中数据传输路径的条数, 并针对每条信号传递路径定义其在干扰环境下对应的传递函数。确定全光通信网络内信号传播延时和传输损失, 建立网络信号传输的特征分布函数, 并展开干扰信号特征分布空间重构处理, 获取非线性突变频率干扰信号的频谱特征:

$$\begin{cases} \tau(t) = \sqrt{f} \varpi(gt) \\ W(t, \psi) = W_{\varpi}(gt, \psi/g) \end{cases} \quad (9)$$

式中: τ 为干扰信号的信息时间序列时域; ϖ 为非线性时间序列的时频特征; g 为传递系数; ψ 为非线性突变概率值; W 为信息频域伸缩尺度。应用时频特征分析法进一步研究, 得出干扰信号的时域特征与频域特征:

$$\begin{cases} W_{\varpi}(t, \psi) = D(t) \Phi(t) e^{-2\psi} \\ W_{\varpi}(t, \psi) = D(\psi + 2\rho) \Phi(\psi - 2\rho) e^{-2\rho} \end{cases} \quad (10)$$

式中: Φ 为非线性时间序列复共扼; D 为输入的原始信号序列; ρ 为信道衰减系数; e 为指数函数。

1.4 实现网络非线性突变频率干扰检测

明确了全光通信网络干扰信号特征后, 为了得出较为准确的干扰检测结果, 设计以孪生网络为核心的干扰识别模型^[10], 通过计算两个特征之间的距离,

明确当前通信网络是否存在非线性突变频率干扰。

基于孪生网络的非线性突变频率干扰识别模型主要包含两个结构相同的单边网络, 如图 1 所示。

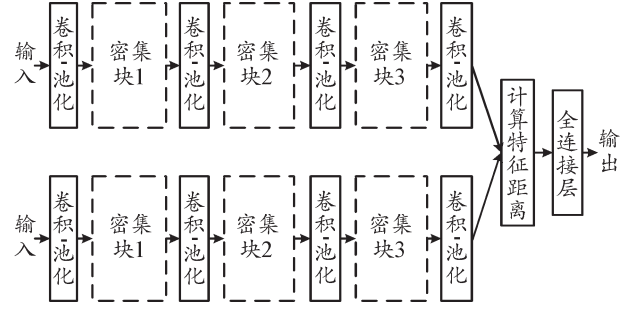


图 1 基于孪生网络的干扰检测结构

Figure 1 Interference detection structure based on twin networks

图中两个子网络参数共享, 而在进行参数优化时, 需要依托于反向传播算法和最小化损失函数, 成对进行数据训练。为了简化非线性突变频率干扰检测过程, 采用特征距离函数替换网络损失函数, 得到改进后的孪生网络, 并在孪生网络尾部建立包含一个神经元和一个修正线性单元 (Rectified Linear Unit, ReLU) 激活函数的全连接层, 对比特征距离和预先设定的判断阈值, 输出网络非线性突变频率干扰检测结果。

2 实 验

2.1 实验准备

为了检验所提算法针对全光通信网络中非线性突变频率干扰进行准确检测的有效性, 进行实验分析。为了确保实验结果的真实性和准确性, 参考典型的矿井全光通信网络建立图 2 所示的实验装置结构图。

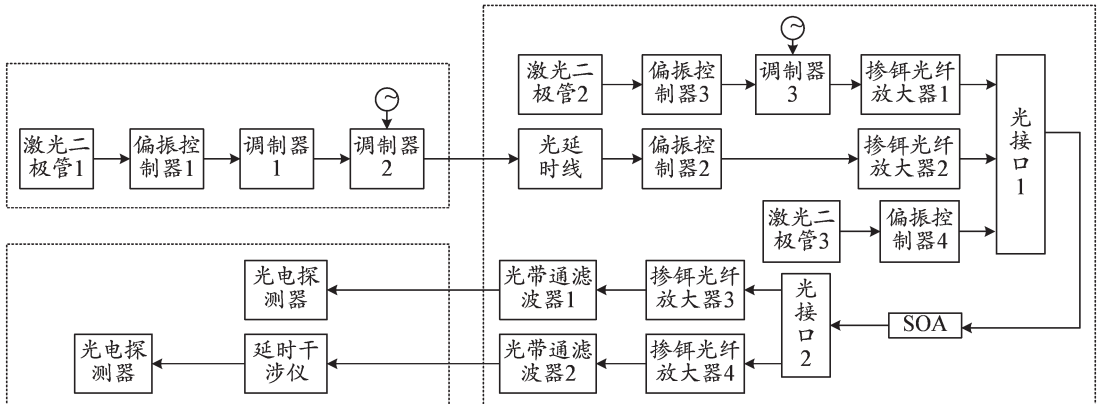


图 2 实验装置图

Figure 2 Experimental setup

如图 2 所示, 全光通信网络对激光二极管采集的激光信号进行偏振控制, 抑制谐波。光纤信号通过调制器调制为电信号, 通过放大器放大, 接入光

接口, 再经过半导体光放大器 (Semi-conductor Optical Amplifier, SOA) 后, 转入光接口 2, 通过放大和滤波进入光电探测器, 转换为通信信号。由图可以

看出,全光通信网络中传输的信号频率经过了多次放大和调制后,容易失真和受到干扰,因此采用本文方法对光电探测器输出的通信信号进行频率干扰检测。

在上述实验环境下进行非线性突变频率干扰检测分析时,考虑当前网络通信存在的5种典型干扰类型,添加对应的干扰信号。各种干扰信号的相关参数如表1所示。

表1 干扰信号参数

Table 1 Interference signal parameters

干扰类型	参数设置
单音	频点位置随机分布
多音	音频数量:5~15个
调频	调频系数:0.125~0.933 Hz/s
扫频	带宽因子:0.5~1.0
脉冲	脉冲持续时间:0.5~10.8 s

在实验环境下设置不同类型的干扰信号,并驱动全光通信网络运行,采用上文提出的时域有限差分检测算法进行干扰检测,记录检测结果。此外,在同样的条件下,分别应用文献[3]和[4]提出的方法进行干扰检测,再将检测结果与本文所提方法的检测结果进行对比,从而验证所提检测算法的优越性。

2.2 网络通信信号处理

在非线性突变频率检测过程中,需要先对网络通信信号进行低通滤波处理。图3所示为滤波前后通信网络信号,以某一时刻的非线性突变频率干扰信号为例,其在滤波前信号波形如图3(a)所示,而在完成信号去噪处理后,得到图3(b)所示的通信网络信号曲线。

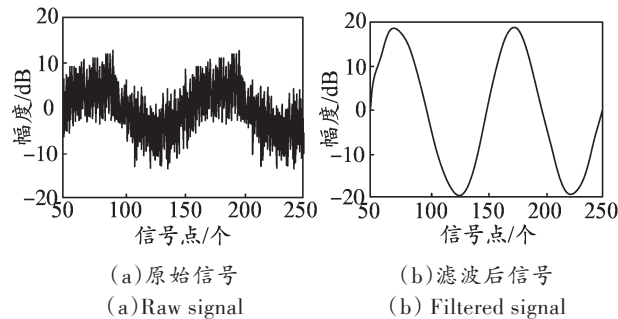


图3 滤波前后通信网络信号

Figure 3 Communication network signals before and after filtering

根据时域有限差分原理对滤波后的全光通信网络信号做进一步处理,得到分数阶傅里叶变换结果。最终得到图4所示的时频域上干扰信号的分数阶傅里叶变换图。

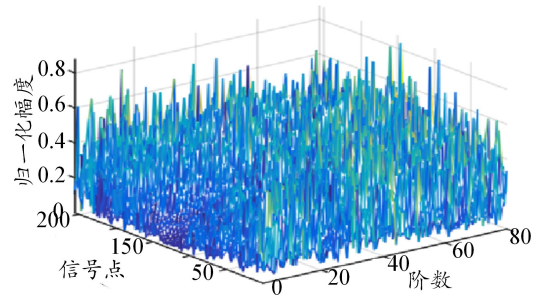


图4 干扰信号的分数阶傅里叶变换图

Figure 4 Fractional Fourier transform diagram of interference signal

完成干扰信号傅里叶变换的同时,建立图5所示的非线性突变频率干扰时频图。由图可知,当前干扰信号带宽能量主要分布在2.5~5.0 MHz之间,并且该带宽内能量分布较为杂乱,而其他带宽内无能量分布。对整个时间段的带宽信号进行观察,可以确定当前通信网络存在非线性突变频率干扰情况,且具体干扰类型为噪声调频干扰。

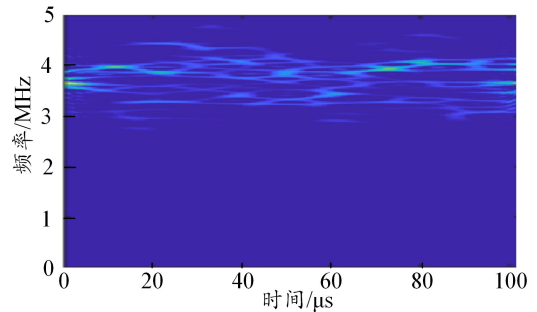


图5 非线性突变频率干扰时频图

Figure 5 The time-frequency diagram of nonlinear mutation frequency interference

2.3 检测算法性能对比

应用3种方法进行数次干扰检测后,记录每种方法的检测结果,并采用 F_1 -score分数作为干扰检测结果的衡量指标:

$$F_1 = 2 \times \frac{p \times r}{p + r}, \quad (11)$$

式中: F_1 为精确率与召回率的调和平均值; p 为通信干扰检测的精确率; r 为通信干扰检测的召回率。通过式(11)计算后,兼顾召回率和精准度衡量各种方法的干扰检测结果,不同方法检测结果的 F_1 -score对比如图6所示。

由图可知,应用时域有限差分检测算法,在不同信噪比环境下进行全光通信网络非线性突变频率干扰检测,所得检测结果的 F_1 -score值始终保持在0.95以上。而其他两种方法最初 F_1 -score仅为0.65和0.54,直到信噪比提升至16 dB, F_1 -score

值才分别提升至 0.92 和 0.88。

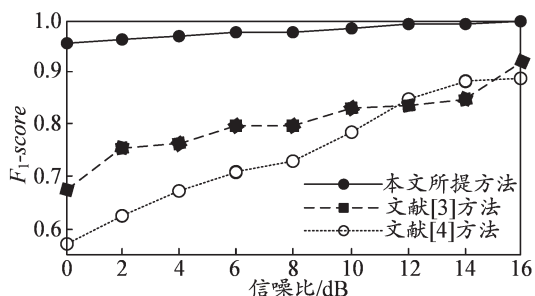


图 6 不同方法检测结果的 F_1 -score 对比

Figure 6 F_1 -score comparison of detection results using different methods

应用 3 种方法进行数次干扰检测后,记录每种方法的检测时间如表 2 所示,并采用检测时间作为干扰检测算法复杂度的衡量指标。算法越复杂,检测时间越长。

表 2 干扰检测时间

Table 2 Interference detection time

干扰信号点/个	检测时间/ms		
	本文方法	文献[3]方法	文献[4]方法
50	15.6	21.8	19.7
100	26.2	33.4	27.8
150	31.8	39.2	36.4
200	36.7	43.3	41.9
250	39.6	51.8	49.8

由表可知,本文方法简化了非线性突变频率干扰检测过程,采用特征距离函数替换网络损失函数,降低了算法复杂度,因此检测时间较短,一直在 40 ms 以下。而其他两种算法的复杂度较高,因此检测时间较长。

3 结束语

全光通信网络应用范围越来越广泛,对非线性突变频率干扰的检测逐渐被重视。本文以提升干扰检测质量为目标,提出一种基于时域有限差分的新检测方法。实验结果表明,该算法能提高检测准确率,为推动全光通信网络发展提供了参考。

参考文献:

- [1] 杨海宁,李昆,初大平. 硅基液晶技术与可重构全光通信网络[J]. 液晶与显示,2021,36(6):772-788.
Yang H N, Li K, Chu D P. Liquid Crystal on Silicon Technology and Reconfigurable All-optical Networks [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021,36(6):772-788.
- [2] 陈晓威,杨文革. 基于时变白化滤波器的 DSSS 系统干扰盲检测[J]. 系统工程与电子技术,2021,43(7):

1981-1988.

Chen X W, Yang W G. Blind Jamming Detection based on Time Variant Whitener for DSSS Systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(7): 1981-1988.

- [3] 曾宏志,史洪松. 面向光通信网络系统的异常入侵在线检测研究[J]. 激光杂志,2022,43(12):139-143.
Zeng H Z, Shi H S. Research on Abnormal Intrusion Online Detection for Optical Communication Network Systems[J]. Laser Journal, 2022, 43(12): 139-143.
- [4] 王晓惠,冯彩英. 基于子波变换的无线通信网络干扰信号检测研究[J]. 激光与红外,2022,52(6):875-880.
Wang X H, Feng C Y. Research on Interference Signal Detection based on Wavelet Transform in Wireless Communication Network [J]. Laser & Infrared, 2022, 52(6):875-880.
- [5] 李丽艳,胡鸿豪,王云兴. 电子通信非线性突变频率干扰检测与仿真[J]. 计算机仿真,2022,39(9):471-475.
Li L Y, Hu H H, Wang Y X. Detection and Simulation of Nonlinear Abrupt Frequency Interference in Electronic Communication [J]. Computer Simulation, 2022, 39(9):471-475.
- [6] 谭韶生,夏旭. 基于大数据优化神经网络的船舶通信网络干扰信息识别[J]. 舰船科学技术,2022,44(14):133-136.
Tan S S, Xia X. Disturbance Information Identification of Ship Communication Network based on Big Data Optimization Neural Network [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(14): 133-136.
- [7] 赵凤龙. 大数据资源调度下船舶通信网络干扰信息识别研究[J]. 舰船科学技术,2022,44(12):133-136.
Zhao F L. Research on Interference Information Identification of Ship Communication Network based on Big Data Resource Scheduling [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(12): 133-136.
- [8] 靳增源,张晓瀛,谭思源,等. 基于集成时频通道注意力的倒残差神经网络干扰识别[J]. 信号处理,2023,39(2):343-355.
Jin Z Y, Zhang X Y, Tan S Y, et al. Jamming Identification based on Inverse Residual Neural Network with Integrated Time-frequency Channel Attention [J]. Journal of Signal Processing, 2023, 39(2): 343-355.
- [9] 刘明骞,高晓腾,李明,等. 空地协同场景下通信干扰智能识别方法[J]. 电子与信息学报,2022,44(3):825-834.
Liu M Q, Gao X T, Li M, et al. Communication Interference Intelligent Recognition in the Air-to-ground Collaboration Scenario [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 825-834.
- [10] 赵伟,王文娟. 基于深度信念网络的光通信网络数据异常识别研究[J]. 激光杂志,2023,44(1):174-178.
Zhao W, Wang W J. Research on Data Anomaly Identification of Optical Communication Network based on Deep Belief Network [J]. Laser Journal, 2023, 44(1): 174-178.