

## 光网络中基于小波变换的链路故障监测算法

熊余<sup>1,2</sup>, 刘晓清<sup>1\*</sup>, 彭海英<sup>1</sup>, 王汝言<sup>1</sup>

(1. 重庆邮电大学 重庆光纤通信技术重点实验室, 重庆 400065; 2. 重庆大学 计算机学院, 重庆 400044)

(\* 通信作者电子邮箱 qing\_sl@foxmail.com)

**摘要:**针对光网络中传统故障监测方法误差大、速度慢等问题,提出一种基于小波变换的链路故障监测算法。在该算法中采用动态周期轮询的方法监测链路光功率,利用小波变换在时—频域上的良好局部特性提取监测值中的故障信息。算法对监测到的光功率值进行多尺度分解以降低噪声影响,从而提高故障监测的准确性。仿真结果表明,与时域的分析方法相比,基于小波变换的故障监测算法能够较好地克服噪声影响,漏警率减少到0,误警率降低了5个百分点;而且实验环境下的故障监测时间为2.53~3.12 ms,能够满足实时需要。

**关键词:**光网络;小波变换;故障监测;光功率;奇异性监测

**中图分类号:** TP393.06 **文献标志码:** A

### Link fault monitoring in optical networks based on wavelet transform

XIONG Yu<sup>1,2</sup>, LIU Xiaoqing<sup>1\*</sup>, PENG Haiying<sup>1</sup>, WANG Ruyan<sup>1</sup>

(1. Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Communication, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The traditional fault monitoring methods have some problems such as great deviation and slow speed. To solve these problems, a link fault monitoring algorithm based on the wavelet transform was presented. This algorithm used the dynamic polling scheme to detect the optical power and used the local characteristic in time-frequency domain of the wavelet transform to extract the fault information from the detection value. The monitoring optical power value was decomposed with multi-scale to eliminate the effects of noise, thereby improving the accuracy of the fault monitoring. The experimental results show that compared to the analytical methods in time domain, the proposed fault monitoring algorithm based on wavelet transform is better to overcome the effects of noise. The leakage alarm rate is reduced to zero and the false alarm rate is decreased by five percentage. The monitoring time is between 2.53 ms and 3.12 ms, which can meet the real-time requirement.

**Key words:** optical network; wavelet transform; fault monitoring; optical power; singularity monitoring

## 0 引言

随着光网络的快速发展,特别是密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)技术的商用,使得单根光纤可以支持 Tb/s 的业务速率。巨大的业务传输容量使得网络的生存性(survivability)问题更为突出。生存性是指网络发生故障时恢复受损的业务,使网络维持可以接受业务水平的能力。网络生存性的实现可以分为故障监测、故障定位、故障通知和故障恢复<sup>[1-2]</sup>。其中故障监测是采集网络中的数据信息以快速准确地发现故障。在光网络的生存性技术中,故障监测是业务恢复的前提和保障,只有在及时发现故障之后才能实现丢失业务的迅速恢复<sup>[3]</sup>。

在透明光网络中,信号不再像传统非透明网络中那样经历电再生,所以发生在物理层的故障更加难以监测。对光网络物理层参数的监测主要分光信号特征参数监测和光信号质量监测两类。其中监测的光信号特征参数包括光功率、光信噪比(Optical Signal to Noise Ratio, OSNR)和偏振模色散(Polarization Mode Dispersion, PMD)等,监测的光信号质量参数包括误码率、Q值、眼图张开度、同步和异步幅度直方图

等<sup>[4-5]</sup>。其监测技术主要有副载波复用、Q因子法、直方图法等。文献[6]中利用副载波复用监测网络状态,通过分析光信号随路的副载波信号获得光信号状态值,这些副载波随相应的光波信号在网络中传输,与光波信号受到相同的损伤,因此可以通过监测副载波的损伤情况来估算光信号的损伤情况,从而发现网络故障,但该方法成本较高且耦合获取副载波时会对光信号带来损伤;文献[7-8]描述了一个光Q值表(Optical Q-Meter, OQM),该值能快速且可靠的估计信号的误码率,该方法能带内、带外测量且与数据格式、线速等无关,但其监测参数Q值为网络状态的间接反映;文献[9-11]利用异步幅度直方图对信号进行光信噪比及色散监测,能同时监测多个参数,但该方法的监测参数与分析参数为间接关系,只能侧面反映光信号特征的参数。可见,现有光网络物理层的故障监测算法尚存在以下问题:1)间接提取监测参数,故障感知的实时性低;2)主要在时域对光信号分析,噪声对监测的准确性影响大。

为此,本文针对光功率这一直接特征参数,提出一种光网络链路失效下基于小波变换理论的故障监测(Failures Monitoring based on Wavelet Transform, FMWT)算法。该算法

**收稿日期:** 2012-08-08; **修回日期:** 2012-09-25。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60972096, 61001105); 重庆市自然科学基金资助项目(2011BA2041); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ110531); 重庆市高校优秀人才支持计划项目(2011-29)。

**作者简介:** 熊余(1982-),男,四川资中人,讲师,博士研究生,CCF会员,主要研究方向:宽带网络可靠性理论及抗毁技术; 刘晓清(1986-),女,重庆人,硕士研究生,主要研究方向:光通信网络故障管理; 彭海英(1973-),女,四川广安人,副教授,硕士,主要研究方向:下一代互联网、光交换; 王汝言(1969-),男,湖北浠水人,教授,博士,CCF会员,主要研究方向:全光网络、下一代光网络故障管理机制、多媒体信息处理。

利用小波变换在时域和频域的良好特性,对监测的光功率进行分析,并根据小波变换奇异性监测原理<sup>[12]</sup>提取信号的异常点,实现对光网络故障的准确实时监测。

## 1 小波变换故障监测模型

小波变换<sup>[13]</sup>是时间(空间)和频率上的局部变换,通过平移和伸缩变换对函数或信号的多尺度细分,从而实现信号中有效信息的提取。光功率在网络发生故障时会有突变,因此可以利用小波变换提取信号有效信息的特点,获取光功率信号的突变信息,通过对小波系数的分析完成故障的监测。

### 1.1 小波变换奇异性监测原理

通常情况下,称能够无限次求导的函数是连续的或无奇异性的,若函数在某一点不可导,则称该函数在该点具有奇异性,该点称为该函数的奇异点。在小波变换中,信号的突变点即为信号的奇异点。信号中的奇异点带有比较重要的信息,是信号重要的特征之一。

函数局部奇异性用 Lipschitz 指数来描述<sup>[14]</sup>。下面给出信号奇异度的一般定义。

**定义1** 设  $n$  是一非负整数,  $n < \alpha \leq n+1$ , 如果存在两个常数  $A$  和  $h_0 (> 0)$ , 及  $n$  次多项式  $P_n(h)$ , 使得对任意的  $h \leq h_0$ , 均有

$$|f(x_0 + h) - P_n(h)| \leq A|h|^\alpha \quad (1)$$

则说  $f(x)$  在点  $x_0$  为 Lipschitz  $\alpha$ 。

如果  $\alpha = 1$ , 则说明该函数在  $x_0$  点连续, 可微, 不具有奇异性; 若  $\alpha = 0$ , 则说明该函数在  $x_0$  点间断。  $\alpha$  的值越大则表明函数在该点越规则, 越接近平滑; 反之,  $\alpha$  的值越小则函数在该点的变化越尖锐。

在小波变换中局部奇异性可定义如下。

**定义2** 设  $f(x) \in L^2(\mathbf{R})$ ,  $\forall x \in \delta x_0$ , 小波  $\psi(x)$  是实函数并且连续可微, 具有  $n$  ( $n$  为正整数) 阶消失矩, 有

$$|Wf(s, t)| \leq Ks^\alpha; K \text{ 为常数} \quad (2)$$

则称  $\alpha$  为  $x_0$  点的奇异性指数, 其中  $s$  为分解尺度。

$$Wf(s, t) = \int_{\mathbf{R}} f(x) \psi_{s,t}(x) dx \quad (3)$$

式(3)表示的是函数  $f(x)$  在尺度  $s$  下的小波系数。

**定义3** 对  $\forall x \in \delta x_0$ , 有

$$|Wf(s, t)| \leq |Wf(s, 0)| \quad (4)$$

则称  $x_0$  为小波变换在尺度  $s$  下的局部极大值点,  $Wf(s, 0)$  表示的是函数  $f(x)$  在  $x_0$  点平移量为 0 时尺度  $s$  下的小波系数。

在故障监测过程中, 监测到的信号都是由有用信号和噪声信号叠加而成, 其小波变换是两个部分信号的小波变换之和, 其中有用信号对应的小波变换的极值随尺度的增大而增大或受噪声的影响而缓慢衰减; 而噪声信号对应的小波变换的极值随尺度增大而迅速衰减。因此, 在大尺度下, 监测值小波变换中的极值点将主要属于有用信号。由此可以通过小波变换来减少噪声对故障判断的影响。

### 1.2 小波基函数选取

在获取小波系数的过程中, 小波基函数的选取是一个不容忽视的问题。因此对于小波基函数的选取, 有如下要求:

1) 正交性。若选用具有正交性的小波函数对信号进行变换, 所得到的时间—尺度平面上的系数是互不相关的, 消除了相邻时刻信号之间的相互关联, 可提升奇异性判断的准

确性。

2) 支撑宽度的选择。对于信号的局部分析, 要求小波函数在时域上具有紧支撑, 即存在时间区间  $U$ , 使小波函数在  $U$  之外均为 0, 因此要将小波函数的支撑宽度选得尽量窄。

3) 形状的选择。小波变换的实质是把一个信号分解成一系列小波函数的组合, 因此应尽量使小波函数的波形与分析的信号波形一致。本文分析的对象是故障后突然产生的高频暂态分量, 因此应选择变化较快的小波基函数。

在常用的小波函数里面满足以上要求的有 Haar、dbN、symlet 和 coiflet 这四种, 这四种小波函数的波形如图 1 所示。

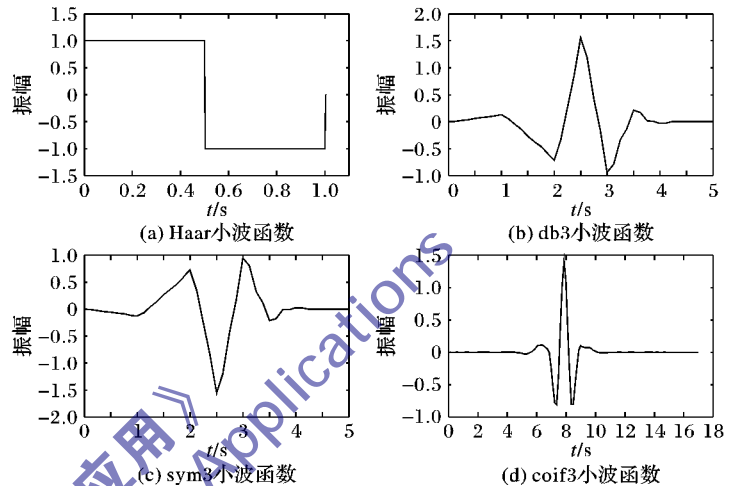


图1 小波函数

在这四个小波函数的波形中, 根据前面所提的选取小波基函数的要求, 可以看出: 这四种小波波形均能满足正交性, 虽然 Haar 小波的宽度最小, 但是它的突变尖锐程度不能达到故障监测的要求; 另外三种小波的变化尖锐程度能够达到要求, 而 db3 小波的支撑宽度是其中最窄的。因此综合这些要求, db3 小波是四种小波中的最优选择。

## 2 小波变换故障监测算法

FMWT 算法通过周期循环监测反应链路状态的光功率来发现链路故障。现有的关于光功率监测的算法(以下简称为 direct 算法)主要利用未经处理的监测状态值进行比较, 若监测值超过所设置的阈值则告警, 若未超过则继续监测。但这种方法容易受到时域中的噪声信号影响而产生误告警或者漏告警<sup>[15]</sup>。针对这个问题, 本文提出了一种基于小波变换的故障监测算法。该算法利用有用信号与噪声信号在进行小波变换时小波系数变化趋势上的差异来减少误告警以及漏告警。

### 2.1 故障监测周期

算法采用文献<sup>[15]</sup>中的监测周期调整方法来调整获取状态值时的监测周期, 通过状态值的变化趋势来调整轮询周期, 从而减少因轮询周期过小造成的资源浪费及因轮询周期过大产生的故障漏检。根据这一原理, 将轮询周期作如下调整:

$$\Delta T_{i,i+1} = \Delta T_{i-1,i} + \Delta T_{i-1,i} \times \Delta Wf(s, t_i) / \text{thres} \quad (5)$$

其中:  $\Delta T_{i-1,i}$  表示当前监测周期,  $\Delta T_{i-1,i} = T_i - T_{i-1}$ ;  $\Delta Wf(s, T_i) = Wf(s, T_{i-1}) - Wf(s, T_i)$ ,  $Wf(s, T_{i-1})$  为前一时刻小波系数值,  $Wf(s, T_i)$  为本时刻小波系数值;  $\text{thres}$  为告警阈值。

通过式(5)对算法的网络监测周期进行调整。

### 2.2 故障监测算法

根据小波变换奇异性监测原理, 由于监测信号在故障发

生时会出现突变点,通过对获得的光功率值进行多尺度的小波变换,观察小波系数的极值从而发现网络故障。

利用式(5)调整后的周期对网络进行监测。首先对正常网络进行一次监测,获取一组状态值序列,利用小波基函数将这一组状态值进行小波变换。对获取到的小波系数取模极大值,将该值设为判断是否发生故障的阈值,然后继续监测网络,对与上面长度相同的一组状态值同样进行小波变换,用小波系数与所设阈值进行比较,若小波系数大于阈值,则说明发生故障;若小于等于阈值,则说明网络正常。算法流程如图 2 所示。

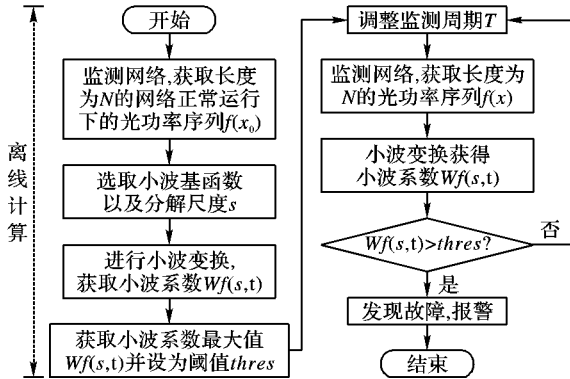


图2 算法流程

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 算法性能评价指标

误告警率  $\eta$ : 错误告警数  $n_1$  在所有告警数  $N$  中所占的比例,可表示如下:

$$\eta = n_1 / N \tag{6}$$

漏告警率  $\beta$ : 在发生故障时未发出告警的数目  $n_2$  在所有告警数  $N$  中所占的比例,可表示如下:

$$\beta = n_2 / N \tag{7}$$

算法运行时间  $t$ : 获取监测序列的时间  $t_1$  加上处理一个监测序列所使用的时间  $t_2$ :

$$t = t_1 + t_2 \tag{8}$$

#### 3.2 仿真分析

采用 Matlab 对算法进行网络故障监测进行仿真分析。对于监测光功率序列长度  $N$  取 1000, 仿真处理数据为  $100 \times 1000$ 。在这  $100 \times 1000$  个数据中以信噪比 20 dB 对其加入白噪声信号, 对监测算法选用上面所介绍的四种小波函数进行仿真比较, 并且与已有利用未经处理监测所得状态值发现故障的算法进行性能比较。

1) 告警率。表 1 所示为小波变换故障监测算法在告警率方面的性能表现。从表中可以看出通过小波变换的处理后, 在告警方面四种小波函数所得的漏告警率均为 0, 避免了漏告警的情况。四种小波函数相比较之下, db3 的误告警率最低, sym3 小波次之, 其他两种小波的误警率偏高。出现这种情况的原因是综合考虑紧支撑性和小波函数波形与所研究的故障信号波形的相似度考虑, db3 小波和 sym3 小波的小波函数波形比 Haar 小波函数与故障信号波形近似度高, 且其紧支撑性也比 coif3 小波函数要好。

表 2 为以 db3 小波为基小波的 FMWT 算法与直接利用监测所得状态值发现故障的算法 (direct) 进行比较所得结果, 从中可以看出利用小波变换处理信号后, 由于克服了噪声信号的影响, 使得基本不存在漏告警, 并且在原有误警率的基础上

降低了 5 百分点。

表 1 各种小波性能比较

小波	告警数	误警率/%	漏警率/%
db3	1000	4.7	0
sym3	1000	5.9	0
Haar	1000	7.2	0
coif3	1000	8.2	0

表 2 算法性能比较

算法	告警数	误警率/%	漏警率/%
FMWT	1000	4.7	0
direct	1000	9.6	0.8

2) 运行时间。从图 3 可以看出利用小波变换对监测所得的光功率状态值进行处理后完成故障监测的时间为毫秒级, 能够满足对监测算法实时性的要求。db3 小波的平均时间为 2.53 ms, sym3 小波平均时间为 2.67 ms, Haar 小波平均时间为 3.05 ms, coif3 小波平均时间为 3.12 ms, 这四种小波中 db3 小波的算法时间最短, 实时性最好。

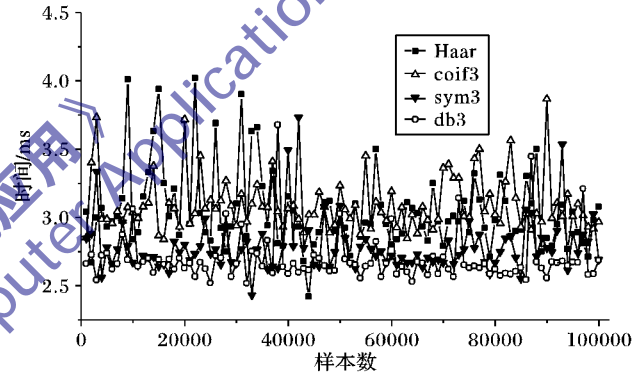


图3 算法时间比较

### 4 结语

为实现光网络中快速准确的故障监测, 本文提出一种基于小波变换理论的监测算法。该算法将故障监测引入了频域的处理, 利用小波变换多尺度分析能够进行奇异性监测的特性, 实现对光网络故障的监测, 利用小波变换去噪的特点, 减少了故障告警时所产生的误告警。仿真结果表明, 与在时域处理监测到的状态值相比, 所提算法提高了故障告警精度, 降低了误告警率, 满足了故障监测的时间要求。

#### 参考文献:

- [1] ZHOU D Y, SUBRAMANIAM S. Survivability in optical networks [J]. IEEE Network, 2000, 14(6): 16-23.
- [2] SOLE-PARETA J, SUBRAMANIAM S, CAREGLIO D, et al. Cross-layer approaches for planning and operating impairment-aware optical networks [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(5): 1118-1129.
- [3] PAL A, PAUL A, MUKHERJEE A. Fault detection and localization scheme for multiple failures in optical network [C]// ICDCN '08: Proceedings of the 9th International Conference on Distributed Computing And Networking. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 464-470.
- [4] 王宏祥. 智能光网络中的自感知技术[J]. 中兴通讯技术, 2008, 14(4): 21-24.
- [5] PAN Z Q, YU C Y, WILLNER A E. Optical performance monitoring for the next generation optical communication networks [J]. Optical Fiber Technology, 2010, 16(1): 20-45.

$[64, 57, 4] \times [64, 57, 4]$  的扩展汉明码构成二维 TPC 码。调制方式为 BPSK, 传输信道为 AWGN 信道。不可靠码元个数  $p = 3$ , 采用串行迭代<sup>[13]</sup>, 迭代次数为 3 次, 8 bit 量化, 设定参与仿真的码块个数为 10 000, 误码率仿真图如图 1 和图 2 所示。仿真结果表明, 在 BER 为  $10^{-6}$  时, TPC 编码可以获得大约 7.4 dB 的信道编码增益。相比梯度算法<sup>[9]</sup>, 编码增益明显提高了大约 1.4 dB, 效果十分理想。采用相关作为度量来等价替代欧氏距离后, 虽然简化寻找竞争码字 Chase2 算法的编码增益比传统 Chase2 算法的编码增益下降了大约 0.1 dB, 但是这种简化方法大大降低了 TPC 译码的复杂度。同时, 对简化后的算法改进软输出信息  $\beta(k)$  后编码增益明显提高了大约 1 dB, 但给算法带来的额外复杂度不大。

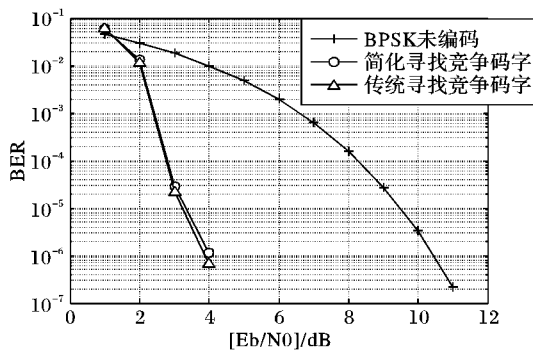


图1 简化寻找竞争码字和传统寻找竞争码字 BER 对比

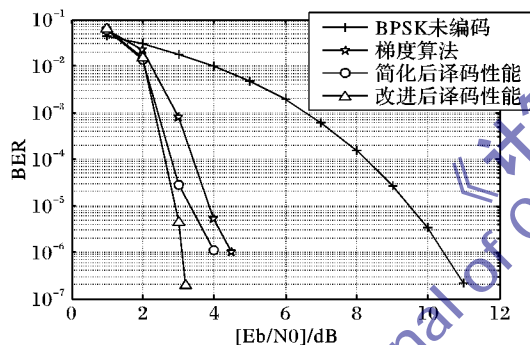


图2 改进软输出信息后译码性能仿真

#### 4 结语

TPC 软判决译码算法是当今信道编码领域的研究热点之一, 对它的研究具有一定的现实意义。传统 Chase2 算法译码

复杂, 在硬件上实现逻辑资源开销非常大, 而且译码速率不高。本文介绍了一种基于相关的 TPC 软判决译码方法, 重点对算法进行了改进, 改进后可以获得大约 7.4 dB 的编码增益, 相比梯度算法编码增益提高了大约 1.4 dB, 相比传统 Chase 算法编码增益提高了近 1 dB; 同时简化了 Chase2 算法, 大大降低了译码复杂度, 减小了译码时延。这种低复杂度算法非常适合硬件实现, 具有一定的工程实用参考价值。

#### 参考文献:

- [1] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIMA P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo codes [C]// ICC'93: IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 1993: 1064 - 1071.
- [2] PYNDIAH R, GLAVIEUX A, PICART A, *et al.* Near optimum decoding of product codes [C]// GLOBECOM '94: Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE, 1994, 1: 339 - 343.
- [3] PYNDIAH R M. Near optimum decoding of product codes: block turbo codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46 (8): 1003 - 1010.
- [4] 王琳. 高效信道编译码技术及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007: 1 - 10.
- [5] 郭立浩, 蒋培文, 郑雪峰, 等. TPC 编码在高码率数传中的应用[J]. 飞行器测控学报, 2010, 29(5): 51 - 55.
- [6] 黄小平, 简福斌, 谭廷庆, 等. 一种新的 Turbo 乘积码简化迭代译码算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(2): 689 - 691.
- [7] 张天瑜. 基于偏移量和归一化的改进型 TPC 译码算法研究[J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2010, 31(4): 417 - 422.
- [8] CHEN Y, PARHI K K. A very low complexity block Turbo decoder composed of extended hamming codes [C]// GLOBECOM '01: IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE, 2001, 1: 171 - 175.
- [9] 徐进延, 李红信. Turbo 乘积码梯度译码算法研究[J]. 通信技术, 2008, 41(12): 81 - 83.
- [10] VANSTRACEELE C, GELLER B, BROSSIER J-M, *et al.* A low complexity block turbo decoder architecture [J]. IEEE Transactions on Communications, 2008, 56(12): 1985 - 1987.
- [11] 岳殿武. 分组编码学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007: 43 - 120.
- [12] 王玮, 葛临东, 巩克现. TPC 基于相关运算的迭代译码算法[J]. 计算机应用, 2010, 30(7): 1760 - 1762.
- [13] 朱光喜, 何业军, 王锋, 等. Turbo 乘积码的两种迭代译码器的比较[J]. 电讯技术, 2004, 44(6): 30 - 34.

(上接第 384 页)

- [6] ROSSI G, DIMMICK T E, BLUMENTHAL D J. Optical performance monitoring in reconfigurable WDM optical networks using sub-carrier multiplexing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(12): 1639 - 1648.
- [7] RICHTER A, FISHLER W, BOCK H, *et al.* Optical performance monitoring in transparent and configurable DWDM networks [J]. IEE Proceedings: Optoelectronics, 2002, 149(1): 1 - 5.
- [8] YAHYA C B. Analysis of optical performance monitoring methods based on q factor and bit error rate estimation [C]// WOCN 2005: International Conference on Wireless and Optical Communications Networks. Piscataway: IEEE, 2005: 196 - 199.
- [9] SHEN T S R, MENG K, LAU A P T, *et al.* Optical performance monitoring using artificial neural network trained with asynchronous amplitude histograms [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2010, 22(22): 1665 - 1667.
- [10] KOZICKI B, TAKUYA O, HIDEHIKO T. Optical performance

monitoring of phase-modulated signals using asynchronous amplitude histogram analysis [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(10): 1353 - 1361.

- [11] ANDERSON T B, KOWALCZYK A, CLARKE K, *et al.* Multi impairment monitoring for optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(16): 3729 - 3736.
- [12] YANG Y, YU Q F, DONG A H. Study on the fault arc on-line detecting based on wavelet singularity detection principle [C]// ICIE 09: Proceeding of the 2009 WASE International Conference on Information Engineering. Piscataway: IEEE, 2009, 2: 151 - 154.
- [13] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 程正兴, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
- [14] 赵学智, 叶邦彦. 基于二分递推 SVD 的信号奇异性位置精确检测[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 53 - 59.
- [15] 刘强, 杨岳湘, 唐川. 基于动态轮询策略的网络故障监视算法[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(9): 2164 - 2166.