

# 基于多波长分组的无源光网络故障监测系统设计及系统抗干扰性能分析

金哲怡<sup>1</sup>, 毕美华<sup>1,2\*</sup>, 滕旭阳<sup>1</sup>, 胡森<sup>1</sup>

<sup>1</sup>杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018;

<sup>2</sup>上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

**摘要** 提出了一种基于多波长分组的无源光网络系统监测方案,用于解决基于反射型的故障监测方案中用户之间易发生因干扰导致的链路状态误判的问题。该方案将不同波长分配到不同组,实现不同光网络单元(ONU)组之间的识别,从而避免不同组成员之间的干扰。在此基础上,将与光路终端距离相近的ONU分配到不同组内,以此降低组内ONU发生相互干扰的概率。此外,还研究了用户数量、传输脉冲功率和脉冲宽度对该系统性能的影响。通过理论推导与仿真可知,在检测波长通道数为4、检测光脉宽为 $10^{-8}$  s、用户数量为16、最大距离差为2 km的无源光网络系统用户中,检测信号的信噪比为9.06 dB,识别精度为2 m。这些结果表明,基于多波长分组的无源光网络监测系统方案能够支持对大容量无源光网络系统的监控,并且在易发生干扰的用户数量较多的情况下具有较好的性能。

**关键词** 光通信; 光编码; 故障监测; 用户分布; 信噪比; 信号干扰比

中图分类号 TN918.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231481

## 1 引言

近年来,随着互联网业务的快速发展和新兴产业的不断涌现<sup>[1]</sup>,大容量、高速率光纤接入网系统被广泛地部署和研究<sup>[2]</sup>。无源光网络(PON)技术因具有低功耗、带宽接入灵活等天然优势<sup>[3-4]</sup>,成为当前光接入网系统方案的主流技术,运用该技术能够使光接入网系统方案更高效。然而,由于PON系统采用无源器件,当光纤故障<sup>[5-6]</sup>发生,特别是馈线光纤出现光纤断裂、弯折、老化等问题时,无法主动向中心局(CO)上报故障点信息,这将导致实时监控和故障定位等维护工作变得较为困难。此外,PON系统的网络构架具有集中控制模式。一方面,这使得传统光网络系统中的点到点的故障监测方案不能较为准确地定位故障发生的具体链路及位置;另一方面,基于反射型的故障监测方案极易产生用户之间互相干扰的问题。在此背景下,研究出一种有效的PON系统监测方案也成为下一代PON系统发展的重点之一。

为此,光接入网传输方向的研究者们针对PON系统中的故障监测技术方案开展了大量工作<sup>[7-16]</sup>,主要研究基于光时域反射(OTDR)方案<sup>[7-10]</sup>和非OTDR方案<sup>[11-16]</sup>。其中,基于OTDR相关监测方案主要有基于

波长可协调的改进OTDR方案和基于布里渊的OTDR(BOTDR)方案两大类。Temporão等<sup>[7-8]</sup>为了有效实现对PON系统链路断裂故障的监测,提出了一种基于波长可协调的OTDR的改进方案。该方案充分利用波分复用(WDM)技术为每个分支分配不同的波长,采用波长可调谐的OTDR方案可以观察各个分支的后向散射轨迹,实现对PON系统的监测。然而在该方案中,随着PON系统的容量增加需要监测的波长数量也在增加,这一定程度上增加了系统成本。Honda等<sup>[9-10]</sup>为了克服传统OTDR的监测方案通常难以准确识别发生故障的具体位置这一问题,提出了基于布里渊OTDR方案,先为每个用户安装一段唯一识别的布里渊光纤,再通过探测信号的频率偏移量来确定故障发生的具体位置。然而,该方案由于需要改变现有的PON系统的光纤部署,增加了系统成本。非OTDR相关监测方案主要包括基于混沌激光的光反馈方案和光编码方案两大类。大连理工大学的殷洪玺团队<sup>[11]</sup>为了提高监测系统的空间分辨率,提出了一种带有混沌激光器的光反馈方案,通过对混沌激光器接收和发射的信号进行相干运算,可以得到故障发生点的具体位置。该方案需要采用严格同步和专门设计的混沌激光器,在一定程度上增加了系统成本。与此同

收稿日期: 2023-08-29; 修回日期: 2023-10-10; 录用日期: 2023-10-30; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 江苏省新型光纤技术与通信网络工程研究中心开放研究课题(SDGC2120)、上海交通大学光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2023GZKF019, 2023GZKF023)

通信作者: \*bmhua@hdu.edu.cn

时,光学编码的方案<sup>[12-16]</sup>被设计出来用以识别 PON 系统中不同分支的光链路。该类方案利用光学编码原理,主要利用一维周期码<sup>[12]</sup>(1D-PCS)和二维光正交码<sup>[13-15]</sup>(2D-OOCs)分别基于平面光波电路(PLC)或光纤布拉格光栅<sup>[16]</sup>(FBG)来获取系统中故障点的位置信息,这些方案有着高扩展性、低升级成本等优点。然而,基于 PLC 的方案很难在有限的波导长度上编写大量的布拉格光栅,因此网络用户的数量不能太多。此外,现有的基于 FBG 的故障监测方案没有考虑到不同用户之间互相干扰而带来的系统性能下降的问题。

为了解决上述问题,本文设计了一种基于多波长分组的 PON 监测系统,通过将易发生干扰的用户分配到不同用户组群,在链路末端部署对应反射波长的布拉格光栅,利用不同波长的检测波对用户组进行区分,以此降低发生干扰的概率,并在此基础上研究了在不同条件下该方案的系统性能。利用用户分布模型推导了多个链路长度相似用户的检测信号之间相互干扰的可能性,为研究检测信号质量与检测光脉冲宽度、用户链路长度、用户接入端口等系统参数之间的关系建立了理论基础。基于系统的参数配置搭建了仿真系统并进行了验证,结果表明,在检测波长通道数为 4、检测光脉宽为  $10^{-8}$  s、用户数量为 16、最大距离差为 2 km 的情况下,接收端检测信号的信噪比为 9.06 dB,识别精度为 2 m。

## 2 基于多波长分组的无源光网络故障监测系统

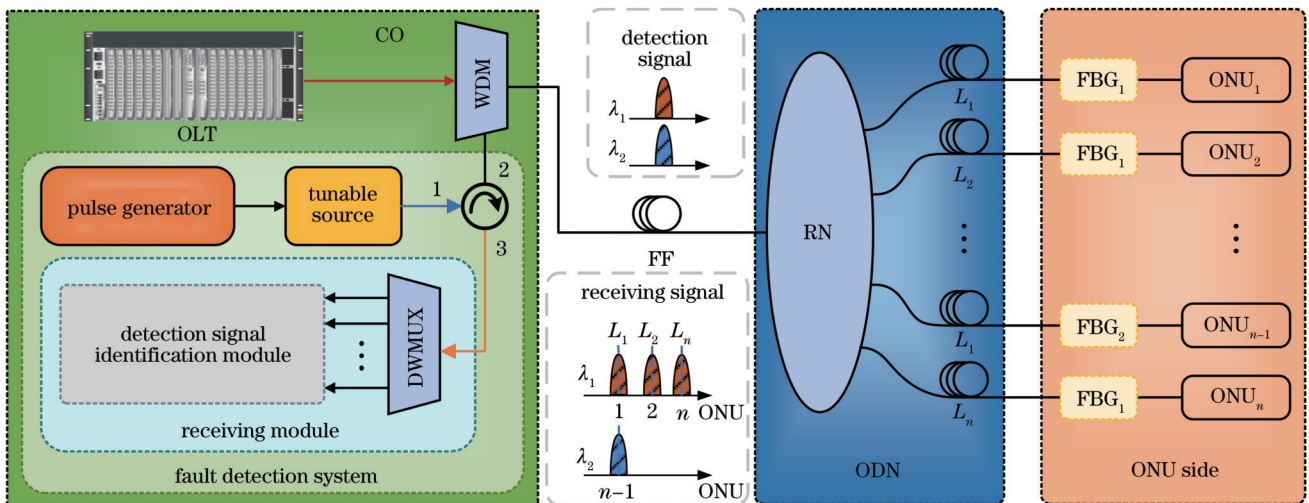
### 2.1 基于多波长分组的无源光网络故障监测系统原理

本文提出的基于多波长分组的 PON 故障监测系统方案如图 1 所示。该系统由 CO、光分配网(ODN)

及光网络单元(ONU)等三大功能模块组成。其中,在 CO 侧,脉冲激光器用于产生传输脉冲功率为  $P_s$ 、脉冲宽度为  $T_c$  的  $u$  波段宽带探测脉冲信号。这些检测信号经过馈线光纤、远端节点(RN)后注入到分布式光纤,再由分布式光纤传输到每个 ONU。在该系统中,ONU<sub>1</sub>、ONU<sub>2</sub>、ONU<sub>*n*</sub>到光线路终端(OLT)的距离分别为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_n$ ,三者互不相等。根据分组规则,这三个 ONU 将被分配到同一个组内,采用波长为  $\lambda_1$  的检测信号进行链路识别。其中,因 ONU<sub>1</sub>与 ONU<sub>*n-1*</sub>到 OLT 的距离相等,ONU<sub>*n-1*</sub>将被分配到另一个组内,采用波长为  $\lambda_2$  的检测信号进行链路识别。因此,在 ONU 侧,ONU<sub>1</sub>、ONU<sub>2</sub>、ONU<sub>*n*</sub>前部署反射波长为  $\lambda_1$  的 FBG<sub>1</sub>,ONU<sub>*n-1*</sub>前部署反射波长为  $\lambda_2$  的 FBG<sub>2</sub>。在该配置下,检测信号经过系统到达 ONU,被 ONU 侧的 FBG 反射后,重新回到 CO,并注入到 CO 中的监测系统。监测系统包括三个模块:阵列波导光栅(AWG)、光电探测器(PD)和检测信号识别模块。反射信号经解复用器(DEMUX)解复用后,分配到 ONU 所属组的相应波长通道。对于同一波长组的 ONU,由于不同 ONU 到 OLT 的距离不等,可以通过引入不同的到达时间来识别。此外,需要注意的是,为了减少 ONU 之间的干扰,不能将与 OLT 距离相近的 ONU 分配到同一组,应该使用不同的波长进行区分。

### 2.2 PON 用户分布模型及干扰概率分析

图 2 为 PON 系统用户分布示意图及检测信号接收结果。在用户分布密集的商业街区和住宅小区内,分布式光纤的链路长度接近,因此用户间的干扰成为影响 PON 系统监测方案性能的主要因素<sup>[17-18]</sup>,具体表现为相同或相近链路长度的用户检测信号会相互叠加。这种干扰的叠加程度取决于干扰用户之间的链路长度差和检索光脉冲信号的脉宽。另外,由于链路损



CO: central office; OLT: optical line terminal; DEMUX: demultiplexer; WDM: wavelength division multiplexer; FF: feedforward fiber; FBG: fiber Bragg grating; RN: remote node

图 1 基于多波长分组的 PON 故障监测系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-wavelength group-based fault detection scheme in PON system

耗的差异以及检索光脉冲与FBG光编码器的中心波长偏移,不同用户的信号幅值也会有所不同,甚至同一个用户的信号幅值也会随着波长偏移而改变。这种干扰带来的用户信号叠加度和用户信号幅值差异会影响链路状态的准确判别。因此,通过建立海量密集分布用户模型,分析干扰信号叠加度和系统参数之间的关系,探索检索光脉冲脉宽、用户链路长度、监测容量等因素对多用户检测信号的影响。通常情况下,PON系统的

用户分布受到系统部署场景的影响,并随着接入用户的类型和数量而变化。根据接入用户的类型,宽带接入用户主要分为住宅用户和商业用户,住宅用户可以进一步分为多住户单元和独户住宅,其中多住户单元在我国占比较大,在每层楼有一个RN的情况下,其用户分布的统计模型为沿着住宅每层的走廊均匀分布。商业用户主要是多租户单元,在每栋楼只有一个RN的情况下,其用户分布的统计模型沿着商业街均匀分布。

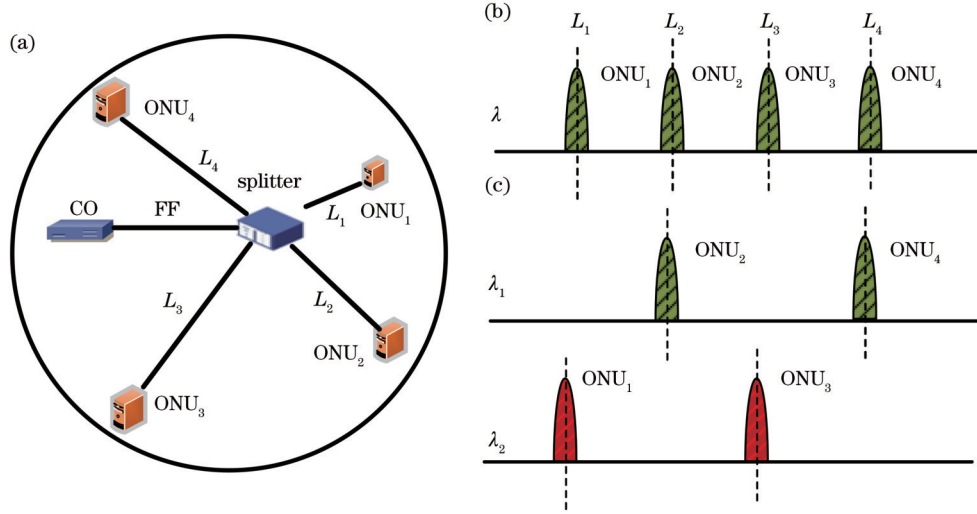


图2 PON系统用户分布示意图及检测信号接收结果。(a)分布模型示意图;(b)单波长检测信号到达时延;(c)多波长检测信号到达时延

Fig. 2 PON system user distribution diagram and detection signal reception results. (a) Schematic diagram of distribution model; (b) arrival delay of single-wavelength detection signal; (c) arrival delay of multi-wavelength detection signal

为此,假设用户和RN在一个圆形区域内,其用户分布沿着圆形区域均匀分布。基于多波长分组的PON监测系统的波长通道数为 $m$ ,用户总数为 $M$ 。对于第 $k$ 个用户,从它到RN的距离是链路长度 $l_k$ 。用户半径由故障检测光脉冲的宽度 $T_c$ 决定。最长链路长度为 $l_{\max}$ ,最短链路长度为 $l_{\min}$ 。考虑到从光纤终端到用户的距离通常小于20 km,光纤色散引起的脉冲展宽可以忽略不计。因此,信号序列中每个脉冲的宽度仍然是 $T_c$ 。检测信号从CO发出,通过整个馈入光纤和分布式光纤分配到每个用户。在分布式光纤的末端,采用特定波长的FBG反射属于自身的检测脉冲信号。然后,这些反射信号依次返回到CO,并注入到CO中的监测系统。

为了分析用户间的干扰问题,需要判断用户间是否满足以下两个条件来确定是否存在干扰。第一个条件是用户间的链路状态应该是完整的,即没有光纤故障。在本研究中,假设每个用户的光纤故障概率 $\xi$ 是独立且相等的。第二个条件是这些用户的链路长度差 $\Delta l$ 应小于干涉距离 $l_c$ ,而 $l_c$ 由 $T_c$ 直接决定。干涉距离可表示为 $l_c = cT_c / (2n_{\text{eff}})$ ,其中 $n_{\text{eff}}$ 、 $c$ 分别为光纤芯内的有效折射率和光速。因此,对于任意用户 $k$ ,链路长度在干扰区 $(l_k - l_c, l_k + l_c)$ 的用户都可以对第 $k$ 个用户进

行干扰。考虑到上文提到的用户服从均匀分布,用户均匀分布在 $l_{\min} \sim l_{\max}$ 的区域内,且用户分布为独立同分布,因此将用户分布的概率密度函数作为链路长度 $l$ 的函数,可以表示为 $p(l) = 2l / (l_{\max}^2 - l_{\min}^2)$ ,因此,在 $(l_k - l_c, l_k + l_c)$ 区间内,干扰用户存在的概率为 $F(l) = l_c T_c / [n_{\text{eff}}(l_{\max}^2 - l_{\min}^2)]$ 。对于任意数量的用户,如果其链路长度落在 $(l_k - l_c/2, l_k + l_c/2)$ 区间内,则表示其长度差小于 $l_c$ ,满足干扰条件。假设干扰用户数为 $\eta$  ( $2 \leq \eta \leq M$ ),且 $\eta$ 个用户干扰事件是独立的,则用户干扰概率为 $\eta$ 个用户的干扰概率之和。对于 $\eta$ 个用户干扰事件,需要满足两个要求,即 $\eta$ 个用户应位于 $(l_k - l_c, l_k + l_c)$ 区间内,并且其余 $M - \eta$ 个用户不在此区间内。因此,用户干扰的概率可以表示为

$$P = \sum_{\eta} [F(l)(1 - \xi)]^{\eta} [1 - F(l)]^{M - \eta}. \quad (1)$$

### 2.3 多波长分组方式对用户干扰的影响

基于多波长分组的PON故障监测方案的本质是利用波长和ONU(即用户)到光路终端的距离来实现ONU之间的分组。该方案将不同波长分配到不同组,以实现针对不同ONU组之间的识别,从而避免不同组成员之间相互干扰。在此基础上,将与光路终端的距离相近的ONU分配到不同组内,以此降低组内ONU发生

相互干扰的概率。具体地,假设 ONU<sub>i</sub>到 OLT 的距离为  $l_i$ ,则 ONU<sub>i</sub>与 ONU<sub>j</sub>到 OLT 的距离差  $d_{ij}$  可以表示为

$$d_{ij} = |l_i - l_j|, \quad (2)$$

其中,  $l_i$  决定检测信号从脉冲激光器发射到检测模块接收的时延。  $d_{ij}$  可以决定光路终端处接收到 ONU<sub>i</sub> 和 ONU<sub>j</sub> 反射信号的时间差,  $d_{ij}$  越小, 时间差越短, 两个 ONU 之间发生干扰的概率就越大。同时, 为了避免使用同一波长的 ONU 之间相互干扰, 本方案规定具有相同波长且在相同组内的 ONU 之间的  $d_{ij}$  尽可能大。在这种情况下, 由于 PON 系统中  $d_{ij}$  较小的 ONU 会被分配到不同组中, 使用不同波长的检测信号进行识别, 因此可以有效降低 ONU 之间发生干扰的概率。该目标用数学模型可表示为

$$\text{Max } D = \min \{ D_1, D_2, \dots, D_k, \dots, D_m \}, \quad (3)$$

式中:  $m$  为预设的特定波长通道的数量。  $D_k$  为第  $k$  组的 ONU 之间的最小距离, 其具体函数表示为

$$D_k = \min \{ d_{kij} \}, \forall i, j \in [1, N_k], i \neq j, \quad (4)$$

式中:  $N_k$  为第  $k$  组的 ONU 的总数;  $d_{kij}$  是第  $k$  组的 ONU<sub>i</sub> 与 ONU<sub>j</sub> 之间的距离, 其数学表达式为

$$d_{kij} = |l_{ki} - l_{kj}|, \forall i, j \in [1, N_k], i \neq j, \quad (5)$$

式中:  $l_{ki}$  为第  $k$  组的 ONU<sub>i</sub> 到 OLT 的距离, 其取值范围由馈线光纤长度  $l_t$  和 ONU 间最大距离差  $l_e$  来决定。综上所述, 该分组问题可转化为如下最优化问题求解:

$$\text{Max } D = \min \{ D_1, D_2, \dots, D_M \},$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} D_k = \min \{ d_{kij} \} \\ d_{kij} = |l_{ki} - l_{kj}| \\ l_t \leq l_{ki} \leq l_t + l_e \\ k \in [1, M] \\ \forall i, j \in [1, N_k] \\ i \neq j \end{cases} \quad (6)$$

在波长数和满足干扰条件的 ONU 数量不等的情况下, 给出了随机分组和多波长分组对 ONU 之间发生干扰概率的影响结果, 如图 3 所示。对比两种分组方式可以发现, 在等波长的情况下, ONU 之间发生干扰的概率随着满足干扰条件的 ONU 数量的增多而逐渐增大, 但是在使用多波长分组后发生干扰的概率明显下降。在波长通道数量  $m$ 、满足干扰条件的 ONU 数量  $b$  分别为 4 和 3 的情况下, 不分组的碰撞概率为 71.87%, 而经过多波长分组后, 发生干扰的概率为 0。即使波长通道数量不变, 满足干扰条件的 ONU 数量上升到 6, 在不分组的情况下发生干扰的概率为 96.92%, 也大于分组后的 66.67%。此外, 如果满足干扰条件的 ONU 数量  $b$  小于波长通道数量  $m$ , 多波长分组可以避免发生干扰。这一结果可以验证, 与不分组的方案相比, 无论使用多少波长通道, 多波长分组都能有效减少发生干扰的概率。

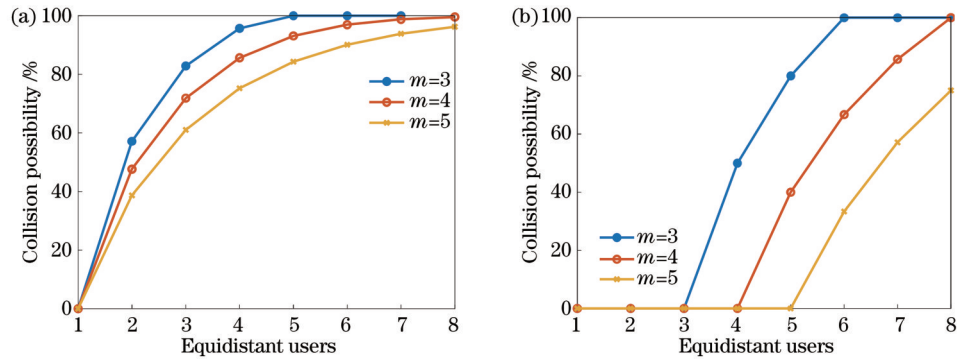


图 3 不同波长和满足干扰条件的 ONU 数量情况下发生干扰的概率图。(a)随机分组;(b)多波长分组

Fig. 3 Probability of interference under different wavelengths and number of ONU meets interference conditions. (a) Random grouping; (b) multi-wavelength grouping

### 3 性能仿真与分析

在 PON 链路的监测系统中, 为了避免上一次检测对下一次检测造成干扰, 需要确保两次检测之间存在 ms 级别的保护间隔。这种保护间隔会导致监测系统的速率较低, 并且在此期间不能进行通信数据的传输。因此, 通常会使用信噪比 (SNR) 和信号干扰比 (SIR) 来对系统的性能进行分析。

#### 3.1 SNR 分析

在 PON 监测系统中, SNR 是一项用于评估系统

性能和信号质量的重要指标, 用于衡量检测信号与系统噪声之间的相对强度。较高的 SNR 值表示检测信号较强, 有助于系统对链路状态进行准确识别。相反, 较低的 SNR 值表示噪声在系统中更加显著, 导致检测信号无法被准确识别。SNR 的数学表达式为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{E(\mu_{\text{sig}}^2)}{E(\delta^2)}, \quad (7)$$

式中:  $\delta$  为系统噪声;  $\mu_{\text{sig}}$  表示检测脉冲光信号由 CO 端发射, 并依次经过放大器、馈线光纤、RN、分布式光纤、ONU、FBG 及各个连接端口后, 到达接收模块的光强

度大小。该信号为理想信号,即不包含任何噪声,其具体表达式为

$$\mu_{\text{sig}} = G\alpha_{\text{T}}P_{\text{s}} \exp(-2\alpha_{\text{a}}l_i), \quad (8)$$

式中: $G$ 为光纤放大器增益倍数; $\alpha_{\text{T}}$ 为总的插入损耗功率,由系统中所有的无源器件比如光纤、连接器、编码器的损耗构成; $P_{\text{s}}$ 为传输脉冲功率; $\alpha_{\text{a}}$ 为各个光纤的衰弱系数。噪声 $\delta$ 由四个部分组成,分别为拍频噪声(BN)、散粒噪声(SN)、暗电流噪声(DN)和热噪声(TN)。BN是由于信号在经过光纤传输时,不同支路上的信号频率比较接近造成的。SN是由真空电子管和半导体器件中电子发射的不均匀性引起的白噪声,它是由单位时间内通过PN结的载流子数目随机起伏造成的。而DN是指在无光入射的情况下,图像传感器中由于热波动产生的电子空穴对所引起的噪声。DN主要可以分为两部分:一是载流子的TN,它是一种泊松分布的随机过程,表现为白噪声信号;二是晶体中缺陷的大量集中引起的脉冲尖峰,称为暗电流的不一致性,它是产生DN的主要原因,会直接影响信号质量。而TN是由导体中电子的热运动产生的电子噪声,与所施加的电压无关。TN在所有频谱中以相同的形态分布,即类似于白噪声,是不能消除的,由此对通信系统性能构成了上限。各个噪声所产生的功率具体定义为

$$\begin{cases} \delta_{\text{B}}^2 = 2b\beta(G\alpha_{\text{T}}P_{\text{s}})^2(1+\xi)\exp(-4\alpha_{\text{a}}l_i) \\ \delta_{\text{S}}^2 = qG(1+\xi)[\mu_{\text{sig}} + G\alpha_{\text{T}}P_{\text{s}}\exp(-2\alpha_{\text{a}}l_i)] \\ \delta_{\text{D}}^2 = qI_{\text{DN}}B_{\text{e}} \\ \delta_{\text{T}}^2 = P_{\text{TN}}B_{\text{e}} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: $q$ 为一个电子所带的电荷量; $I_{\text{DN}}$ 为暗电流大小; $P_{\text{TN}}$ 为TN的功率谱密度;其中,为了消除不同的信号强度对BN的影响来提高系统的检测效率,其噪声功率需要进行标准化,即要乘上系数 $\beta$ ,并令系数 $\beta$ 为信号源相干时间 $\tau_{\text{c}}$ 与检测光脉冲的宽带 $T_{\text{c}}$ 的比值,也可以表示为光电探测器的电带宽 $B_{\text{e}}$ 与光源的光带宽 $B_{\text{o}}$ 的比值,其中 $B_{\text{e}}$ 与 $T_{\text{c}}$ 呈倒数关系,所以 $\beta = \tau_{\text{c}}/T_{\text{c}} = B_{\text{e}}/B_{\text{o}} = 1/(B_{\text{o}}T_{\text{c}})$ ;  $1+\xi$ 表示雪崩光电二极管(APD)的

噪声因子。

接下来,利用表1中参数,在MATLAB中对基于多波长分组的PON监测系统仿真。

表1 PON故障监测系统性能仿真参数

Name	Value
APD gain $G$	100
Total connector/splice loss $\alpha_{\text{T}}$ /dB	4
Fiber attenuation for $u$ band $\alpha_{\text{a}}$ /(dB/km)	0.3
Laser linewidth $B_{\text{o}}$ /MHz	10
$\beta$	$1/(B_{\text{o}}T_{\text{c}})$
APD excess noise power $1+\xi$	2.97
Power spectral density $P_{\text{TN}}$ /(A <sup>2</sup> /Hz)	$10^{-26}$

利用表1中的仿真参数,在馈入式光纤长度 $l_i = 20$  km、ONU最大间距 $l_{\text{c}} = 1$  km、ONU数 $K = 64$ 、传输脉冲功率 $P_{\text{s}} = 4$  dBm的情况下,噪声分量与传输脉冲宽度之间的关系如图4(a)所示。由图4(a)可知,SN和BN的值比DN和TN大60 dB以上,在这种情况下,可以忽略DN和TN的影响。此外,由式(9)推导可得,SN、DN和TN随着脉冲宽度的增加呈线性降低趋势,这是因为SN、DN和TN与电带宽呈正比关系,而与脉冲宽度呈反比关系。当脉冲宽度较小时,BN比SN小,这是因为此时干扰信号较弱,导致拍频信号也较弱。因此,当 $T_{\text{c}} < 10^{-10}$  s时,SN占据主导地位,并随着脉宽的增加呈线性减小趋势。随着脉冲宽度的增加,ONU之间的相干距离变大,从而导致对信号的干扰程度也增大,进而增加了BN的影响。需要特别注意的是,当脉冲宽度 $T_{\text{c}} \geq 10^{-10}$  s时,BN占据主导地位。当脉冲宽度处于 $10^{-10}$  s和 $10^{-9}$  s之间时,BN达到最大值,然后随着脉冲宽度 $T_{\text{c}}$ 的增加而线性减少,这是因为当脉冲宽度 $T_{\text{c}} \geq 10^{-10}$  s时,BN与脉冲宽度 $T_{\text{c}}$ 呈反比例关系。以上论述基于相关公式和仿真结果,有助于进一步理解不同噪声分量的特性,以及不同噪声分

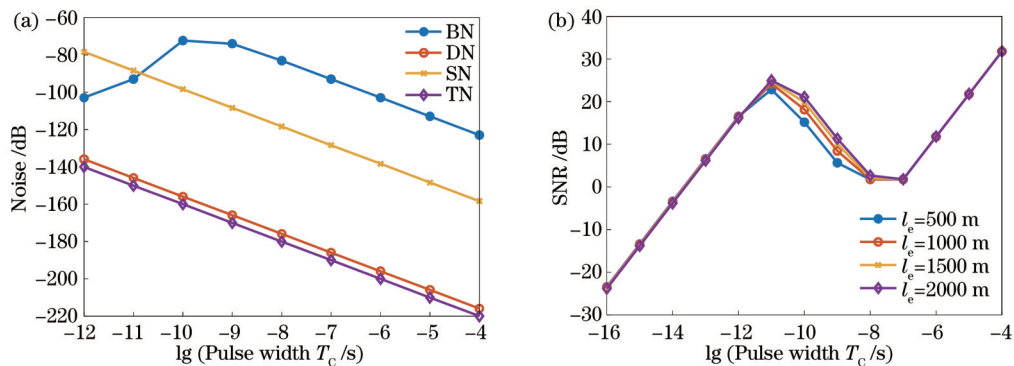


图4 不同检测脉冲宽度下SNR仿真结果。(a)噪声分量与检测脉冲宽度关系图;(b)SNR与脉冲宽度关系图

Fig. 4 Simulation results of SNR under different detection pulse widths. (a) Relationship between noise component and detection pulse width; (b) relationship between SNR and pulse width

量与脉冲宽度的关系。

在馈入式光纤长度  $l_f=20$  km、ONU 数  $K=64$ 、传输脉冲功率  $P_s=4$  dBm 的情况下, SNR 与脉冲宽度之间的关系如图 4(b) 所示。由图 4(a) 可知, 当脉冲宽度较小 ( $\lg T_c \leq -10$ ) 时, SN 对系统性能起主导作用, 并随着脉宽的增加呈线性减小趋势。随着脉冲宽度的增加, BN 逐渐增大, 其增加源于 ONU 间的干扰加剧。因此, 在图 4(b) 中, 当脉冲宽度较小 ( $\lg T_c \leq -11$ ) 时, 可以观察到 SNR 呈线性增加趋势。当脉冲宽度达到一定值 ( $\lg T_c = -11$ ) 时, SNR 到达峰值。然而, 当脉冲宽度满足条件  $-11 \leq \lg T_c \leq -7$  时, 系统中的总噪声功率主要由 BN 决定, 此时 SNR 开始递减。此种情况下, SNR 曲线间的差距会逐渐扩大, 曲线相互分离, 并且随着 ONU 间距的增加, SNR 将得到提升。随着脉冲宽度的进一步增加, 可以观察到

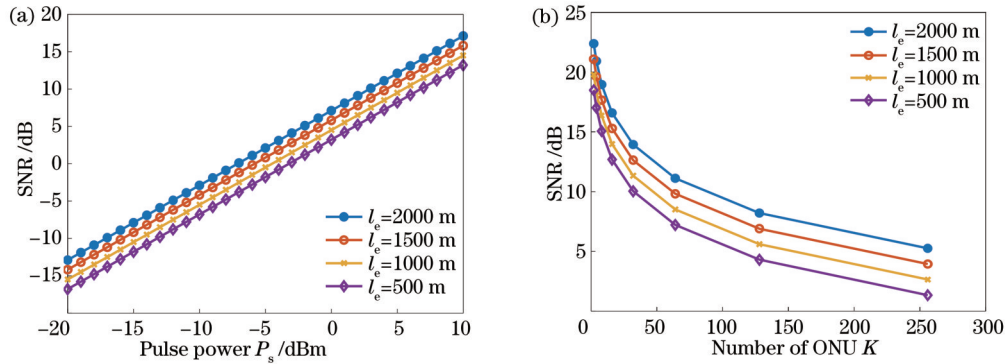


图 5 SNR 仿真结果。(a)SNR 与检测信号功率关系; (b)SNR 与 ONU 数量关系

Fig. 5 Simulation results of SNR. (a) Relationship between SNR and detection pulse power; (b) relationship between SNR and the number of ONUs

在馈入式光纤长度  $l_f=20$  km、传输脉冲功率  $P_s=4$  dBm、脉冲宽度  $T_c=1$  ns 的情况下, SNR 与 ONU 数量  $K$  之间的关系如图 5(b) 所示。由式 (9) 可知, BN 与 SN 的值和由 ONU 数、ONU 最大分离距离以及用户分布概率所决定的  $l_f$  有关, DN 及 TN 是定值。由图 5(b) 可知, 在增加 ONU 数量时, SNR 呈现减少趋势。这是由于在相同干扰范围内 ONU 数量的增加, 引起了 BN 和 SN 的增加, 进而导致 SNR 减少。当 ONU 数量保持不变时, 随着 ONU 的最大分离距离减小, 可以观察到 SNR 逐渐减少。这是由于 ONU 之间的分离距离减小, 导致干扰加剧, 从而使噪声分量增加。综合以上仿真与推导可得, 在实际网络部署时需要综合考虑 SNR 和 ONU 数规模。通过减少 ONU 数, 可以提升系统的 SNR。然而, 在相同的网络覆盖区域内部署较少的 ONU 会导致资源浪费。相反, 如果用户规模很大, 整个 PON 链路监测系统的 SNR 会降低, 从而降低系统的可靠性和用户满意度。因此, 在网络部署成本固定的情况下, 需要找到成本和系统性能之间的平衡点, 使用户满意度最大化。在实际网络部署中, 需要综合考虑各个因素并做出权衡决策。

SNR 再次逐渐增加。然而, 当脉冲宽度满足  $\lg T_c \geq -6$  时, 虽然 SNR 逐渐增加, 但干扰信号达到了最大值。综上所述, 通过图 4(a) 和图 4(b) 可得, 在传输脉冲宽度范围大约满足  $-10 \leq \lg T_c \leq -8$  的情况下, SNR 的取值较为理想。

在馈入式光纤长度  $l_f=20$  km、ONU 数  $K=64$ 、脉冲宽度  $T_c=1$  ns 的情况下, SNR 与传输脉冲功率  $P_s$  之间的关系如图 5(a) 所示。由图 5(a) 可知, 在不同的 ONU 最大分离间距下, 随着传输脉冲功率  $P_s$  的增加, SNR 呈现增加趋势。然而, 需要注意的是, 较高的传输脉冲功率可能受到光纤非线性效应的限制。如果功率过高, 线性监测系统可能会变得不稳定。因此, 在其他仿真实验中, 采用传输脉冲功率  $P_s=4$  dBm 来避免光纤非线性限制, 以保持监测系统的稳定性。这样同时也能得到较为理想的 SNR 数值。

### 3.2 SIR 分析

在 PON 监测系统中, SIR 是另一项用于评估系统性能的重要指标, 通常用于衡量目标用户的检测信号与干扰信号之间的相对强度。较高的 SIR 值表示检测信号较强, 有助于系统对链路状态进行准确识别。相反, 较低 SIR 值表示干扰信号在系统中更加明显, 会导致检测信号与干扰信号之间的区分度下降, 系统无法准确判断链路情况。SIR 的数学表达式为

$$R_{\text{SIR}} = \frac{E(\mu_{\text{sig}}^2)}{E(\mu_{\text{int}}^2)}, \quad (10)$$

其中, 干扰信号  $\mu_{\text{int}}$  表示为

$$\mu_{\text{int}} = G\alpha_T \sum_{k=2}^K \rho_k \exp(-2\alpha_a l_k) P_s, \quad (11)$$

式中:  $\rho_k$  为用户  $k$  的干扰概率。

SIR 的数值越大, 表示有效信号比干扰信号越强, 信号质量也就越好。SIR 是一个重要的指标, 因为它能够直接影响 PON 监测系统的性能和容量。在设计 and 优化通信系统时, 研究人员通常会关注如何提高 SIR, 以减小干扰并提升检测质量。因此, 通过仿真分析 ONU 数量和脉冲宽度等参数对 SIR 的影响。

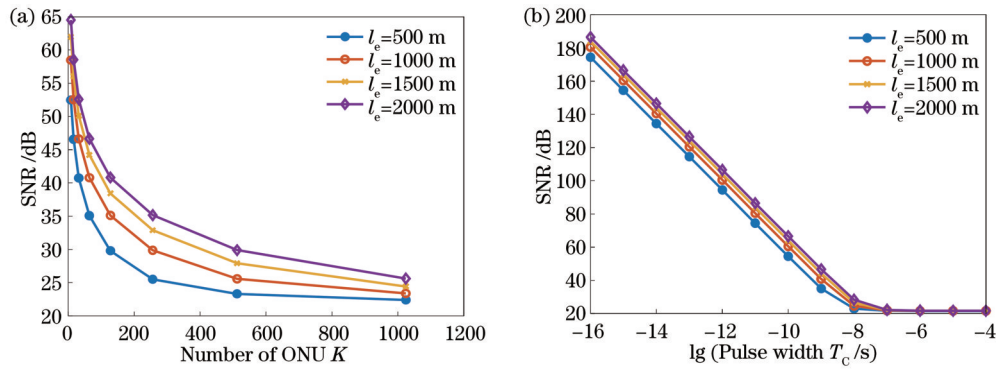


图 6 SIR 仿真结果。(a)ONU 数量对 SIR 的影响;(b)检测脉冲宽度对 SIR 的影响

Fig. 6 Simulation results of SIR. (a) Impact of number of ONUs on SIR; (b) impact of pulse width on SIR

利用表 1 中的仿真参数,在馈入式光纤长度  $l_t=20$  km、传输脉冲功率  $P_s=4$  dBm、脉冲宽度  $T_c=1$  ns 的情况下,SIR 与 ONU 数量  $K$  之间的关系如图 6(a) 所示。由图 6(a) 可知,较少的网络 ONU 数会得到较高的 SIR 值,原因是 ONU 之间的干扰较小。当 ONU 最大间距  $l_e=1$  km、ONU 数  $K$  从 64 增加到 128 时,干扰的增加使得 SIR 从 40.6 dB 降低到 34.9 dB。随着网络规模的增大,SIR 逐渐接近一个下界值,表示干扰已经达到了最大值,即使再增加 ONU 数也不会再增加干扰。对于给定的 ONU 数,可以观察到随着 ONU 之间的分离距离增加,SIR 逐渐提升,这是因为 ONU 之间的干扰减少。在网络部署中,需要在 ONU 数量和 ONU 之间的分离距离之间找到合适的平衡点,以获得较高的 SIR 值和较好的系统性能。

在馈入式光纤长度  $l_t=20$  km、传输脉冲功率  $P_s=4$  dBm、ONU 数量  $K=64$  的情况下,SIR 与脉冲宽度之间的关系如图 6(b) 所示。ONU 相干距离正比于脉冲宽度  $T_c$ ,减小脉冲宽度也就意味着相干距离减小,从而 ONU 之间的干扰也就降低。因此,当脉宽较窄时,SIR 值相对较高并且随着脉宽的增加线性递减。当  $T_c=10^{-7}$  s 时,可以观察到 SIR 逐渐接近一个下界值,这是因为所有链路之间的干扰达到了最大。需要

注意的是,在实际应用中,脉冲宽度不能太窄,因为脉宽越窄,系统的精度要求也越高。为了获得更好的系统性能,选择合适的脉冲宽度需要综合考虑信噪比 SNR 和信号干扰比 SIR。综合以上分析,在基于多波长分组的 PON 故障监测系统中脉冲宽度条件设置为  $-9 \leq \lg T_c \leq -8$  时,性能较为理想。

进一步,基于 OptiSystem 软件搭建了一个检测波长通道数为 4(即  $m=4$ )、ONU 数为 16(即  $K=16$ ) 的多波长分组的 PON 故障监测系统。其中,系统的具体参数和分组情况如表 2 所示。利用该系统进行仿真,在发射功率  $P_s$ 、脉冲宽度  $T_c$  分别为 4 dBm、 $10^{-8}$  s 的情况下,监测系统中接收到的检测信号强度的时域响应如图 7(a) 所示。由图 7(a) 可知,与 OLT 的距离相近的 ONU,如 ONU<sub>5</sub> 和 ONU<sub>11</sub>,被分配到 G2 和 G3 两个组,分别使用波长为  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  的检测信号进行识别。在这样的分配规则下,两者的信号不再相互叠加,有效避免了相互干扰的情况发生。此外,图 7(b) 为 ONU<sub>2</sub> 的检测精度示意图。将该图的结果与表 2 对照,可以观察到系统监测的 ONU 距离与设置的距离基本相符,且 3 dB 脉宽所对应的识别精度为 2 m。此外,可以观察到检测信号峰值随着 ONU 与 OLT 之间的距离增加而逐渐减小。这种现象是由于瑞利散射会随着传播距离的增加而逐渐衰减。

表 2 基于多波长分组的 PON 故障监测系统用户分组情况

Table 2 User grouping for PON fault monitoring system based on multi-wavelength grouping

Group ID	Wavelength of the detected signal $\lambda_i$ /nm	User ID	Distance $l_k$ /km
G1	1610	{ONU <sub>1</sub> , ONU <sub>2</sub> , ONU <sub>3</sub> , ONU <sub>4</sub> }	{15, 19, 23, 26}
G2	1620	{ONU <sub>5</sub> , ONU <sub>6</sub> , ONU <sub>7</sub> , ONU <sub>8</sub> }	{18, 22, 27, 31}
G3	1630	{ONU <sub>9</sub> , ONU <sub>10</sub> , ONU <sub>11</sub> , ONU <sub>12</sub> }	{21, 25, 31, 36}
G4	1640	{ONU <sub>13</sub> , ONU <sub>14</sub> , ONU <sub>15</sub> , ONU <sub>16</sub> }	{24, 29, 35, 42}

## 4 结 论

提出了一种基于多波长分组的 PON 系统监测方案,用于解决基于反射型的 PON 故障监测方案中 ONU 之间易发生干扰而导致的链路状态误判的问题。首先,对 PON 系统中 ONU 分布所导致的干扰情况进

行分析,得出 ONU 分布概率模型。然后,通过对基于多波长的 ONU 分组方案进行建模,分析了该分组方法对干扰概率的理论影响。此外,还研究了不同系统参数对基于多波长分组的 PON 故障监测系统的 SNR 和 SIR 的影响。针对不同 ONU 数量和分布范围,利用数值仿真分析,给出了合适的脉冲宽度和输出功率来

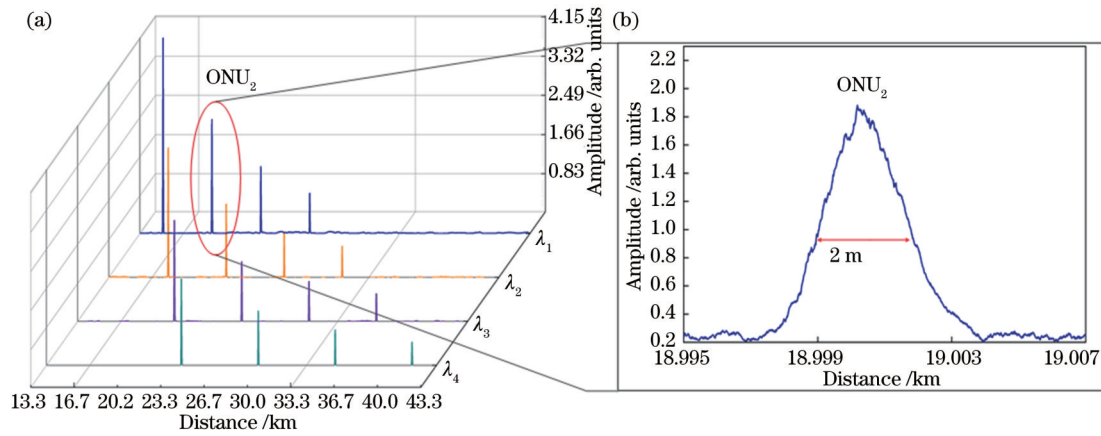


图 7 基于多波长分组的 PON 监测系统仿真。(a)接收端脉冲信号响应;(b) $\text{ONU}_2$ 检测精度

Fig. 7 Simulation of multi-wavelength group-based PON monitoring system. (a) Pulse signal response at the receiver end; (b) detection accuracy for  $\text{ONU}_2$

提高系统性能。其结果表明:当脉冲宽度设置为 $-9 \leq \lg T_c \leq -8$ ,所提方案不仅可以有效抑制信号中的噪声干扰提高 SNR,还能有效减少 ONU 之间的干扰,确保 SIR 维持在可接受范围内。最后,利用 OptiSystem 软件在传输脉冲功率  $P_s$ 、脉冲宽度  $T_c$  分别为 4 dBm、 $10^{-8}$  s 的情况下,仿真得到了 3 dB 脉宽所对应的识别精度为 2 m。该仿真中检测信号识别模块的显示结果与设置参数一致,证明了基于多波长分组的 PON 故障监测系统的有效性。该工作为 PON 故障监测系统设计和参数设置提供了指导。

#### 参 考 文 献

- [1] ITU-T higher speed passive optical networks: 50G PMD[EB/OL]. (2021-04-08) [2023-05-06]. <https://www.itu.int/itu-t/workprog/>.
- [2] 巩小雪,胡婷,张琦涵.色散抑制单边带数字滤波多址-无源光网络系统[J].光学学报,2022,42(14):1406002.  
Gong X X, Hu T, Zhang Q H. Dispersion suppressed single sideband digital filtered multiple access-passive optical network systems[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1406002.
- [3] Ab-Rahman M S, Manaf Z A, Kaharudin I H, et al. Customer edge downstream detection for automatic restoration scheme in FTTH-PON distribution network[J]. Photonics, 2022, 9(8): 560.
- [4] Ab-Rahman M S, Chuan N B, Safnal M H G, et al. The overview of fiber fault localization technology in TDM-PON network[C]//2008 International Conference on Electronic Design, December 1-3, 2008, Penang, Malaysia. New York: IEEE Press, 2009.
- [5] Yeh C H, Lee S C, Chi S. A protection method for ring-type TDM-PONs against fiber fault[C]//OFC/NFOEC 2007-2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 25-29, 2007, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2007.
- [6] Chan C K, Tong F, Chen L K, et al. Fiber-fault identification for branched access networks using a wavelength-sweeping monitoring source[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(5): 614-616.
- [7] Temporão G P, de Faria G V, Urban P J, et al. Fault location in passive optical networks using T-OTDR and wavelength-selective isolators[C]//Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, March 17-21, 2013, Anaheim, California. Washington, DC: OSA, 2013: NM21.4.
- [8] Zhang C B, Zhang M, Tang X Y, et al. Ghost reflection processing method in PON branch monitoring based on OTDR [C]//2022 IEEE 10th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN), August 23-24, 2022, Zhangye, China. New York: IEEE Press, 2023: 174-177.
- [9] Honda N, Iida D, Izumita H, et al. Bending and connection loss measurement of PON branching fibers with individually assigned Brillouin frequency shifts[C]//2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 5-10, 2006, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2006.
- [10] 黄秋茗,陈映恺,刘鑫煜,等.利用寻极大值法实现布里渊光时域反射技术频移快速定位及空间分辨率增强[J].光学学报,2023,43(14):1406004.  
Huang Q M, Chen Y K, Liu X Y, et al. Fast positioning of Brillouin optical time domain reflectometry frequency shift and enhancement of spatial resolution using maximum seeking method[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(14): 1406004.
- [11] Dou X Y, Yin H X, Hao Y, et al. Demonstration of chaotic-laser based WDM-PON secure optical communication and real-time online fiber-fault detection and location[C]//2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), June 28-July 2, 2015, Shanghai. New York: IEEE Press, 2015.
- [12] Fathallah H, Rusch L A. Code-division multiplexing for in-service out-of-band monitoring of live FTTH-PONs[J]. Journal of Optical Networking, 2007, 6(7): 819-829.
- [13] Zhu M, Zhang J, Wang D P, et al. Optimal fiber link fault decision for optical 2D coding-monitoring scheme in passive optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2016, 8(3): 137.
- [14] Ge Z Q, Chen S, Sun X H. Dynamic interaction process analysis between failure-detecting light pulse and 2D optical encoder in link health detection system for PON[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(3): 1063-1069.
- [15] Zhang X, Ning N, Yang T F. Uniform-fiber-Bragg-grating-based Fabry-Perot cavity for passive-optical-network fault monitoring[J]. Current Optics and Photonics, 2023, 7(1): 47-53.
- [16] 王紫超,刘志昂,杨华东.光频域反射与超弱光纤布拉格光栅技术的结构监测性能[J].激光与光电子学进展,2022,59(21):2106002.  
Wang Z C, Liu Z A, Yang H D. Structural monitoring performance of optical frequency domain reflectometry and ultra-weak fiber Bragg grating technologies[J]. Laser &



- Optoelectronics Progress, 2022, 59(21): 2106002.
- [17] Rad M M, Fathallah H A, Rusch L A. Fiber fault PON monitoring using optical coding: effects of customer geographic distribution[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(4): 1172-1181.
- [18] Vaughn M D, Kozischek D, Meis D, et al. Value of reach-and-split ratio increase in FTTH access networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(11): 2617-2622.

## Design and Anti-Interference Analysis of Fault Monitoring System Based on Multi-Wavelength Grouping for Passive Optical Network System

Jin Zheyi<sup>1</sup>, Bi Meihua<sup>1,2\*</sup>, Teng Xuyang<sup>1</sup>, Hu Miao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

### Abstract

**Objective** In recent years, with the rapid development of internet businesses and the emergence of emerging industries, large-capacity and high-speed optical access network systems have been deployed and extensively studied. Passive optical network (PON) technology has become a cost-effective optical access network solution due to its natural advantages of low power consumption and flexible bandwidth access. However, because of the passive nature of PON systems, in the event of fiber faults, the fault points cannot actively report fault information to the central office, making real-time monitoring and fault location maintenance work difficult. Additionally, there is mutual interference between users in the centralized tree-shaped network architecture of PON systems, which makes the point-to-point fault monitoring scheme of traditional optical network systems unable to accurately locate the specific link and fault. Therefore, studying effective PON system monitoring plans has also become one of the focuses of future PON system research. PON system fault detection methods, such as improved schemes using wavelength-tunable OTDR, Brillouin OTDR, and optical feedback with chaotic lasers, require adding difficult-to-install and/or expensive equipment to the system, which increases the system cost to some extent. Alternatively, although existing optical encoding schemes have good scalability and low upgrade cost, they have not considered the problem of system performance degradation caused by interference between different users. In this article, a PON monitoring system based on multi-wavelength grouping is proposed. By assigning users prone to interference to different groups and deploying corresponding reflecting Bragg gratings at the end of the link, different wavelengths are used to detect and distinguish between user groups, thereby reducing the probability of interference. We hope that our scheme and model can provide useful assistance for the design of PON fault monitoring systems.

**Methods** A user distribution model for PON is developed to calculate the interference probability function of users, and an optimization approach for multi-wavelength packet scheduling is mathematically formulated. The simulation results of this model have verified the feasibility of multi-wavelength packet scheduling as a means of reducing inter-user interference. The system performance is simulated by MATLAB based on the received signal power and the function of various noise components, and appropriate transmission power and pulse width parameters are obtained for different numbers of users and distribution ranges. The feasibility of a fault monitoring system for PONs based on multi-wavelength packet scheduling is simulated by OptiSystem and verified.

**Results and Discussions** Figure 3 shows the probability of interference occurrence under the multi-wavelength grouping scenario, where it can be effectively avoided when the number of equally spaced users is less than the wavelength number. The research results on the pulse width of the system show that the signal-to-noise ratio (SNR) has ideal values when the pulse width range is  $-10 \leq \lg T_c \leq -8$  (Fig. 4). When the pulse width  $T_c \geq 10^{-7}$  s, the signal-to-interference ratio (SIR) gradually approaches a lower boundary value (Fig. 6). The pulse width cannot be too narrow because reducing the pulse width requires a higher accuracy requirement for the system. Therefore, we suggest setting the pulse width to  $-9 \leq \lg T_c \leq -8$  in a PON fault monitoring system based on multi-wavelength grouping. Figure 5 shows that the SNR improves linearly with the transmitted power. It is found that when the number of users increases, the SNR exhibits a decreasing trend (Fig. 5). This is because an increase in the number of users within the same interference range causes an increase in both beat noise and shot noise, leading to a decrease in SNR. Additionally, when the maximum user spacing  $l_c = 1$  km and the number of users  $K$  increases from 64 to 128, the increase in interference causes SIR to decrease from 40.6 dB to

34.9 dB. This is because the decrease in user separation distance leads to an increase in interference, which in turn leads to a decrease in SIR. A PON fault monitoring system based on multi-wavelength grouping, with wavelengths of  $m=4$  and users of  $K=16$ , is constructed in OptiSystem software, and at a transmitted power of  $P_s=4$  dBm and pulse width  $T_c=10^{-8}$  s, the identification accuracy for 3 dB pulse width corresponds to 2 m (Fig. 7).

**Conclusions** A PON fault monitoring system based on multi-wavelength grouping is proposed. First, the interference caused by user distribution in PON systems is analyzed, and the probability of user distribution is derived. Subsequently, the optimal solution method for multi-wavelength grouping is mathematically modeled, and the theoretical impact of this grouping method on interference probability is obtained. It is proved that the multi-wavelength grouping method can effectively reduce the interference probability between users. In addition, the anti-interference performance of the PON fault monitoring system based on multi-wavelength grouping is investigated. The influence of different system parameters on SNR and SIR is simulated. For different user numbers and distribution ranges, selecting appropriate pulse widths and output powers can effectively improve system performance. It is found that when the pulse width is set to  $-9 \leq \lg T_c \leq -8$ , it can effectively suppress noise interference in the signal, thereby improving SNR, while also effectively reducing interference between users and ensuring that SIR remains within an acceptable range. Finally, by using the OptiSystem software, the system is simulated under conditions of wavelength number  $m=4$ , user number  $K=16$ , transmit power  $P_s=4$  dBm, and pulse width  $T_c=10^{-8}$  s. The simulation results show that the recognition accuracy corresponding to a pulse width of 3 dB is 2 m, and the results in the detection signal recognition module are consistent with the set parameters, verifying the effectiveness of the system. This work provides guidance for the design and parameter selection of PON fault monitoring systems.

**Key words** optical communication; optical encoding; fault detection; user distribution; signal-to-noise ratio; signal-to-interference ratio