

低开销混合式保护的高可靠的波分/时分混合无源光网络

熊余*, 汤小飞, 蒋婧

(重庆邮电大学 光纤通信技术重点实验室, 重庆 400065)

(*通信作者电子邮箱 xiongyu@cqupt.edu.cn)

摘要:针对光纤故障参与保护倒换元器件多、保护资源开销大的问题,提出一种低开销混合式保护的高可靠波分/时分混合无源光网络(WDM/TDM-PON)结构。所提结构在光线路终端(OLT)中新设计了逻辑判定、备份收发以及保护路控制单元,使波分复用(WDM)部分只对故障部分器件执行倒换操作,实现了低开销的集中式保护;在时分复用(TDM)部分采用交叉总线形结构,实现了快速的分布式保护倒换。经分析证明,所提混合式保护结构有效地减少了保护资源开销,对馈入光纤(FF)、配线光纤(DF)和最后一个公里光纤(LMF)故障提供了1.5~2.4 ms恢复时间的快速全保护,且具有良好的扩展性。

关键词:波分/时分混合无源光网络;光纤故障;低开销;混合式;全保护

中图分类号: TN913.7 **文献标志码:** A

Reliable wave division multiplexing/time division multiplexing passive optical network with cost efficient hybrid protection

XIONG Yu*, TANG Xiaofei, JIANG Jing

(Chongqing University of Posts and Telecommunications, Key Laboratory of Optical Fiber Communication, Chongqing 400065, China)

Abstract: To limit the number of components in the protection switching process and to accordingly reduce the protection cost, a new reliable Wave Division Multiplexing/Time Division Multiplexing Passive Optical Network (WDM/TDM-PON) architecture with cost-efficient hybrid protection was proposed. Firstly, the logic decision unit, protection path control unit and backup transceiver unit were designed in Optical Line Terminal (OLT) to only switch failure components to their backups in Wave Division Multiplexing (WDM) segment. Secondly, by employing the cross bus structure in Time Division Multiplexing (TDM) segment, fast protection switching was achieved in a distributed manner. According to the analytic results of the hybrid protection, the proposed architecture can provide fast and full protection in recovery time of 1.5 to 2.4 ms against Feed Fiber (FF), Distribution Fiber (DF) and Last Mile Fiber (LMF) failures. Certainly, the proposed architecture can also significantly reduce the protection overhead, and achieve great scalability.

Key words: Wave Division Multiplexing/Time Division Multiplexing Passive Optical Network (WDM/TDM-PON); fiber fault; cost-efficient; hybrid; full protection

0 引言

随着网络流量的急剧增加,现有基于时分复用的无源光网络(Time Division Multiplexing Passive Optical Network, TDM-PON)难以满足用户对带宽的需求^[1-2],因此FSAN(Full Service Access Network)标准组织在2011年启动(Next Generation Passive Optical Network 2, NGPON2)的标准研发,对NGPON2的需求、架构以及可能的技术方案进行了系统讨论。波分/时分混合无源光网络(Wave Division Multiplexing/Time Division Multiplexing Passive Optical Network, WDM/TDM-PON)技术比较成熟,综合了波分复用(Wave Division Multiplexing, WDM)高带宽和时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)低成本的优点,分光比大、资源调度灵活且过渡平滑,对原有网络影响比较小,通过合理的波长规划,

能保证WDM/TDM-PON技术与现有PON技术在同一个光分配网(Optical Distribution Network, ODN)中共存,成为下一代无源光网络演进的方向^[3-4]。因此,在综合考虑需求符合度、技术成熟度、成本和功耗等各项因素后,在众多候选技术中FSAN组织选择了WDM/TDM-PON作为主要技术方案。而WDM/TDM-PON由于承载业务多、覆盖范围广,若网络发生故障将造成海量数据丢失,因此设计一个高可靠的WDM/TDM-PON保护结构具有重要意义^[5-6]。

按照保护资源的配置方式可将PON的保护技术分为备份保护、分组保护和环网保护。针对下一代混合PON,文献[7]提出一种对光线路终端(Optical Line Terminal, OLT)设置1+1全备份保护结构,通过监视上行信号,实现了快速保护倒换,但全备份成本高,开销大。文献[8]提出一种分组保护结构,将两个第二层远端节点(Remote Node, RN)相连形成一

收稿日期: 2014-10-20; **修回日期:** 2014-11-17。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60972069, 61401052); 重庆市自然科学基金重点项目(2011BA2041); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ110531, KJ1400418); 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,四川内江人,副研究员,博士研究生,CCF会员,主要研究方向:宽带网络可靠性理论、抗毁技术及下一代无源光网络; 汤小飞(1989-),男,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向:下一代无源光网络的生存性; 蒋婧(1988-),女,四川邻水人,硕士研究生,主要研究方向:TWDM-PON的带宽分配。

个保护组保护配线光纤(Distribution Fiber, DF),相对于1+1全备份保护节约了资源,但其要求RN节点个数为偶数,且跨越光纤的故障保护有局限性。文献[9]提出一种环网保护,将多个PON系统的第一层RN节点互连成环形结构,并为多个OLT提供共享备份OLT,共享保护能很大程度上减少参与保护倒换的网元个数,但多个PON系统互连需要较长的备用光纤,资源开销较高,同时带来较长的保护倒换时间。

按照控制方式的不同又可将PON的保护技术分为集中式和分布式。集中式指故障后,保护倒换操作由OLT集中控制完成;分布式指故障后由RN或光网络单元(Optical Network Unit, ONU)分散地执行保护操作。文献[10]提出一种分布式保护结构,在TDM部分的保护环中以一个故障状态为基准状态,减少了参与保护倒换的元器件数量,但DF发生故障时,所有DF都参与保护倒换,仍造成保护资源浪费。文献[11]提出一种集中式保护结构,通过在OLT中设置的备份收发单元的保护调谐实现了局部故障当地恢复,减小了故障的影响范围,但需要最后一公里光纤(Last Mile Fiber, LMF)一起参与保护倒换,造成保护资源浪费。文献[12]提出集中式智能保护倒换机制,在OLT中采用数字逻辑判定单元控制光开关保护倒换,网络结构简单且网元成本低,但保护倒换时需要所有的DF参与,资源浪费大。集中式保护要求OLT更复杂,但能有效地简化系统其他元器件的结构,降低成本开销;分布式能够有效地减少故障影响范围,提高保护倒换速度。

可见,当前WDM/TDM-PON的保护技术,保护倒换过程中涉及到的网元数量普遍过多,故障影响范围较大,易造成网络保护资源浪费,增大了保护开销。

因此,为了实现光纤故障的全保护且尽可能减少参与保护倒换的网元个数,本文综合集中式和分布式优点,提出一种低开销的混合式保护结构。该结构在OLT中设计逻辑判定、备份收发、保护路控制等不同功能单元,在WDM部分实现了只有故障部分倒换到对应保护备份上的集中式智能保护;并且在ONU中仅采用一个功率监视器,实现了局部故障当地恢复的分布式保护,有效地降低了网络的保护资源开销。

1 保护的网路结构

1.1 网络总体结构

所提结构包括WDM部分和TDM部分,在WDM部分为树形备份结构,采用OLT集中式控制保护,有效地简化了RN和ONU,OLT与RN通过馈入光纤(Feeder Fiber, FF)相连接;TDM部分采用交叉总线形结构,利用此结构可以很好地减少故障影响范围,实现快速的分布式自保护倒换。具体如图1。

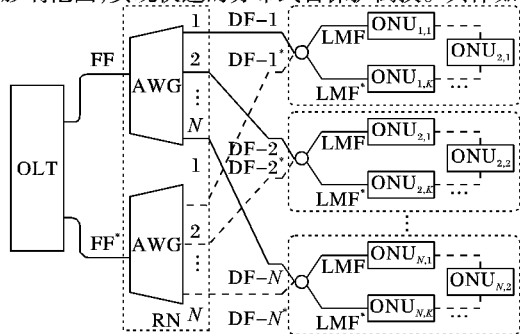


图1 所提保护结构

OLT中一般包括收发、功率监视、故障管理等三个功能单元。为了实现全保护倒换功能,本结构新设计了逻辑判定和备份收发单元,并提出一种新的功能单元——保护路控制单元。OLT中的各个单元相互连接通信以实现集中式保护倒换,如图2所示。结构中采用的阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG)都具有相同的自由频谱范围。

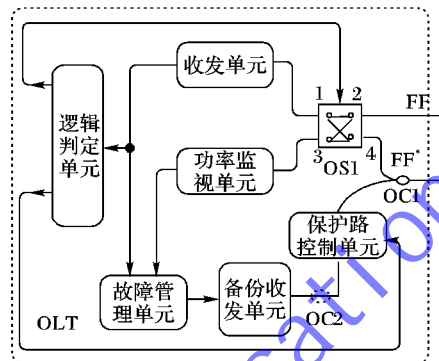


图2 OLT的基本结构

从本结构中可以看到,备份收发单元所调谐到的一个(或多个)保护波长,可以只通过故障部分对应的备份光纤恢复。相对于传统故障保护,所提结构实现了只有故障部分倒换到对应的保护备份上的快速保护,极大地节省了保护资源的开销。

1.2 核心功能单元基本结构

备份收发模块包括 m 个备份收发单元PTR_x,PTR_x包括可调谐激光器TL,接收器Rx,可调谐滤波器TF,光循环器Circulator,基本结构如图3所示。备份收发单元发出的下行信号经光耦合器OC2耦合后,传到保护路控制单元。从保护路控制单元来的上行信号经过Circulator的分离,传向TF。备份收发单元数量为 m ,理论上 m 可以为1到 n 之间的任意整数,但其实 $m \leq n$ 时即可满足网络的生存性,同时还能保证高效的冗余率,因此 m 可以设为允许同时发生故障的ONU组的最大数。

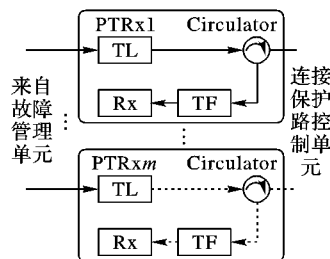


图3 备份收发单元基本结构

保护路控制单元包括一个1(2)光开关OS2和一个异或逻辑器件XOR,XOR根据OS2的状态和逻辑判定单元的输出信号控制OS2倒换,基本结构如图4所示。备份收发单元的输出信号发送到OS2的端口3,OS2的端口1连接到光耦合器OC1,OC1将来自OS1和OS2的信号进行耦合,通过保护光纤FF*连接到RN中的AWG。

逻辑判定单元由两部分组成,OLT中Rx发送的电信号同时给这两部分,其基本结构如图5所示。第一部分L-1包括 N 个非逻辑门和一个 N 输入与逻辑门,第二部分L-2为一个 N 输入与非逻辑门。L-1控制光开关OS1(横向连接或者交叉连接),L-2控制光开关OS2(1-2连接或者1-3连接)。

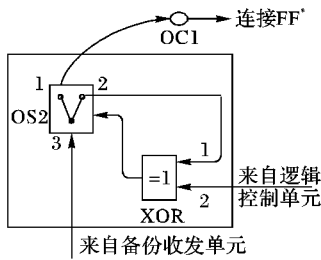


图4 保护路控制单元基本结构

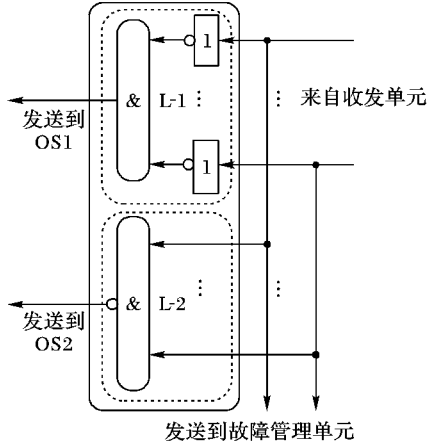


图5 逻辑判定单元基本结构

当 Rx 和对应的监视器都检测不到上行功率时,表明相应的 ONU 组整体掉线,此时光开关 OS2 依然倒换,但故障管理单元根据接收到的工作路径和保护路径上的逻辑信号,通知备份收发单元是否执行保护调谐,此时不通知备份收发单元调节到掉线 ONU 组对应的波长。

2 保护的工作原理

2.1 正常工作模式

正常工作模式下,下行信号只通过工作路径(FF 和 DF-i)进行传输,OLT 中 OS1 横向连接,OS2 置于端口 2 位置,如图 1 所示。下行信号在每个 ONU 组处经 2×2 OC 分成两部分,分别广播给各个 ONU。工作路径(图 1 中实线)和保护路径(图 1 中虚线)分别将 ONU 串联起来形成一个类似环的交叉总线形结构,正常情况下 ONU 只从工作光纤上接收数据。上行方向上,各上行数据通过工作光纤发送到 2×2 OC 处,分成两部分:一部分通过工作路径及 OS1 发送到 OLT 中的各个 Rx,另一部分通过保护路径传到 1×2 OC1 处再分为两部分,一部分发送到功率监视单元,另一部分经过 OS2 发往备份收发单元。

2.2 故障保护模式

光纤故障可分为以下 5 种情况进行讨论。

情况 1 FF 发生故障时。

此时 OLT 收发单元检测不到所有 ONU 组的上行信号,所有的 Rx 输出都为逻辑信号“0”,L-1 输出逻辑信号“1”,控制 OS1 倒换到交叉连接状态,此时整个网络倒换到保护路径上传输,实现数据业务的恢复,备份收发单元不进行保护调谐。

情况 2 当任意一条工作 DF 发生故障时。

此时,收发单元中对应的 Rx 检测不到上行信号,产生逻辑信号“0”到逻辑判定单元和故障管理单元。同时,监视相同信道的功率监视器能够检测到光信号,产生逻辑信号“1”给故障管理单元。故障管理单元根据接收到的逻辑信号,通

知备份收发单元调节到相应的波长上。

L-1 经过逻辑运算输出逻辑信号“0”,OS1 不进行倒换;L-2 输出逻辑信号为“1”,发往保护路控制单元中 XOR 的端口 2。XOR 的端口 1 连接到 OS2,当 OS2 倒换在端口 1 上时发送逻辑信号“1”到 XOR 的端口 1,否则发送“0”。此时 XOR 端口 1 接收到的逻辑信号为“0”,因此 XOR 输出逻辑信号“1”,OS2 倒换到端口 1 上。此时备份收发单元的下行信号可通过相应的保护路径发送到对应的故障 ONU 组,使得只有故障 ONU 组倒换到相应的保护光纤上,实现了低保护开销的故障恢复。

同时,若其他的一条或多条(故障数小于 m)工作 DF 再发生故障,各单元执行相应的操作,仍然能够实现只有故障的 ONU 组倒换到相应的保护光纤上。此时,L-1 输出逻辑信号为“0”,OS1 不进行倒换,L-2 输出逻辑信号为“1”发送到 XOR 的端口 2,而此时 OS2 处于端口 1 状态,因此发送到 XOR 端口 1 的为逻辑信号“1”,因此 XOR 的输出为逻辑信号“0”,OS2 将维持在端口 1 的状态上。这时,备份收发单元发出的保护数据可发送到 RN 节点,解复用后仍可实现只是故障的 ONU 组倒换到相应的保护备份上,实现低开销的故障恢复。

情况 3 当两条或者多条(故障数小于 m)工作 DF 同时发生故障时。

此时的恢复步骤与单故障时类似。OLT 收发单元中多个 Rx 接收不到信号,逻辑判定单元对 OS1 和 OS2 执行相应的控制,依然可以实现只有故障的 ONU 组倒换到相应的保护备份上,实现低开销的故障恢复。

若其他的一条或者多条(故障数小于 m)工作 DF 再发生故障,各单元执行相应的操作,仍然能够实现只有故障的 ONU 组倒换到对应的保护光纤上,其过程与情况 2 所述类似。

情况 4 当同时故障的 DF 数大于 m 时。

当故障管理单元检测到故障 DF 数大于 m 时,故障管理单元直接发送逻辑信号“1”到 OS1,控制 OS1 倒换到交叉状态(图 2 中为避免杂乱,未画出),且备份收发单元不进行保护调谐。

逻辑判定单元 L-1 的逻辑表达式为:

$$L_1 = w_1 \cdot w_2 \cdot \dots \cdot w_j \cdot \dots \cdot w_n \quad (1)$$

L-2 的逻辑表达式为:

$$L_2 = w_1 \cdot w_2 \cdot \dots \cdot w_j \cdot \dots \cdot w_n \quad (2)$$

其中: $w_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 为 OLT 中各个接收器发出的逻辑信号。

异或逻辑器件 XOR 的表达式为:

$$S = S_{12} \oplus S_{OS21} \quad (3)$$

S 表示 XOR 的输出信号, S_{12} 表示逻辑判定单元第二部分的输出信号, S_{OS21} 表示 OS2 是否连接在端口 1 上。

情况 5 LMF 发生故障时。

ONU 基本结构如图 6 所示。ONU 内部包括三个耦合器 Tap,一个功率监视器,光电检测器 PD,反射式半导体光放大器(Reflective Semiconductor Optical Amplifier, RSOA)。工作路径中信号按顺时针方向传输,Tap1 将信号分为两部分:一部分通过 Tap3 传到 PD,另一部分继续顺时针向下传输。上行方向,RSOA 将下行波长重调制发回 Tap3 并分为两部分:一部分在 Tap1 处将 ONU 的上行信号耦合进上行波长中逆时针传输,另一部分传到 OS。功率监视器根据 PD 的输出信号,控制 OS 的倒换。

LMF 发生故障时,PD 接收不到下行信号,功率监视器 M 发送一个逻辑信号控制开关 OS 倒换,这时 ONU 将切换到保

护光纤 LMF* 实现数据恢复,故障点后所有的 ONU 将自行倒换到保护光纤上按照顺时针方向传输上行信号,实现数据业务的恢复。

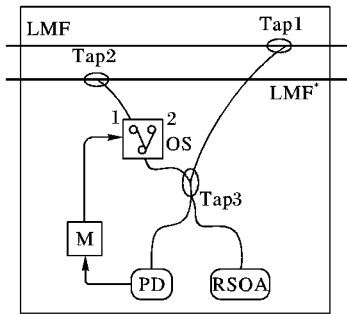


图6 ONU基本结构

3 性能分析

3.1 故障恢复时间

故障恢复时间 T_r 主要包括4个部分:故障检测时间 T_d ,故障定位时间 T_l ,保护倒换时间 T_p ,网络重同步时间 $T_{syn}^{[11]}$ 。根据文中所述的工作原理,可分别对故障恢复时间的4个组成部分进行计算,从而实现对故障恢复时间的定量分析,计算中涉及到的参数如表1。

表1 故障恢复中涉及的参数

符号	代表意义	典型值	参考文献
T_f	帧发送的持续时间	125 μ s	[11]
T_{pd}	光纤传输时延	5 μ s/km	[13]
T_s	ONU/OLT 处理信号时延	50 μ s	[14]
EqD_{max}	最大均衡时延	50 μ s	[14]
T_t	PTRx 的调谐时间	1 ms	[15]
T_{OS}	OS 的倒换时间	20 μ s	[11]

在对故障恢复时间计算时需注意以下几点:

1) 由于数字逻辑判定单元的反应时间非常短,远小于毫秒级,因此该时间可忽略。

2) 对 T_d 和 T_l 计算时,由于本结构中根据数字逻辑电路的状态判定网络是否故障,因此在逻辑判定单元进行故障判定时已提前进行故障检测与定位,故这段时间可不另作计算。

3) 保护路径的往返时延可以与工作路径同时测量得到。

此外,保护倒换时间 T_p 包括 OS 的保护倒换时间和 TF 的保护调谐时间,而 FF 发生故障时,由故障分析情况一可知,不需要 TF 进行保护调谐,此时的保护倒换时间为 T_{OS} ;若故障发生后需要保护调谐,由于 TF 保护调谐过程中, T_{OS} 远小于 T_t ,故在此过程中,保护倒换时间为 T_t 。

可见,网络重同步时间 T_{syn} 的计算是故障恢复时间计算的关键。网络的同步包括先测距再同步,通常测距过程包含在最后的同步步骤中。通过对网络同步的步骤分析可知,在执行保护操作后,OLT 首先发送信息给 ONU,通知 ONU 切换到保护路径,并让 ONU 使用保护路径上的均衡时延 EqD ,而这一过程 OLT 可能要发 N 次才能实现。ONU 切换到保护路径后,同时将保护路径对应的 EqD 放入自己的 EqD 寄存器,并且在新的 EqD 时延后给 OLT 反馈信息。当 OLT 检测到这些信息都是有效信息时,OLT 再次给 ONU 发送信息使其进入工作模式,同时 ONU 再次发送反馈确认信息。

依照上述的同步过程,同步的时间可表示为:

$$T_{syn} \leq N \times T_f + (T_f + EqD_{max} + T_f + T_{pd}) + (T_s + T_f + T_{pd}) + T_f \quad (4)$$

假设 $N = 5$ 次,则可计算到 $T_{syn} \leq 1.4$ ms。

同时可知:

当 FF 故障时,此时不需要进行故障定位:

$$T_r = T_{OS} + T_{syn} \leq 20 + 1.4 < 1.5 \quad (5)$$

当 DF 故障时,此时也不需要进行故障定位:

$$T_r = T_t + T_{syn} \leq 1 + 1.4 < 2.4 \quad (6)$$

当 LMF 故障时:

$$T_r = T_{OS} + T_{syn} \leq 20 + 1.4 < 1.5 \quad (7)$$

T_{OS} 的时间单位为 μ s, T_t 和 T_{syn} 的时间单位为 ms。

由上述计算可见,光纤故障可在 1.5 ~ 2.4 ms 实现恢复,具有较短的保护倒换时间,能对系统提供高可靠的保护。

3.2 系统可行性

为了验证所提结构的可行性,先对系统的功率预算进行计算;再对所提结构进行仿真,并根据仿真测得值进一步分析。结构中器件插入损耗的典型值^[12]如表2所示,根据工作原理可求得光通路的功率预算。设 FF 为 25 km,DF 为 5 km,LMF 为 2 km。为了说明机构的额一般适用性,结构中使用马赫曾德尔调制器 MZM 对光源进行调制,且设定激光器输出持续波长光的功率为 10 dBm,下行方向上的 EDFA 增益为 20 dB,当 RSOA 的输入功率大于等于 -14.5 dBm 时,RSOA 饱和增益输出功率为 12.5 dBm。

表2 结构中所用器件的插损典型值

符号	代表意义	典型值	符号	代表意义	典型值
L_{MZM}	MZM 插损	5 dB	L_{OC}	OC 插损	3 dB
L_{AWG}	AWG 插损	5 × 2 dB	L_{Tap}	Tap 插损	3 dB
L_{OS}	OS 插损	1 dB	L_{FB}	光纤插损	0.25 dB/km
L_{Cir}	Circulator 插损	0.8 dB			

表2中 AWG 处的“×2”表示光信号经历2次损耗,ONU 中 Tap1、Tap2 和 Tap3 为相同器件,且所有光纤具有相同插损,因此, $L_{Tap1} = L_{Tap2} = L_{Tap3} = L_{Tap}$, $L_{FF} = L_{DF} = L_{LMF} = L_{FB}$ 。

由上述所列数值,可计算出上/下行的功率预算。

WDM 部分下行(OLT 到 ONU 组之间)的功率预算 L_{down} :

$$L_{down} = L_{MZM} + L_{Cir} + L_{OS} + L_{FF} + L_{AWG} + L_{DF} + L_{OC} \quad (8)$$

WDM 部分上行(ONU 组到 OLT 之间)的功率预算 L_{up} :

$$L_{up} = L_{Cir} + L_{OS} + L_{FF} + L_{AWG} + L_{DF} + L_{OC} \quad (9)$$

由式(8)、(9)得 $L_{down} = 24.8$ dB, $L_{up} = 19.8$ dB。

TDM 部分上/下行单个 ONU 及其相应的 LMF 的功率损耗 L_u 为:

$$L_u = L_{LMF} + L_{Tap1} + L_{Tap3} = 6.5 \text{ dB} \quad (10)$$

完成了上述的功率预算的计算,为了进一步分析所提结构的可行性,对所提结构进行仿真。

以单故障为例进行仿真,为此令 $m = 1$,只用 PTRx1 对网络提供共享保护。TDM 部分只采用了一个 ONU,此时逻辑判定单元的 L-1 和 L-2 都可简化为一个非逻辑门,如图7所示。

本仿真中上下行都采用伪随机比特序列 PRBS 产生的速率为 2.5 Gb/s,码长为 $2^7 - 1$ 的非归零码 NRZ 进行调制。当下行的消光比(Extinction Ratio, ER)太大时,RSOA 不能将下行信号彻底“擦除”,对上行信号产生干扰,因此 ER 取值不能

太大^[12];又因为 NRZ 的调制方式需要较高的消光比,因此经过综合考虑,仿真中将系统 ER 设为 10 dB。仿真模式:正常工作模式(working)、背靠背模式(Back-To-Back, BTB)以及保护模式(protection),仿真中相关参数的设定如表 3。

表 3 仿真中的参数

参数	典型值	参数	典型值
LD 输出功率	10 dBm	色散系数	16.75 ps/(nm·km)
波长频率	193.1 THz	零色散斜率参数	0.075 ps/(nm ² ·km)
线宽	10 MHz	非线性系数	2.6E-020 m ² /W
脉冲的上升/下降沿	0.05 b	PIN 接收器的暗电流	10 nA
WDM 复用器频率间隔	0.1 THz	RSOA 的偏置电流	35 mA
光纤的衰减系数	0.25 dB/km	FF + DF + LMF	(25+5+2) km

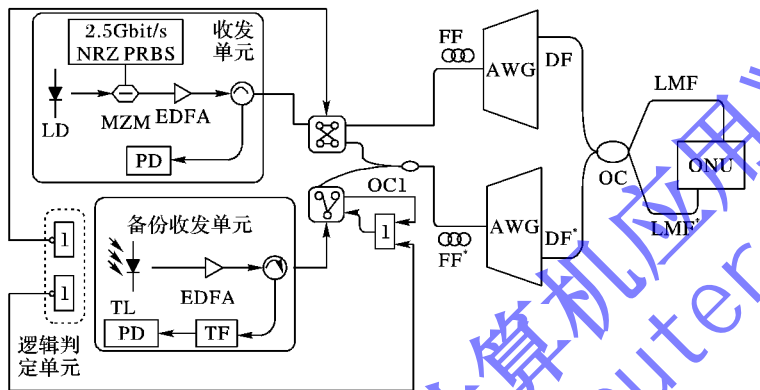


图 7 仿真中采用的保护结构

如图 8 为系统在正常工作模式和 BTB 模式下接收功率与误码率(BER)的关系。其中正常工作模式为系统经过 FF、DF 和 LMF 传输的模式。从图中可知,在 BTB 模式下,当 BER 为 10E-09 时,下行(DS)和上行(US)的接收机灵敏度分别为 -24.475 dBm 和 -32.832 dBm,而经过 30 km 的传输后系统的下行和上行灵敏度分别为 -23.635 dBm 和 -31.585 dBm。

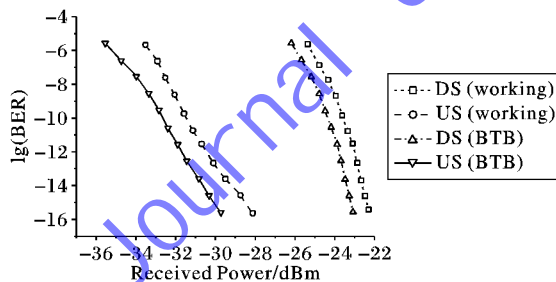


图 8 系统的 BER 性能

图 9 显示了网络中发生故障时系统在正常模式、BTB 模式以及保护模式下 BER 性能的比较。可知,系统经过 30 km 的光纤传输后,其下行和上行的灵敏度分别为 -24.475 dBm 和 -31.585 dBm,而系统在保护模式下,下行和上行的灵敏度分别为 -23.761 dBm 和 -31.768 dBm。由图 8 和图 9 中可知,系统的下行和上行在 BTB 模式和经过 30 km 传输模式之间所产生的功率代价分别为 0.8 dB 和 1.25 dB。下行方向的功率代价产生的主要原因是色散,而上行是对下行波长重调制,因此产生功率代价的主要原因是反向散射噪声。

此外,结合灵敏度及功率预算,可对系统的可行性作进一

步的分析。由 3.2 节中的计算可知,下行方向上 WDM 部分的功率预算为 24.8 dB, TDM 部分的功率预算为 6.5 dB,而下行的灵敏度为 -24.475 dBm,由此可计算得出下行方向上的功率余量近似为 23.2 dB,上行方向上的灵敏度为 -31.585 dBm,同样可以计算得到,上行方向上的功率余量近似为 24.3 dB。由此可知,本网络具有较大的功率余量,能够很好地提高网络的覆盖范围。

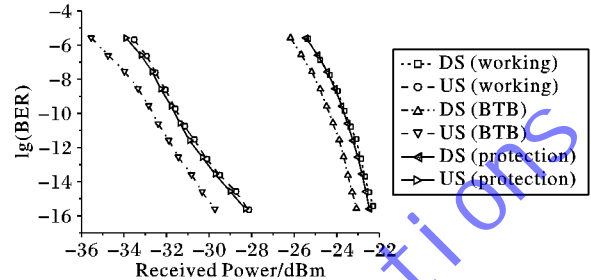


图 9 发生故障时系统各模式下 BER 性能

4 结语

针对传统故障保护开销太大的问题,提出了一种混合式支持光纤故障全保护的高可靠 WDM/TDM-PON 结构。在 WDM 部分采用集中式保护倒换,在 TDM 部分采用分布式自恢复的智能保护结构,实现了无论是 FF、DF 还是 LMF 故障,都只将故障单元倒换到其对应保护备份上的目的,从而极大地减少了保护开销。由网络故障保护的操作步骤可知,本结构可对 WDM 部分下行方向提供 1:1 保护,在上行方向上提供 1+1 保护;而对 TDM 部分提供下行 1+1 保护,上行提供 1:1 保护。

同时,通过计算得出,无论是哪部分光纤发生故障,都可以在 1.5~2.4 ms 实现网络故障的恢复。此外,通过仿真及计算可知,系统下行方向的功率余量为 23.2 dB,上行方向功率余量为 24.3 dB,验证了系统具有良好的可行性。

参考文献:

- [1] WONG E. Next-generation broadband access networks and technologies[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 597-608.
- [2] BINDHAIQ S, SUPA'AT A S M, ZULKIFLI N, et al. Recent development on Time and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation Passive Optical Network stage 2 (NG-PON2) [J]. Optical Switching and Networking, 2015, 15: 53-66.
- [3] LUO Y, ZHOU X, EFFENBERGER F, et al. Time-and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON stage 2 (NG-PON2) [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 587-593.
- [4] MAHLOO M, MAS MACHUCA C, CHEN J, et al. Protection cost evaluation of WDM-based next generation optical access networks [J]. Optical Switching and Networking, 2013, 10(1): 89-99.
- [5] FERNANDEZ A, STOL N. Failure impact, availability and cost analysis of PONs based on a network geometric model [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(S1): 0106002.
- [6] DIXIT A, MAHLOO M, LANNOO B, et al. Protection strategies for next generation passive optical networks-2[C]// Proceedings of the 2014 International Conference on Optical Network Design and Modeling. Piscataway: IEEE, 2014: 13-18. (下转第 619 页)

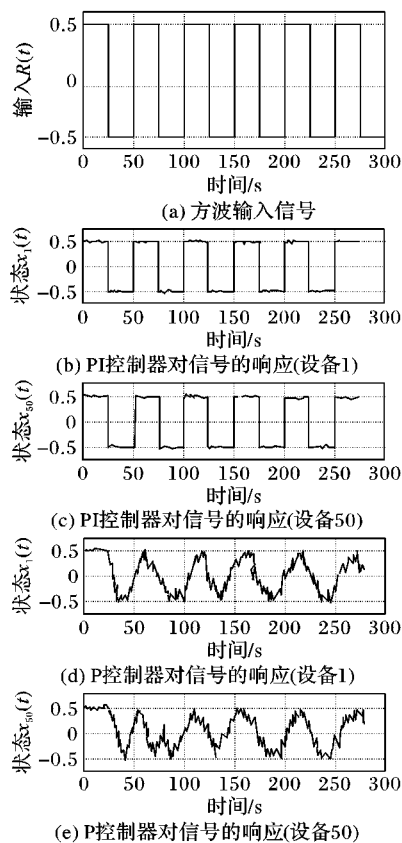


图5 采用PI和P控制器时的输入信号和输出响应

参考文献:

- [1] AL-HAMMOURI A, COVITCH A, ROSAS D, *et al.* Compliant control and software Agents for Internet robotics [C]// Proceedings of the 2003 8th IEEE International Workshop on Object-oriented Real-time Dependable Systems. Piscataway: IEEE Press, 2003:280-287.
- [2] WANG J T. Admission control with distributed joint diversity and power control for wireless networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(1): 409-419.
- [3] ZHANG S, YU F R, LEUNG V C M. Joint connection admission control and routing in IEEE 802.16-based mesh networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(4): 1370-1379.
- [4] WANG L, ZHU J, XI H, *et al.* Decision and control of markovian jump systems in manufacturing process [C]// Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1718-1721.
- [5] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of networked control systems [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.
- [6] ALMEIDA L, PEDREIRAS P, FONSECA J A G. The FTT-CAN-protocol: why and how [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(6): 1189-1201.
- [7] VELASCO M, FUERTES J M, LIN C, *et al.* A control approach to bandwidth management in networked control systems [C]// Proceedings of the 2004 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway: IEEE Press, 2004, 3: 2343-2348.
- [8] DAN HUANG, NGUANG S K. State feedback control of uncertain networked control systems with random time delays [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(3): 829-834.
- [9] ZHAO H, LI M, CUI M, *et al.* Dynamic bandwidth allocation algorithm according to controlling call-blocking probabilities proportion [J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(3): 202-208. (赵海军, 李敏, 崔梦天, 等. 按比例控制呼叫阻塞率的动态带宽分配算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(3): 202-208.)
- [10] ZHAO W, LI D. Dynamic bandwidth allocation algorithms of networked motion control systems based on CAN [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(10): 61-66. (赵维佳, 李迪. CAN网络化运动控制系统的动态带宽分配算法[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38(10): 61-66.)
- [11] GRAVAGNE I A, DAVIS J M, DACUNHA J J, *et al.* Bandwidth reduction for controller area networks using adaptive sampling [C]// Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2004, 5: 5250-5255.
- [12] SLIVA G J, ANIRUDDHA D, BHATTACHARYYA S P. PID controllers for time-delay systems [M]. Boston: Birkhauser, 2005: 161-190.
- [13] BRANICKY M S, PHILLIPS S M, ZHANG W. Scheduling and feedback co-design for networked control systems [C]// Proceedings of the 2002 41st IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE Press, 2002, 2: 1211-1217.
- [7] SEOL D-M, JUNG E-S, LEE S-S. Passive protection in a long-reach WDM/TDM-PON [C]// Proceedings of the 2010 9th International Conference on Optical Internet. Piscataway: IEEE, 2010: 1-3.
- [8] XU P, ZHANG Z, CHEN X, *et al.* Design and evaluation of a resilient protection scheme for hybrid WDM/TDM PON [C]// Proceedings of the 2012 Asia Communications and Photonics Conference. Piscataway: IEEE, 2012: 1-3.
- [9] KANUNGOE A, DAS R, BANERJEE R, *et al.* A new protection scheme for a combined ring-star based hybrid WDM/TDM PON architecture [C]// Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems. Piscataway: IEEE, 2012: 33-37.
- [10] QIU Y, CHAN C-K. A novel survivable architecture for hybrid WDM/TDM passive optical networks [J]. Optics Communications, 2014, 312: 52-56.
- [11] FAN H, LI J, SUN X. Cost-effective scalable and robust star-cross-bus PON architecture using a centrally controlled hybrid restoration mechanism [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(7): 730-740.
- [12] ZHU M, ZHONG W-D, XIAO S. A survivable colorless wavelength division multiplexed passive optical network with centrally controlled intelligent protection scheme [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2012, 4(10): 741-748.
- [13] International Telecommunication Union. ITU-T recommendation G.984.1—Gigabit-capable Passive Optical Network (GPON): general characteristics [EB/OL]. [2014-07-26]. <http://www.docin.com/p-63183081.html>.
- [14] International Telecommunication Union. ITU-T recommendation G.984.3—Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification [EB/OL]. [2014-07-26]. <http://www.docin.com/p-490300090.html>.
- [15] Lightwaves2020. General introduction of tunable filters [EB/OL]. [2014-08-11]. <http://www.lightwaves2020.com/publications/lightvision/newsletter-Jun-2008.pdf>.

(上接第605页)