



波长动态调度 TWDM 光接入网中的生存性保证

胡新天¹, 张治国², 陈雪²

(1. 中国移动通信有限公司研究院 北京 100053; 2. 北京邮电大学 北京 100876)

摘要: 如何在波长动态调度的时分波分复用光接入网中正确定位故障并进行保护倒换, 以保证强生存性是需解决的关键技术问题。为解决上述问题, 提出了一种具有成本效益的利用控制信道定位故障的和基于动态波长调度的生存性保证方案, 并对方案进行了生存性和成本的综合定量分析。分析计算表明, 所提方案最优时只需付出 1% 的生存性保证成本, 就能带来 54% 的生存性提高, 并且保护倒换能控制在 50 ms 内完成。

关键词: 光接入网; 生存性; 成本; 时分波分复用

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015220

Survivability Protection in TWDM Optical Access Network with Dynamic Wavelength Scheduling

Hu Xintian¹, Zhang Zhiguo², Chen Xue²

(1. China Mobile Communications Corporation Research Institute, Beijing 100053, China;

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: It is a key technical problem to locate failure correctly and perform protection switching for strong survivability in time and wavelength division multiplexing (TWDM) optical access network with dynamic wavelength scheduling. To solve the above problem, a cost-effective survivability protection scheme using control channel for fault location and based on dynamic wavelength scheduling was presented. For the scheme, the quantitative comprehensive analysis of survivability and cost was carried on. Analysis and calculations show that at the best the proposed scheme can pay only 1% of the cost for survivability protection and bring in 54% improvement in survivability. The proposed scheme can finish protection switching within 50 ms.

Key words: optical access network, survivability, cost, time and wavelength division multiplexing

1 引言

在过去 20 年中, 全球网络流量以 150%~160% 的平均速度逐年增长^[1]。按照网络流量增长的历史规律, 未来网络

流量依然会稳定地持续增长^[2]。一方面, 为满足上述带宽需求和提高成本效益的需求, 接入网正向着更大容量、更广覆盖和更高效率的方向发展。10 Gbit/s 无源光网络 (10-Gigabit-capable passive optical network, XG-PON) 和

收稿日期: 2015-06-20; 修回日期: 2015-09-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863”计划) 基金资助项目 (No. 2011AA01A104)

Foundation Item: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA01A104)

论文引用格式: 胡新天, 张治国, 陈雪. 波长动态调度 TWDM 光接入网中的生存性保证. 电信科学, 2015220

Hu X T, Zhang Z G, Chen X. Survivability protection in TWDM optical access network with dynamic wavelength scheduling. Telecommunications Science, 2015220



10 Gbit/s 以太网无源光网络 (10 Gbit/s ethernet PON, 10G-EPON) 将下行速率提升至 10 Gbit/s, 上行速率提升到 2.5 Gbit/s 和最大 10 Gbit/s, 分支比提升到最大 1:256 和 1:64。ITU-T G.989^[3] 中的时分和波分复用 (time and wavelength division multiplexing, TWDM) PON 吸取密集波分复用 (dense WDM, DWDM) PON 的大容量和 TDM PON 的高资源利用率优势, 具备 10 Gbit/s 以上速率。同时, TWDM PON^[4] 可以动态调度波长和时隙两维资源, 将空闲资源调度给有需求的用户使用, 充分利用已有的和新增的网络资源, 提高成本效益。

另一方面, 随着接入网络容量和覆盖范围的增加, 生存性保证变得更加重要。一旦骨干光纤发生断纤故障, 更多用户会受到故障的影响, 故障后造成的影响十分恶劣。ITU-T G.984.1^[5] 中描述了 4 种传统树型 TDM PON 的生存性保证方案。在 DWDM PON 中可以使用 1:1 或 1:N 共享保护通过在相邻光网络单元 (optical network unit, ONU) 间建立迂回路由对 ONU 和阵列波导光栅 (arrayed waveguide grating, AWG) 间的分配线光纤进行保护^[6,7]。考虑到 PON 的树型拓扑不利于实现有成本效益的生存性保证, 越来越多的方案开始考虑在接入网中引入环型主干光纤^[8-10]。

现有生存性保证方案^[11,12] 大多针对波长静态配置网络设计, 在具备动态波长调度能力的光接入网^[13,14] 中应用会造成故障定位难的问题。这是因为在波长静态配置网络中, 每个波长对应唯一的一些 ONU, 设备只需判断哪些波长的接收信号发生了故障就可以准确地定位故障。然而, 对于波长动态调度网络, 波长和 ONU 间没有直接对应关系。此外, 业内缺少结合灵活光接入网动态波长调度能力

的生存性保证方案。在设计和评价生存性保证方案时, 还需要综合定量分析方案的成本和生存性两个相互制约的因素, 提出具有最佳成本效益的方案。

为了解决上述问题, 本文提出了具有成本效益的利用控制信道定位故障的和基于动态波长调度的生存性保证方案, 并对所提方案进行了全网生存性和成本的综合定量分析。所提方案利用光纤环对故障后造成影响最大的主干光纤进行保护, 利用控制信道定位和检测故障, 通过中心站和远端节点分别切换起保护作用的光开关完成保护倒换。同时, 所提方案利用波长动态调度能力转移故障中心站业务线卡的业务。

2 生存性保证方案

图 1 是一种波长动态调度 TWDM 光接入网网络结构的示意^[15]。该网络结构由中心站 (central office, CO)、远端节点 (remote node, RN)、ONU、DWDM 光纤环和 TWDM/TDM 光纤树组成。中心站和远端节点通过双向传输的光纤环连接在一起。远端节点和 ONU 通过光纤树相连。光纤环上运行多个工作波长。中心站利用控制波长 (λ_{cu} , λ_{cd}) 控制远端节点动态地选择上下路业务波长 (λ_{1u} , λ_{1d} , λ_{2u} , λ_{2d})。网络的环树型拓扑便于有成本效益地实施生存性保证。下面以图 1 所示网络结构为例, 具体介绍所提的生存性保证方案。

2.1 光纤环单点故障

网络正常运行时, 下行业务沿环逆时针传输到各远端节点, 而上行业务沿环顺时针传输。中心站通过控制波长与各远端节点周期性地交互。对于故障保护, 一方面中心站通过交互判断各远端节点是否依然在线正常工作; 另一方面远端节点通过交互确认与中心站间的连接是否依然正常。

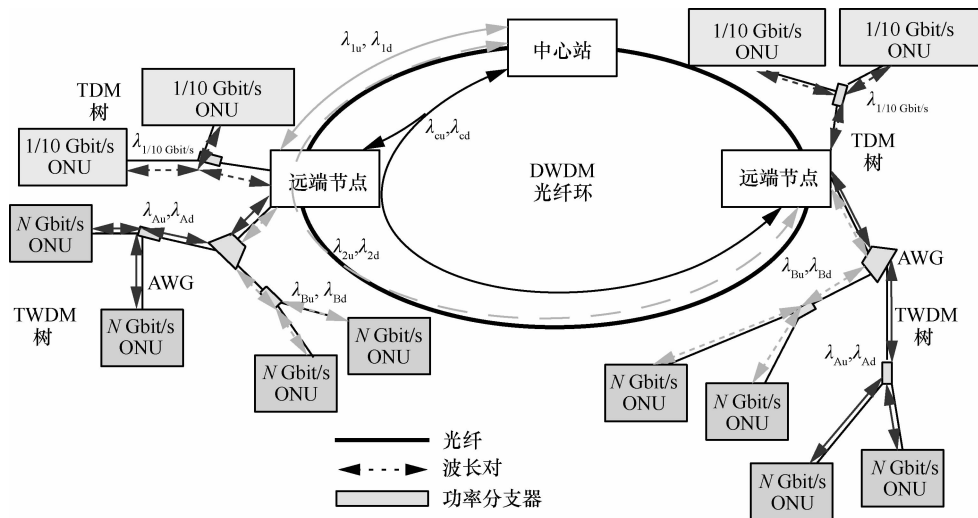


图 1 波长动态调度 TWDM 光接入网网络结构示意图

当任意两个远端节点间的光纤断开时,故障下游节点(沿光纤环逆时针方向比故障点距离中心站远的节点)无法通过原有连接与中心站进行上下行业务传输。如图 2 所示,网络中有 N 个远端节点。当远端节点 $i(i < N)$ 和 $i+1$ 间的光纤断开后,故障下游节点 $i+1$ 到 N 会检测到无法收到控制信息,并判断与中心站间的连接发生故障。中心站在周期性地检测远端节点是否在线时,会检测到远端节点 $i+1$ 到 N 之间无信息反馈,失去响应,而远端节点 1 到 i 在线正常工作。于是中心站根据上述现象判断网络中发生了故障,可能的故障类型是远端节点 i 和 $i+1$ 间发生了光纤环单点故障。

上述故障检测和定位方法是将 n 个相邻远端节点的

控制信道故障判定为光纤环单点故障。事实上, n 个相邻远端节点的控制信道故障也可能由 n 个相邻远端节点中的从控制器同时故障造成。但是该故障出现的概率极低(小于 1.04×10^{-12}),与光纤环单点故障出现的概率 ($1.37 \times 10^{-5}/\text{km}^{[16-18]}$)相比,可以忽略不计。

如图 3 所示,在故障发生后,通过远端节点自主切换保护光开关和中心站切换本地保护光开关,使单纤双向环变成两根双向光纤树。故障发生前,各远端节点沿一侧城域汇聚环纤与中心站进行双向通信。故障发生后,故障点上游远端节点仍沿原光纤与中心站进行双向通信,而故障点下游远端节点经倒换操作后沿光纤环另一侧与中心站进行双向通信。

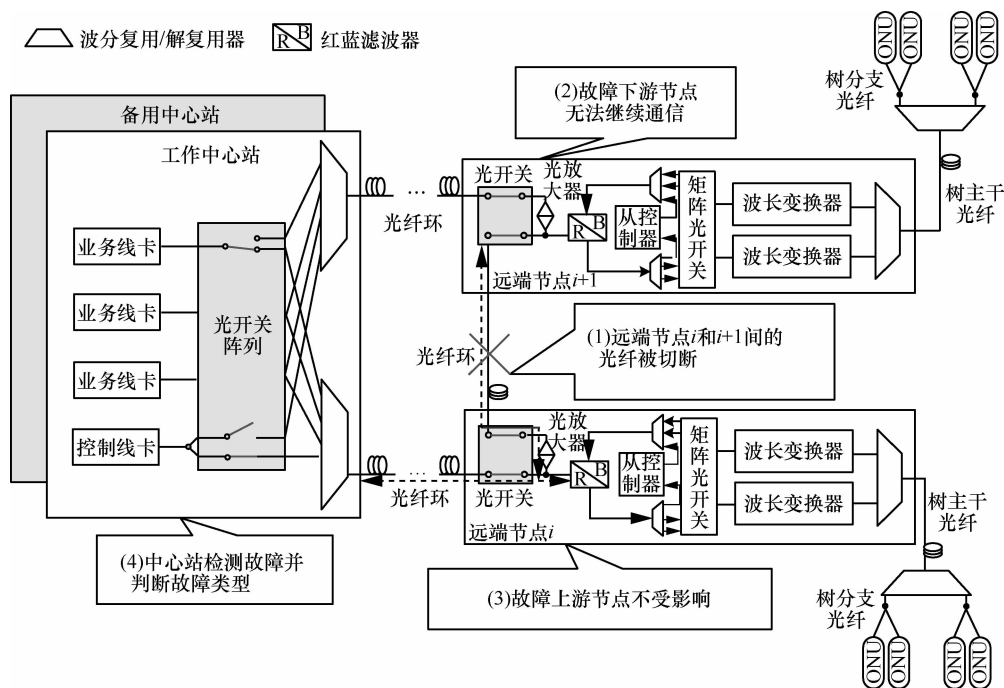


图 2 光纤环单点故障监测和定位

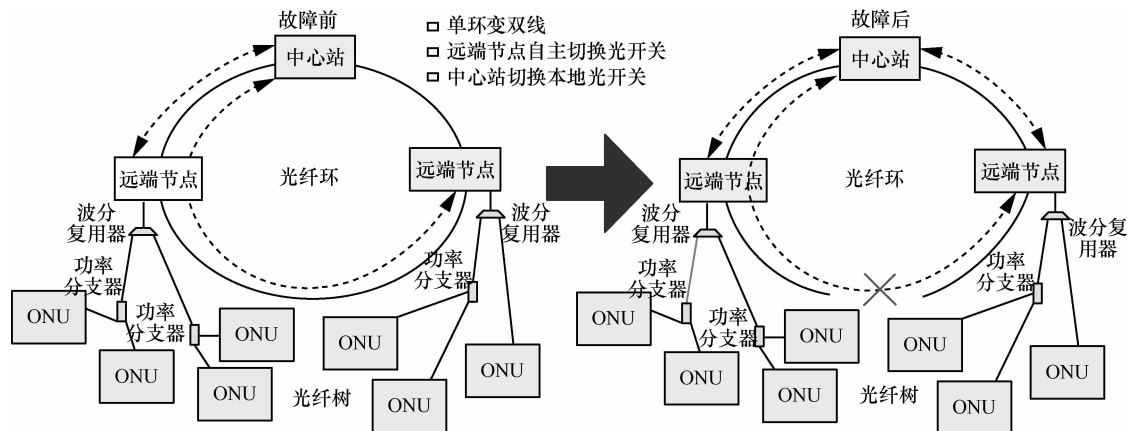


图 3 光纤环单点故障倒换操作的基本思路



中心站执行倒换操作后,对受故障影响的远端节点 $i+1$ 到 N 进行逐个测距。完成测距后,中心站重新启动动态资源分配机制和算法,恢复上下行业务传输。故障修复以后,网管系统下达修复还原命令,中心站控制网络恢复到正常的单纤双向环工作状态。

在中心站集中进行生存性保证,可以减少功率检测模块的数量。中心站还可以收集掌握全网工作状态,避免发生错误倒换,扩大故障影响,也便于后续进行故障修复。利用独立的控制波长进行故障检测和定位,可以解决由于波长动态调度带来的难于在中心站利用传统的根据接收到的业务信号,以信号丢失、信号失效、信号质量下降为依据的方法进行定位的问题,降低故障检测定位的复杂度,减少对器件的要求。利用已有的低速率控制信道实施,也不需要付出较多额外成本。

2.2 中心站业务线卡故障

网络正常运行时,中心站控制处于工作状态的业务线卡处理需要收发数据。一旦处于工作状态的业务线卡发生故障,故障线卡将无法响应中心站控制单元的操作或者主动向控制单元报告发生的故障。中心站根据上述现象判断业务线卡发生故障。

中心站检测到业务线卡故障后,在动态分配波长和时隙时,不再使用故障业务线卡的上下行波长,将准备发往该线卡的业务数据转移到其他线卡。具体地,中心站只需要在动态分配波长和时隙时,将故障业务线卡的工作波长从可用波长中剔除。而动态波长、时隙分配机制和算法的其他部分、中心站的其他功能和网络其他网元,依然按照正常工作状态运行。当故障排除后,修复的业务线卡重新加入波长和时隙的动态分配中。

3 生存性成本分析

单纯追求成本,无保护方案的成本必然最低。而单纯追求生存性,受保护位置越多的方案生存性越好。实际上,成本和生存性是两个相互矛盾的因素,所以在设计生存性保证方案时应当综合考虑成本和生存性,找到成本效益最高的方案。本节将对比两种生存性保证方案:无保护方案和环型树主干光纤保护方案。无保护方案去除所提方案中用于保护的备份中心站和光开关。环型树主干光纤保护方案在所提方案的基础上增加了保护光纤和光开关,对树主干光纤进行保护。

定义网络生存性成本比是相对生存性与相对成本之比:

$$SCR = \frac{S_{i_relative}(m)}{Cost_{i_relative}} \quad (1)$$

生存性成本比越高,生存性保证方案的成本效益越好。其中,方案 i 的相对成本和相对生存性分别为:

$$Cost_{i_relative} = Cost_i / Cost_1 \times 100\% \quad (2)$$

$$S_{i_relative}(m) = S_i(m) / S_1(m) \times 100\% \quad (3)$$

$Cost_i$ 和 $S_i(m)$ 是方案 i ($i=1,2,3$) 的总成本和 m 点故障生存性。无保护方案、所提方案和环型树主干光纤保护方案分别对应方案 1、方案 2 和方案 3。

设 C_x 为设备或器件 x 的成本, N_{LC} 是中心站的业务线卡数, N_{RN} 是远端节点数, $N_{TDM-Tree}$ 是每个远端节点下 TDM 分支的个数, N_{ONU} 是每个 TDM 分支上的 ONU 数, N_{OA} 是光纤环上的光放大器数, L_R, L_T, L_S 和 L_C 分别是光纤环、树主干光纤、树分支光纤和用于保护的光纤长度。则无保护方案、所提方案和环型树主干光纤保护方案的总成本依次为:

$$Cost_1 = [C_{\text{中心站}} + L_R \times C_{\text{光纤}} + C_{\text{光放大器}} \times N_{OA}]_{\text{环}} + [(C_{\text{远端节点}} + L_T \times C_{\text{光纤}} + C_{\text{波分复用器}}) \times N_{RN}]_{\text{树主干}} + [N_{RN} \times N_{TDM-Tree} \times (C_{1:N} \text{分支器} + N_{ONU} \times C_{ONU} + N_{ONU} \times L_S \times C_{\text{光纤}})]_{\text{树分支}} \quad (4)$$

$$Cost_2 = [2 \times (C_{\text{中心站}} + (N_{LC} + 2) \times C_{\text{光开关}} + C_{1:2} \text{分支器} + C_{\text{波分复用器}}) + L_R \times C_{\text{光纤}} + C_{\text{光放大器}} \times N_{OA} + C_{\text{光开关}} \times N_{RN}]_{\text{环}} + [(C_{\text{远端节点}} + L_T \times C_{\text{光纤}} + C_{\text{波分复用器}}) \times N_{RN}]_{\text{树主干}} + [N_{RN} \times N_{TDM-Tree} \times (C_{1:N} \text{分支器} + N_{ONU} \times C_{ONU} + N_{ONU} \times L_S \times C_{\text{光纤}})]_{\text{树分支}} \quad (5)$$

$$Cost_3 = [2 \times (C_{\text{中心站}} + (N_{LC} + 2) \times C_{\text{光开关}} + C_{1:2} \text{分支器} + C_{\text{波分复用器}}) + L_R \times C_{\text{光纤}} + C_{\text{光放大器}} \times N_{OA} + C_{\text{光开关}} \times N_{RN}]_{\text{环}} + [(C_{\text{远端节点}} + L_T \times C_{\text{光纤}} + C_{\text{波分复用器}} + C_{\text{光开关}} + L_C \times C_{\text{光纤}}) \times N_{RN}]_{\text{树主干}} + [N_{RN} \times N_{TDM-Tree} \times (C_{1:N} \text{分支器} + N_{ONU} \times C_{ONU} + N_{ONU} \times L_S \times C_{\text{光纤}})]_{\text{树分支}} \quad (6)$$

m 点故障生存性指 m 点发生故障后,网络平均残余通信容量占全网正常通信容量的比例^[19,20],即:

$$S(m) = \overline{C(m)} / C(0), m \geq 0 \quad (7)$$

其中, $C(0)$ 是全网无故障正常通信时的通信容量, $C(m)$ 是全网中指定的 m 点发生故障后的残余通信容量, $\overline{C(m)}$ 是全网所有 m 点故障情形下的平均残余通信容量。

表 1 是不同方案在不同数量故障点情况下的相对生存性和相对成本。在计算中,中心站的业务线卡为 8 个,远端节点为 8 个,ONU 总数为 1 024 个,光放大器为 4 个,光纤环长是 100 km,树主干光纤取 19.5 km,树分支光纤取 0.5 km,用于保护的光纤长度是 19.5 km。根据参考文献[21]确定不同设备或器件的成本 C_x ,其中欧洲的光纤铺设成本远高于亚洲。光纤的平均故障率取 $1.37 \times 10^{-5} / \text{km}^{[22]}$ 。从表 1 可以看出,与无保护相比,所提方案在欧洲多点故障场景下只需

表 1 相对生存性和相对成本

方案名称	相对生存性			相对成本	
	$m=1$	$m=2$	$m=10$	亚洲	欧洲
无保护	100%	100%	100%	100%	100%
所提方案	107%	114%	154%	104%	101%
环型树主干光纤保护方案	110%	120%	201%	110%	119%

付出 1% 的生存性保证成本,就能带来 54% 的生存性提高。

图 4 是各种方案单点故障下的生存性成本比。可以看出,所提方案在亚洲和欧洲的成本效益都是最高的,而且在欧洲的成本效益更高。环型树主干光纤保护方案在欧洲的成本效益最低。造成上述现象的原因是,所提方案利用光纤环进行生存性保证,未增加冷备份保护光纤,成本增加相对少,而所提方案针对故障影响最大的主干光纤环进行保护,带来的生存性提高又大于付出的成本,所以生存性成本比大于其他生存性提升小于或等于成本的方案的生存性成本比。对于欧洲场景,由于光纤铺设成本是网络总成本的主要组成部分,所提方案付出的光开关等额外成本相对于巨额的光纤成本只占总成本的 1%,又由于欧洲和亚洲的生存性不变,所以所提方案在欧洲的成本效益更高;环型树主干光纤保护方案保护的位置多,成本付出最多。特别是在欧洲场景,该方案需要增加 156 km 的备份光纤,而欧洲的光纤成本非常高。另外,在 ONU 总数为 1 024 个时,单点故障主要发生在树分支光纤,该方案的生存性优势又没有充分显现出来。

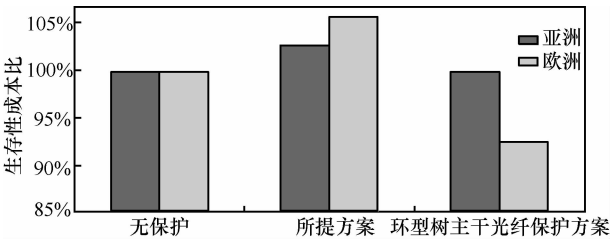


图 4 单点故障下各种方案的生存性成本比

综上,所提方案针对故障影响最大的主干光纤环进行保护,并且利用光纤环进行生存性保证,未增加冷备份保护光纤。所提方案最优时只需付出 1% 的生存性保证成本,就能带来 54% 的生存性提高。与其他方案相比,在最经常出现的单点故障下,所提方案具备最高的成本效益。

4 保护倒换时间

定义保护倒换时间为从故障发生到受故障影响的 ONU 再次根据带宽授权发送业务数据之间的时间。所提

生存性保证方案的保护倒换时间由以下时延组成。

(1)故障监测时间 $T_{\text{detection}}$

$T_{\text{detection}}$ 为从故障发生到中心站和距中心站最远的受故障影响的远端节点都检测到故障的时间。设故障发生在光纤环逆时针距中心站 L_{failure} 处,光纤环总长 L_{R} ,资源调度周期为 T_{cycle} 。假定中心站和远端节点连续 3 个周期收不到正常的连接状态信息时,判断网络中发生了故障。光纤环逆时针距中心站 L_{R} km 处有一个远端节点。

若故障发生时,当前周期控制信道上的控制信息刚好已通过故障点,中心站和远端节点需要通过下一周期的控制信息获知发生了故障,则此时故障监测时间为上限时间:

$$T_{\text{detection}}=4T_{\text{cycle}}+\max\{(L_{\text{R}}-L_{\text{failure}})L_{\text{failure}}\}/c_{\text{fiber}} \tag{8}$$

其中, c_{fiber} 为光在光纤中的传播速度, $L_{\text{R}}-L_{\text{failure}}$ 为与中心站传输距离最远的受故障影响远端节点与故障点间的距离。若故障发生时,连接状态信息正要通过故障点,却因故障被阻断,则故障监测的下限时间为:

$$T_{\text{detection}}=3T_{\text{cycle}}+\max\{(L_{\text{R}}-L_{\text{failure}})L_{\text{failure}}\}/c_{\text{fiber}} \tag{9}$$

(2)光开关切换时间 T_{os}

T_{os} 为光开关执行倒换操作的时间。此时间由光开关的自身性能决定。

(3)远端节点测距时间 $T_{\text{ranging_RN}}$

$T_{\text{ranging_RN}}$ 为从光开关完成倒换到中心站完成对所有受故障影响远端节点重新测距的时间。若光开关倒换完成时,中心站刚好错过在当前周期发起对远端节点测距的机会或远端节点未响应当前周期的测距请求(因距离故障点远,比中心站晚检测到故障。考虑环长 100 km,远端节点最多晚一个周期响应测距请求),则此时的远端节点测距时间为上限时间:

$$T_{\text{ranging_RN}}=T_{\text{cycle}}+N_{\text{failure_RN}}\times 2\times L_{\text{R}}/c_{\text{fiber}} \tag{10}$$

其中, $N_{\text{failure_RN}}$ 为受故障影响的远端节点数, $2\times L_{\text{R}}/c_{\text{fiber}}$ 为每个远端节点测距所需的时间。该时间忽略处理时延,并且考虑需要按最远传输距离为每个远端节点开窗。若光开关倒换完成时,中心站刚好可以在当前周期发起对远端节



点的测距,远端节点也能响应测距请求,则此时远端节点测距的下限时间为:

$$T_{\text{ranging_RN}} = N_{\text{failure_RN}} \times 2 \times L_R / c_{\text{fiber}} \quad (11)$$

(4)业务恢复时间 T_{recovery}

T_{recovery} 为从中心站完成远端节点测距到 ONU 再次根据带宽授权发送业务数据之间的时间。在这段时间,中心站首先需要为远端节点计算均衡时延,然后根据远端节点均衡时延的调整值,为 ONU 计算均衡时延,最后向远端节点和 ONU 通知均衡时延。所以,忽略处理时延,业务恢复时间的上限为:

$$T_{\text{recovery}} = T_{\text{cycle}} + (L_R - L_{\text{failure}}) / c_{\text{fiber}} + (L_R - L_{\text{failure}} + L_A) / c_{\text{fiber}} \quad (12)$$

其中, L_A 是从远端节点到 ONU 的最远传输距离。业务恢复时间的下限为:

$$T_{\text{recovery}} = (L_R - L_{\text{failure}}) / c_{\text{fiber}} + (L_R - L_{\text{failure}} + L_A) / c_{\text{fiber}} \quad (13)$$

(5)处理时间

网络中的处理时间包括中心站监测到故障后判断故障类型的时间、中心站计算均衡时延的时间、远端节点和 ONU 处理中心站测距和带宽授权信息的时间。处理时延通常只有几或几十微秒,对毫秒量级的保护倒换时间影响不大。因此为了使分析更加简洁,在本节的保护倒换时间分析和计算中不考虑处理时间。

综上,保护倒换时间的上下限分别为:

$$T_{\text{upper}} = 6T_{\text{cycle}} + \max \{ (L_R - L_{\text{failure}}), L_{\text{failure}} \} / c_{\text{fiber}} + T_{\text{OS}} + N_{\text{failure_RN}} \times 2 \times L_R / c_{\text{fiber}} + (L_R - L_{\text{failure}}) / c_{\text{fiber}} + (L_R - L_{\text{failure}} + L_A) / c_{\text{fiber}} \quad (14)$$

$$T_{\text{lower}} = 3T_{\text{cycle}} + \max \{ (L_R - L_{\text{failure}}), L_{\text{failure}} \} / c_{\text{fiber}} + T_{\text{OS}} + N_{\text{failure_RN}} \times 2 \times L_R / c_{\text{fiber}} + (L_R - L_{\text{failure}}) / c_{\text{fiber}} + (L_R - L_{\text{failure}} + L_A) / c_{\text{fiber}} \quad (15)$$

本文在 L_R 取 100 km, L_A 取 20 km, L_{failure} 从 12.5 km 变化到 100 km, $N_{\text{failure_RN}}$ 从 8 个变化到 1 个, T_{OS} 取最差值 20 ms, T_{cycle} 为 2 ms, c_{fiber} 为 200 km/ms 的条件下,对所提生存性保证方案的保护倒换时间进行了计算。

从图 5 可以看出,全网的保护倒换时间最大为 41 ms,满足标准的 50 ms 保护倒换时间要求。随着故障位置逆时针方向与中心站的距离越来越远,保护倒换时间逐渐下降。造成上述趋势的原因是:首先,由于光开关切换时间固定,保护倒换时间主要受故障监测时间、远端节点测距时间和业务恢复时间的影响。然后,对于远端节点测距时间,故障位置越远,受故障影响的远端节点越少,用于远端节点测距的时间也越短;对于业务恢复时间,随着故障位置逆时针方向与中心站的距离越来越远,保护倒换后,中心站与受故障影响的远端节点反而更近,控制信息在光纤中

的传播时延下降;对于故障监测时间,因为中心站和全部远端节点都需要发现故障,所以故障监测时间取最后发现故障设备的故障监测时间。故障位置远时,中心站发现故障的时间长,而故障位置近时远端节点发现故障的时间长。因此,实际上故障监测时间随故障位置变远而先变小再变大。综上,远端节点测距时间和业务恢复时间呈现变小趋势,而故障监测时间先变小再变大。又因为远端节点测距时间和业务恢复时间的下降幅度比故障监测时间的变化幅度大,所以保护倒换时间最终呈现出故障位置越远保护倒换时间越小的变化规律。

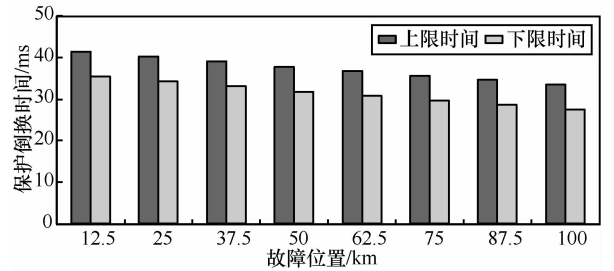


图 5 不同故障位置下保护倒换时间的上下限

5 结束语

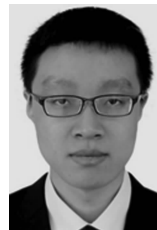
本文所提生存性保证方案,利用控制信道定位和检测故障,通过中心站和远端节点分别切换保护光开关完成保护倒换,利用波长动态调度能力转移故障中心站业务线卡的业务。所提方案能降低故障检测定位的复杂度,不借助备份实现对中心站业务线卡的生存性保证,降低为采取生存性保证付出的成本。所提方案还针对故障影响最大的主干光纤进行保护,并且利用光纤环进行生存性保证,不需要增加备份保护光纤。本文进行了全网生存性和成本的综合定量分析。分析计算表明,所提方案最优时只需付出 1% 的生存性保证成本,就能带来 54% 的生存性提高。与其他方案相比,所提方案具备最高的成本效益,所提方案的保护倒换能控制在 50 ms 内完成。

参考文献

- 1 Duser M. A review of past, present and future optical networks optics is driving structural change. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), Los Angeles, USA, 2011
- 2 Payne D. FTTP deployment options and economic challenges. Proceedings of European Conference and Exhibition on Optical

- Communication (ECOC), Vienna, Austria, 2009
- 3 ITU-T G.989.1. 40-Gigabit-Capable Passive Optical Networks (NG-PON2): General Requirements, 2013
 - 4 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). *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(4): 587~593
 - 5 ITU-T G.984.1. Gigabit-Capable Passive Optical Networks (G-PON): General Characteristics, 2008
 - 6 Chan T J, Chan C K, Chen L K, *et al.* A self-protected architecture for wavelength-division-multiplexed passive optical networks. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15 (11): 1660~1662
 - 7 Wang Z, Sun X, Lin C, *et al.* A novel centrally controlled protection scheme for traffic restoration in WDM passive optical networks. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(3): 717~719
 - 8 Bock C, Arellano C, Prat J. Resilient single-fiber ring access network using coupler-based OADMs and RSOA-based ONUs. *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Anaheim, CA, USA, 2006
 - 9 Seol D M, Jung E S, Lee S S. Cost-effective protection in long-reach hybrid PON. *Proceedings of European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, Torino, Italy, 2010
 - 10 Tsubokawa M. Reliability evaluation for distributed PONs with ring and tree topologies. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2012, 4(10): 790~798
 - 11 Wang Z, Sun X, Lin C, *et al.* A novel centrally controlled protection scheme for traffic restoration in WDM passive optical networks. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(3): 717~719
 - 12 Cheng X, Wen Y J, Xu Z, *et al.* Survivable WDM-PON with self-protection and in-service fault localization capabilities. *Optics Communications*, 2008, 281(18): 4606~4611
 - 13 Wong E, Mueller M, Amann M C. Characterization of energy-efficient and colorless ONUs for future TWDM-PONs. *Optics Express*, 2013, 21(18): 20747~20761
 - 14 Ossieur P, Antony C, Naughton A, *et al.* Demonstration of a hybrid DWDM-TDMA PON using tunable external cavity lasers in the ONUs. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(24): 3705~3718
 - 15 Hu X, Chen X, Zhang Z, *et al.* Dynamic wavelength and bandwidth allocation in flexible TWDM optical access network. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(12): 2113~2116
 - 16 Fan P, Chen H, Chen M, *et al.* Self-protected scheme for wavelength reusable WDM passive optical networks. *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Los Angeles, CA, USA, 2011
 - 17 Esmail M A, Fathallah H. Fiber fault management and protection solution for ring-and-spur WDM/TDM long-reach PON. *Proceedings of Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, Houston, USA, 2011
 - 18 Wosinska L, Chen J, Larsen C P. Fiber access networks: reliability analysis and Swedish broadband market. *IEICE Transactions on Communications*, 2009, E92-B(10): 3006~3014
 - 19 皇甫伟, 容鹏, 曾烈光. SDH自愈环生存性定量分析. *电子学报*, 2001, 29(11): 1558~1560
Huang P, Rong P, Zeng L G. Analysis of SDH self-healing ring survivability quantitative. *Journal of Electronics*, 2001, 29 (11): 1558~1560
 - 20 陈虹, 苏厉, 史国伟等. EPON接入网的生存性. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2004, 44(7): 933~937
Chen H, Su L, Shi G W, *et al.* The survivability of EPON access network. *Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)*, 2004, 44(7): 933~937
 - 21 Chen J, Wosinska L, Machuca C M, *et al.* Cost vs. reliability performance study of fiber access network architectures. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(2): 56~65
 - 22 Fan P, Chen H, Chen M, *et al.* Self-protected scheme for wavelength reusable WDM passive optical networks. *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Los Angeles, CA, USA, 2011

[作者简介]



胡新天,男,博士,中国移动通信有限公司研究院项目经理,主要研究方向为传送与接入网、时间和时钟同步。

张治国,男,博士,北京邮电大学信息光子学与光通信研究院副教授,主要研究方向为融合宽带多业务接入通信系统、网络 and 光纤传感器。

陈雪,女,北京邮电大学信息光子学与光通信研究院教授、博士生导师,主要研究方向为光接入网和光骨干传输。