

A Novel Online Monitoring and Feeder Fiber Protection Scheme for Passive Optical Network (PON)

Tianlei Xiao, Zhicheng Zhang, Wei Guo

State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

Email: icemmyxiao@sjtu.edu.cn

Received: Oct. 27th, 2011; revised: Nov. 30th, 2011; accepted: Dec. 4th, 2011.

Abstract: A novel online monitoring and protection scheme based on Optical Time-Domain Reflectometer (OTDR) and optical switches is proposed. In the experiment, online monitoring as well as the protection of feeder fiber can be achieved.

Keywords: Passive Optical Network; Optical Time-Domain Reflectometer; Online Monitoring; Protection

一种带有馈线保护功能的 PON 网络在线监测方案

肖天雷, 张志成, 郭 薇

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

Email: icemmyxiao@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2011 年 10 月 27 日; 修回日期: 2011 年 11 月 30 日; 录用日期: 2011 年 12 月 4 日

摘 要: 本文分析了在线监测和备份保护对 PON 网络的意义, 并提出了一种新的采用光时域反射仪 (OTDR) 和光开关的 PON 网络在线监测和保护方案。实验表明, 该方案可以同时实现对 PON 网络的在线监测和对馈线段的保护。

关键词: 无源光网络; 光时域反射仪; 在线监测; 保护

1. 引言

无源光网络(PON)以其成本低、带宽高、可扩展性强等优点, 已经开始被越来越多地运用到智能电网(Smart Grid)的通信网络之中。目前阶段, PON 在智能电网中的应用主要包括配电网自动化管理、用户用电信息采集等。由于 PON 网络在它的运行过程中不可避免地会发生一些故障, 而其中任何一个故障都会对系统运行带来影响, 所以这就对网络的可靠性提出了较高的要求。

在 PON 网络的维护过程中, 对光纤链路上的故障进行快速定位是一个比较困难的问题。所以, 建立一个能够对网络进行故障定位、链路监测、故障记录和告警的系统就变得很有意义。PON 网络的传统检测方法是使用仪表(OTDR、光功率计等)在故障终端进行测

试。这种方法需要在检测时临时断开用户的连接, 这不仅增加了维护的成本, 还会由于数据传输的中断而对用户造成较大的经济损失^[1]。为了能够在不影响数据传输的前提下进行链路检测, 我们必须采用在线监测(online monitoring)的方法。在线监测可以在不影响数据信号传输的前提下, 对光纤链路的状况进行检测和诊断, 从而实现了对链路故障的预防。这样可以有效地降低维护成本, 提高维护效率。此外, 链路保护(protection)方案对 PON 网络也十分重要。在 PON 网络中, 馈线段光纤位于 OLT 所在的局端(CO)到分光器(Splitter)之间, 所以发生在馈线段的故障会导致所有用户终端无法正常工作, 影响较大, 必须采用 1:1 保护策略; 而配线段光纤则位于分光器到用户接入点之间, 它与馈线相比, 长度较短, 涉及用户较少, 通过在线监测已经能够预防多数故障, 所以没有必要对配

线段采用 1:1 保护方案, 这样反而增加了成本^[2]。

现有的集中式光链路监测方法, 是利用光时域反射仪 (OTDR) 从局端对各配线分支进行点对多点 (P2MP) 的测试^[3]。在这种方法中, 测试信号由于通过了分光器而产生较大的衰减^[4], 为了提高数据准确性, 就必须增加 OTDR 的动态范围, 从而增加成本; 此外, 当几个 ONU 与 OLT 的距离接近时, 它们的反射曲线会产生混叠, 因而影响数据分析^[5]。为了克服这些问题, 文献[6]利用 B-OTDR 进行在线监测, 它首先对配线光纤进行改造, 为每一段光纤都分配一个布里渊频移(BFS)大小, 并利用各光纤 BFS 的不同来区别不同的配线分支, 解决了测试曲线混叠的问题。但这种方法需要对配线段光纤进行大幅度的改造, 成本较高。在文献[7]中, 测试信号虽然绕过了第一级分光器, 但在第二级分光器处, 仍然会遇到 P2MP 方法中曲线混叠的问题。在文献[8]中, 测试信号通过远端光开关绕过分光器, 虽然避免了分光器对测试信号造成的巨大衰减, 但是因为系统通过因特网传输远端控制信号, 所以整个系统的可靠性在一定程度上取决于外部网络。另外, 它们都不具备对链路的保护功能。

为了将保护策略应用到 PON 网络监测系统中, 文献[9]提出了一种将监测和保护相结合的方案。它可以在链路发生故障时, 通过光开关的切换, 将数据信号转换到备纤传输, 同时利用 OTDR 检测发生故障的光纤。根据其结构, 它只能对光纤链路进行暗纤监测。但是, 暗纤的状态并不能代表当前工作链路的状态, 所以此方案无法做到真正的在线监测。此外, 该方案中改变 OTDR 测试测路径会触发工作路径的切换, 这

会对数据信号的传输造成一定的影响。

为了改进上述的问题, 本文提出了一种 PON 网络在线监测和保护方案。它通过光开关和控制单元, 避免了曲线混叠的发生; 并且使 OTDR 可以自由选择待测链路(包括当前工作链路), 解决了暗纤测试的问题, 实现了真正的在线监测。另外, 本方案还对馈线段实施了 1:1 保护。

2. 体系结构

本文提出的光缆在线监测和保护方案的主要结构如图 1 所示。在 EPON 基本结构的基础上, OTDR、 1×2 光开关(SW1)和 OLT 一起被安放在局端。测试信号在经过 SW1 后, 与 OLT 的下行信号一起通过复用器进行耦合。由于 OTDR 采用的是 1650 nm 的波长, 不会对 PON 网络的下行(1490 nm)和上行(1330 nm)信号产生干扰, 所以可以用来进行在线监测。耦合信号通过一个 2×2 光开关(SW2)后, 经馈线传输到远端节点 (RN)。SW2 的另一个输入端口与 SW1 的 2 号输出端口相连。SW2 的两个输出端口, 分别通过工作光纤 (DF1) 与保护光纤 (DF2), 连接到 2×1 光开关(SW3)。SW3 的输出端口与解复用器相连, 数据信号与测试信号在此处分离。分离后的数据信号将通过分光器进入配线段, 进行正常的数据传输。而测试信号经过一个 $1 \times n$ 的光开关(SW4)后, 每个输出端经复用器与分光器对应的输出端相连, 从而再一次与下行数据信号耦合, 在配线上进行传输。

在正常情况下, SW1 的输出端为 1 号端口, SW2

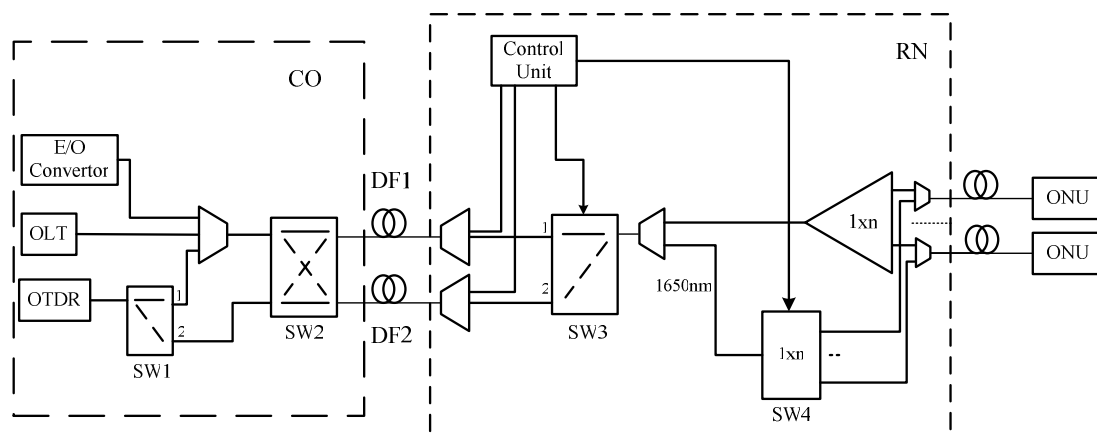


Figure 1. System architecture of the proposed fiber monitoring and protection scheme

图 1. 光纤监测和保护方案结构图

处于 bar 状态, SW3 的输入端为 1 号端口。此时, 数据信号和测试信号将通过馈线段的工作链路(DF1)进入 RN。系统通过改变 SW4 的状态可以选择不同的配线分支, 而后测试信号会对所选路径进行在线监测。

当工作馈线发生故障时, 各个光开关的切换命令会由 CO 发出。此时, SW1 的输出端切换至 2 号端口, SW2 变为 cross 状态, SW3 的输入端切换为 2 号端口。此时由于 SW1 状态的改变, OTDR 测试信号不再与数据信号进行耦合, 而是绕过复用器, 经过 SW2 直接对发生故障的原工作链路(DF1)进行检测, 从而进行故障的判断和定位; 同时数据信号经过 SW2 被切换到保护馈线(DF2)中进行传输。系统通过 SW2 和 SW3 的切换, 为馈线段建立了一条保护路径。保护/恢复的时间取决于软件控制时间和相关光开关的切换时间。当故障被排除后, 技术人员会将所有光开关恢复到原来的状态。

在本方案中, 还需要考虑远端节点的供电问题以及控制信号的传输问题。远端有源器件的供电问题可以通过使用太阳能蓄电池来解决, 也可以通过分离一部分测试信号并对其进行光电转换来解决。控制信号可以通过波分复用, 利用工作光纤的一个波长通道进行传输; 还可以利用无线网络或因特网进行传输。

3. 实验结果

为了验证该方案的可行性, 我们搭建了一个实验平台。由于实验条件的限制, 我们简化了方案结构。实验平台的结构如图 2 所示。我们使用了一个 1:5 分光器, SW4 为 1 × 5 光开关。由于实验条件的限制, 方案中使用的四个光开关都由对应的单片机系统控

制。PON 网络的馈线段由 21 km 和 2 km 单模光纤连接而成, 每一段配线分支都由一根 12 km 的单模光纤构成。此外, 监测中心通过网线分别与 OTDR 和单片机系统相连, 用来向这 2 个模块发送控制指令。GIS 管理系统安装在局端, 通过 TCP/IP 与监测中心进行通信。该管理系统是基于 GE Smallworld PNI 开发的, 向用户提供故障标注、数据录入以及光开关控制等功能。

系统的控制流程图如图 3 所示。当检测任务开始时, 监测中心向单片机发送控制指令控制 SW4 选择待测配线分支。同时, 监测中心会控制 OTDR 对所选链路开始一次检测。当 OTDR 成功完成检测后, 会将测量数据发送回监测中心。监测中心将此次测量数据与正常情况下得到的参考数据进行比较。根据两者之间数据的差异, 系统可以判断此链路是否发生故障。若链路发生故障, 系统会根据接收到的数据点得出故障发生的位置, 即故障点距 CO 的光纤沿线距离。监测中心会将测试数据、故障标识、故障距离和配线编号等信息按一定的数据格式进行封装, 发送到 GIS 管理系统。GIS 系统会将收到的故障距离数值 d_f 与预先设定的馈线段距离 d_0 相比较, 若 $d_f > d_0$, 则可以判断故障发生在配线段, 反之则发生在馈线段。若故障发生在馈线段, 系统将执行保护切换动作。GIS 系统会按照预设的数据格式向监测中心发送控制指令, 控制光开关将数据传输路径切换到保护链路上。同时, GIS 系统会弹出告警, 将故障点的位置在地图上予以标注, 并将此次事件录入数据库, 系统界面如图 4 所示。若故障发生在配线段, GIS 系统不执行保护切换, 而是直接弹出告警、记录故障事件并在地图上标记。

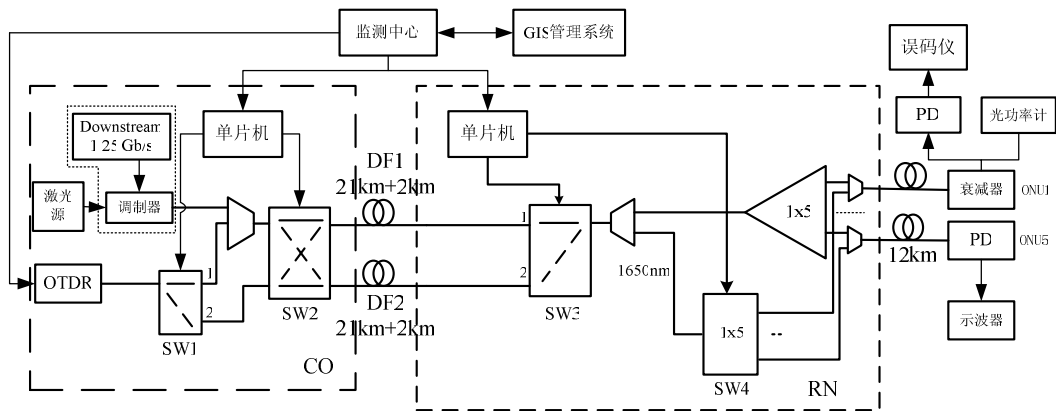


Figure 2. Experiment setup
图 2. 实验结构图

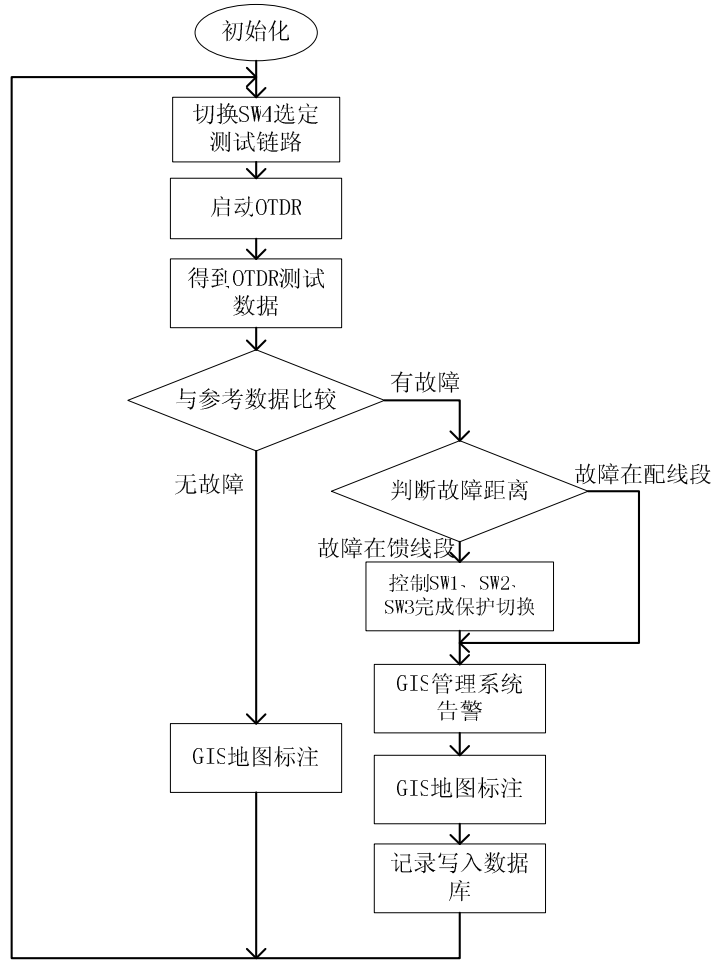


Figure 3. Flow diagram of the monitoring system
图 3. 控制流程图

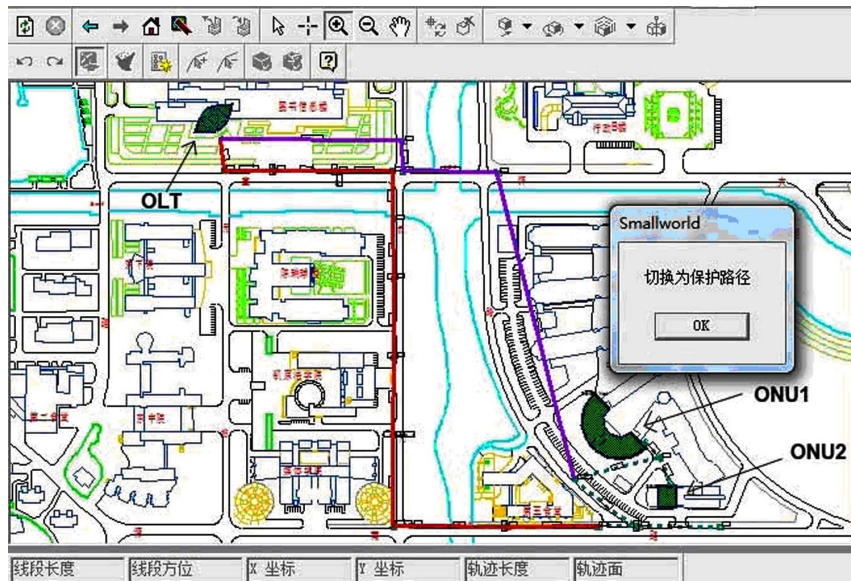


Figure 4. Alert of the fault in feeder fiber
图 4. GIS 馈线故障告警

我们将 OTDR 接入 SW1 的输入端，从局端对 ONU1 的配线分支进行了 OTDR 的常规测试。图 5 为 OTDR 的测量曲线。其中，图 5(a)为正常情况下测得的 OTDR 测试曲线。从图中我们可以看出，馈线段由两段总长 23 km 的光纤组成(21 km 和 2 km)，配线段长为 12 km。这条曲线数据就作为判断链路状况的标准，称为参考曲线。通过断开 21 km 和 2 km 间的连接，实验模拟了一个距离局端 21 km 的馈线段故障。图 5(b)为故障发生后得到的 OTDR 测试曲线。比较两图可以看出，图 5(b)中 OTDR 背向散射信号功率在 21 km 之后快速衰减，由此我们可以得出光链路在馈线段存在一个离局端 21 km 的断点。这证明 OTDR 在该方案中能够发现光链路上的异常，并可以通过与参考数据进行比较的方法来判别故障。我们在配线段又进行了相同的实验，由于器件的限制，实验采用了 21 km 光纤作为馈线段，而 12 km 和 2 km 光纤作为 ONU1 配线段，并通过断开 12 km 和 2 km 光纤间的连接来模拟配线段故障。实验同样得到了类似曲线，证明系统也能够发现和检测配线段的故障。

在系统正常运行时，数据信号通常会与测试信号耦合在一根光纤中进行传输，也可能因为发生故障而改变传输路径，所以我们需要检验 OTDR 测试信号以及不同的传输路径(工作链路和保护链路)是否会对 PON 网络的数据传输业务造成影响。于是我们在 ONU1 的配线分支上对系统进行了误码率(BER)的实验。如图 2 所示，误码仪的发送端发送的信号经过调制器，被 1550 nm 的窄带激光源进行调制。调制后的信号与测试信号耦合进行传输，向 ONU 发送下行信号。误码仪发送的源信号经过整个系统后由 ONU1 配线段光纤的输出端输出，经过可调衰减器后与光电探测模块(PD)相连，将输出的光信号转换为电信号。光电探测模块的输出口与误码仪的接收端相连，将转换后的电信号送回误码仪，进行误码率的测量和分析。实验分别在正常路径、保护路径、正常路径受 OTDR 测试光影响、保护路径受测试光影响这四种不同情况下进行了下行信号的 BER 检测。通过调节衰减器的衰减幅度，我们可以从光功率计中得出 ONU 接收信号功率大小和对应的误码率大小。最后，通过 matlab 程序将数据点进行拟合得出曲线，如图 6 所示。

从图中我们可以看出，对于同一路径，加入 OTDR

测试信号后的误码率曲线与没有测试信号的误码率曲线相比，误码率增幅非常小，可以忽略不计。对于不同的路径，正常链路的误码率与保护链路的误码率也非常接近，并且都符合实际应用要求。所以我们可以得出结论，测试信号与保护切换对 PON 网络误码率的影响非常小。这直接证明了本方案在 PON 网络上进行在线监测和馈线保护切换的可行性。另外，在实验中，

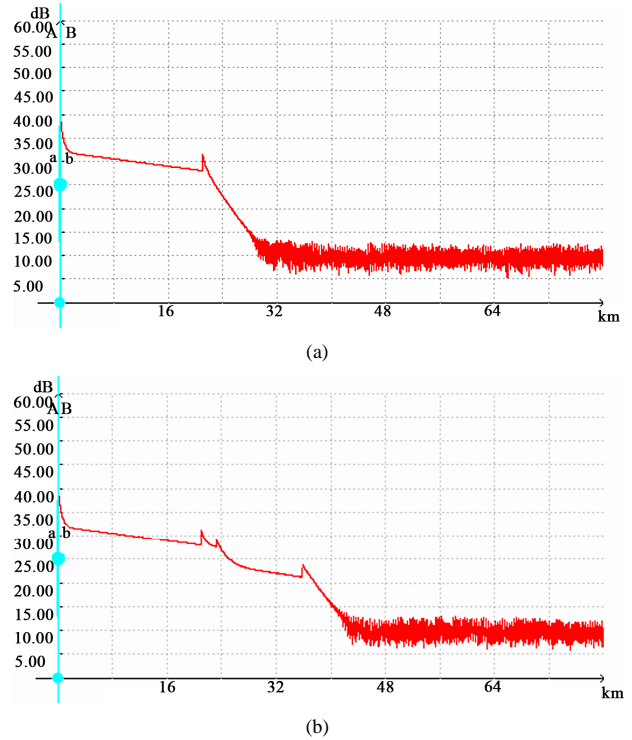


Figure 5. OTDR trace (a) without fault point, (b) with fault point
图 5. OTDR 测试曲线: (a) 故障前, (b) 故障后

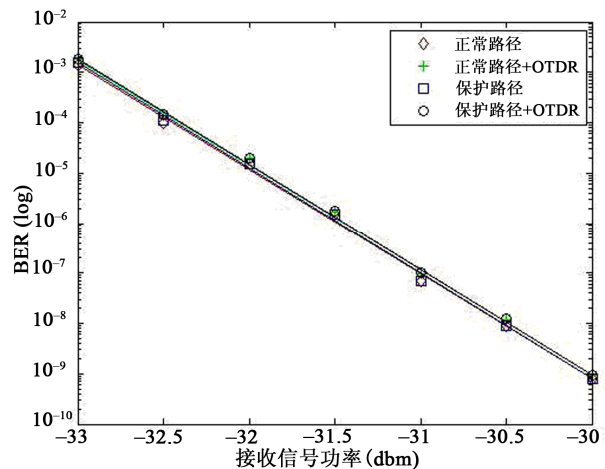


Figure 6. Measured BER for downstream signal
图 6. 下行信号 BER 测试曲线

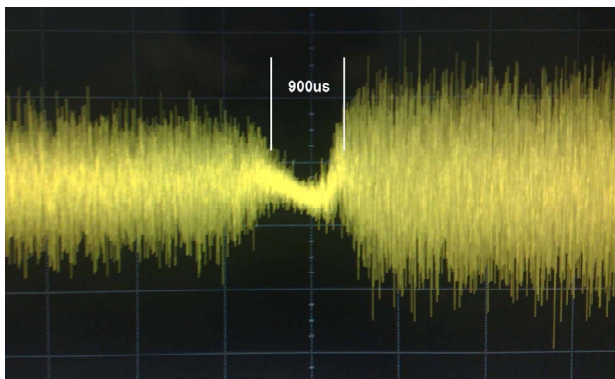


Figure 7. Measured characteristic for protection switch
图 7. 保护切换波形图

单个光开关插入损耗为 0.7 db，四个光开关总插入损耗共计 2.8 db，1:5 分光器插入损耗为 9 db，系统的总插入损耗约为 21.4 db。可见 PON 网络在经过本方案改造后，其功率预算依然符合要求。

为了证明方案能够实现无缝切换，我们还进行了馈线保护置换时间的实验。如图 2 所示，实验在 ONU5 配线分支上完成。本实验移除了图 2 局端中虚线部分的器件(调制器和下行信号发生器)，将 1550 nm 窄带激光源发出的光信号直接通过波分复用器与测试信号耦合进行传输。此信号从 ONU5 配线输出端输出。输出端与光电探测模块(PD)相连，从而将输出的光信号转换为电信号。为了观察输出信号的波形，我们将转换后的电信号接入示波器。在没有保护切换动作的情况下，示波器中会显示具有一定幅度的输出信号波形。每次系统进行保护切换时，由于软件和器件的延迟，信号会消失一段时间。而在保护路径建立之后，输出信号波形会恢复成原来的样子。这段时间间隙的长短就是保护切换的时间。由于正常路径与保护路径在总损耗上略有不同，所以在示波器中两种信号幅度也会略有不同。实验中我们模拟出馈线故障，使得系统对馈线段进行保护切换。此时输出波形中的保护切换间隙部分如图 7 所示。从图中我们明显可以看出，波形中间有一段幅度趋于零的间隙，而间隙两边波形均有一定的输出幅度。其中左边为保护路径时的信号输出波形，右边为正常路径时的信号输出波形。根据示波器屏幕上的刻度，时间轴上每一格为 1 ms，所以可以得出保护切换时间约为 900 μ s。由此，我们证明了本方案拥有较快的保护切换时间，可以实现无缝切换。

4. 结束语

本文分析了 PON 网络监测方法中具有一些代表性的研究成果，并将在线监测和保护的问题相结合，提出了一种带有馈线保护功能的 PON 网络在线监测方案。它解决了目前光链路监测方法中存在的一些问题，可以有效地减少维护时间和维护成本。通过实验证明，该方案可以在不影响数据传输的前提下，提供较快的保护切换和光缆在线监测功能。

本方案侧重于测量光纤链路上的故障监测，若今后与 PON 网络网管系统相结合，则可以组成一个全面的 PON 网络故障监测系统，不仅能够监测链路故障，还可以监测节点故障、查看有源器件的性能信息。这样可以进一步提高智能配电网通信系统的可靠性。

5. 致谢

本项目由中国自然科学基金会(批准号：61071080)、973 计划(批准号：2010CB328204, 2010CB328205)和 863 计划资助。

参考文献 (References)

- [1] B. Ng, M. S. Ab-Rahman, A. Premadi, et al. Portable network monitoring system for passive optical network (PON). International Conference on Computer Technology and Development, 2009, 2: 176-180.
- [2] C. Pan, Y. F. Hu and J. H. Shen. Protection strategy for cascaded passive optical networks. 12th IEEE International Conference on Communication Technology, 2010: 588-591.
- [3] K. Yuksel, V. Moeyaert, M. Wuilpart, et al. Optical layer monitoring in Passive Optical Networks (PONs)—A review. 10th International Conference on Transparent Optical Networks, 2008, 1: 92-98.
- [4] A. Ehrhardt, H.-M. Foisel, F. Escher, et al. Monitoring of the transparent fibre Infrastructure for FTTH Networks: An operator's view. 12th International Conference on Transparent Optical Networks, 2010: 1-5.
- [5] F. Caviglia, V. C. Di Biase. Optical maintenance in PONs. 24th European Conference on Optical Communication, 1998, 1: 621-625.
- [6] N. Honda, D. Iida, H. Izumita, et al. In-service line monitoring system in PONs using 1650-nm Brillouin OTDR and fibers with individually assigned BFSs. Lightwave Technology, 2009, 27(20): 4575-4582.
- [7] P. J. Urban, S. Dahlfort. OTM- and OTDR-based cost-efficient fiber fault identification and localization in passive optical network. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC) and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2011: 1-3.
- [8] Ng B. Chuan, A. Premadi, M. S. Ab-Rahman, et al. Physical layer monitoring in 8-branched PON-based *i*-FTTH. International Conference on Photonics, 2010: 1-5.
- [9] J. H. Lee, J.-H. Moon, K.-M. Choi, et al. Seamless maintenance and protection scheme for next-generation access networks. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(12): 799-801.