

《波分复用无源光网络保护与节能机制关键技术研究》

项目总结报告

一、项目概况

1. 项目简介

在当前飞速发展的信息时代，宽带网络在促进经济、社会、科技发展和国防建设中正发挥着越来越重要的作用。国家提出了未来五年内要实施的 100 个大项目，其中第 40 项是要建设高速大容量光通信传输系统。光纤宽带建设可以解决“最后一公里”的瓶颈问题，目前各大电信运营商和广电运营商都在大力推进光纤宽带建设。光接入网领域的时分复用无源光网络（Time Division Multiplexing Passive Optical Network, TDM-PON）及其下一代 10Gbit TDM-PON 技术发展逐渐成熟，在美国、韩国、日本等国广泛铺设，被公认为是解决光纤到户（Fiber To The Home, FTTH）网络体系的最佳宽带接入方案之一。

无源光网络可以提供极大的带宽，长距离覆盖和传输容量的透明升级等优势。但是随着无源光网络系统中的数据传输速率的快速增长，更进一步地降低 PON 网络的能耗变得极为重要，而且也是 PON 得以可持续发展的基础。因为数据传输速率越快，那么用以支撑各种光设备或者电设备的能量需求也将越大。从 OLT 与 ONU 能耗对比中发现，位于用户端的 ONUs 占据了更大的能耗，从而也引起更大的能量浪费，可见 ONUs 端具有极大的降低能耗的空间，且进一步降低 ONU 能耗是实现更为能量有效的无源光网络的关键。另一方面，随着 WDM-PON 中单个用户传输速率不断达到 1Gbit/s, 10Gbit/s, 甚或更高时，任何的馈入光纤（FF）或分布光纤（DF）的故障都会造成巨大的数据丢失。因此，如何提高网络生存性已经成为在 WDM-PON 系统设计中一个广泛讨论的课题，即使在一些不可预期的情况下，如火灾或地震，高可靠地传输数据也成为当今网络的基本要求。因此，人们十分希望采用某种保护切换机制来预防链路故障，提升 WDM-PON 系统的生存性，同时尽可能的降低其能耗，以提高能量利用率。

本报告在现有研究基础上,针对波分复用无源光网络的保护和节能机制的关键技术进行研究,设计并实验验证了单个 PON 体系结构的集中式控制的智能自保护机制和双 PON 体系结构的互保护机制,同时也建立了基于新型 watchful sleep 节能模式的概率论数学模型和 Markov 链的数学模型,定义了 ONU 关于平均功率,数据包延迟和归一化成本 cost 值的性能函数指标,仿真分析了光网络单元的能耗有效性,最后,将上述两种数学建模方法和仿真结果进行了对比分析。

2. 项目来源与批复情况

2015 年东南大学与常州太平通讯科技有限公司共同申报的“波分复用无源光网络保护与节能机制关键技术研究”项目获准立项,项目编号为: BY2015070-16; 执行时间为: 2015 年 7 月 - 2017 年 6 月; 总经费 140 万元,其中省拨款 30 万元,承担单位自筹 110 万元。

3. 项目主要研究内容

- 1) 提出了基于 OCS 技术的 PON 集中式光链路保护系统方案,设计了链路保护切换模块结构及其电域信号处理方案,分析了光纤各条分支光链路的状态信息,设计了逻辑判决算法及其实现模块,实验验证了该方案的可行性和有效性。该光链路保护系统方案,采用全链路传输功率在线监测方式,同时对馈入光纤和分布式光纤进行保护,极大提高了网络系统的可靠性,减少网络运营成本,提升用户服务质量。
- 2) 建立了光链路保护切换实验平台,研究数据传输性能和保护切换时间,分析了光链路功率预算,分析了系统成本优势。设计了一种有效保护切换逻辑判决算法,减少数据业务保护切换时间,并且通过实验研究寻找下行数据的最优消光比,优化光链路保护切换系统的上下行数据传输性能,提高保护机制的可靠性和准确性。
- 3) 设计了无源光网络的节能控制机制及其实现模块,建立了局端和用户端设备的工作状态转移图,设计了节能优化算法;根据业务流随机性,建立数学分析模型,优化节能算法的门限判决参数,提

高了网络系统各个节能模式的节能效率。

- 4) 设计了 ONU 上行重调制发射机结构, 实验研究该结构方案的性能, 研究上行重调制光载波的光谱特性, 提出一种抑制光载波相对强度噪声的方法, 测量上行重调制信号的信噪比性能, 优化下行种子光功率和上行误码率之间的关系, 满足上行重调制发射机结构简单、成本低廉、性能优良等要求。

二、项目考核指标与完成情况

1. 主要技术指标:

- 1) PON 光链路保护系统实验平台的光纤链路长度 20km, 下行数据传输速率 10Gbit/s, 上行数据传输速率 1.25Gbit/s, 项目实际满足指标要求;
- 2) 链路保护切换时间小于 50ms, 实际在 1ms 左右, 超额完成该指标;
- 3) 网络系统节能效率最高可达 40% 以上, 实际最高节能效率可达到 90%, 超额完成该指标;
- 4) 工作链路与备份链路的数据传输功率代价小于 3dB, 项目实际满足指标要求。

2. 其他考核指标:

- 1) 项目研究期间受理的国家发明专利 6 项;
- 2) 项目研究期间发表的 SCI/EI 检索的论文 12 篇, 其中 SCI 收录 4 篇, EI 收录 8 篇。

具体成果列表如下:

(1) 项目研究期间受理的国家发明专利列表:

- [1] 朱敏, 张教, 张旋等. 基于光预编码的轮询式无源光网络光层检测装置及方法[P]. 中国专利, CN201410802093.X;
- [2] 朱敏, 张教, 王东鹏等. 一种基于光载波抑制技术的集中式保护无源光网络系统[P]. 中国专利,

CN201510186336.6;

- [3] 朱敏, 任献忠, 石新根, 张教等. 光线路终端接口装置及其故障保护和节能方法[P]. 中国专利,

CN201510115230.7;

- [4] 张教, 任献忠, 石新根等. 波分复用无源光网络光纤链路分布式保护装置及其保护方法[P]. 中

国专利, CN201510164583.6;

- [5] 朱敏, 张教, 张旋等. 基于光开关和光反射器的可重构二维光编码器及编码方法[P]. 中国专利,

CN201410806010.4;

- [6] 朱敏、李贵鑫、曾小波等. 一种上下行窗口匹配的无源光网络节能带宽分配方法[P]. 中国专利,

CN201710747572.X。

(2) 项目研究期间发表的 SCI/EI 检索的论文列表:

- [1] Min Zhu, Jiao Zhang, Dongpeng Wang, et al. Optimal Fiber Link Fault Decision for Optical 2D

Coding-Monitoring Scheme in Passive Optical Networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2016, 8(3): 137-147 (SCI)

- [2] Min Zhu, Xiaobo Zeng, Yang Lin, and Xiaohan Sun, Modeling and Analysis of Watchful Sleep

Mode with Different Sleep Period Variation Patterns in PON Power Management, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol.9, no. 9, pp.803-812, 2017. (SCI)

- [3] Min Zhu, Jiao Zhang, Xiaohan Sun. Centrally-Controlled Self-Healing Wavelength Division

Multiplexing Passive Optical Network Based on Optical Carrier Suppression Technique [J]. Optical Engineering, 2015, 54(12): 126105-126105 (SCI)

- [4] Xiaobo Zeng, Min Zhu, Lu Wang, Xiaohan Sun, Optimization of Sleep Period in Watchful Sleep

Mode for Power-efficient Passive Optical Networks, Springer Photonic Network Communications, Dec., 2017. (SCI)

- [5] Min Zhu, Jiao Zhang, Dongpeng Wang, et al. A Novel Fiber-fault Polling Monitoring Scheme Based on 2D Pre-coding Technique for PONs with Optimized Decision Probability [C]. 14th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), 2015: 1-3 (EI)
- [6] Min Zhu, Jiao Zhang, Dongpeng Wang, et al. Modelling and Analysis of Optimal Fiber-Fault Decision for Optical 2D-Coding Monitoring Scheme in PONs [C]. 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2015: 1-4 (EI)
- [7] Min Zhu, Jiao Zhang, Dongpeng Wang, et al. Lower Bound on Signal -to-Interference Ratio for a Novel Polling-Based PON Monitoring System [C]. Photonics Conference (IPC), 2015: 408-409 (EI)
- [8] Min Zhu, Jiao Zhang, Xiaohan Sun. Optimal Fiber-Fault Decision in Optical 2D-Coding-Based PON Monitoring Scheme[C]. 10th International Conference on Information Communications and Signal Processing (ICICS), 2015: 1-5 (EI)
- [9] Jiao Zhang, Min Zhu, Yang Lin, et al. A Novel Codeword Assignment Strategy based on MLMW-OOCs for Fiber Fault Monitoring in Large Capacity PON[C]. International Conference on Asia Communications and Photonics (ACP), 2016: AS1D. 2 (EI)
- [10] Min Zhu, Xiaobo Zeng, Yang Lin and Xiaohan Sun. Impact of Sleep Period Variation Pattern on Energy-Delay Performances of Watchful Sleep Mode in PON, Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2016), paper AS1D.4. (EI)
- [11] Min Zhu, Xiaobo Zeng, Yang Lin and Xiaohan Sun, Modeling and Analysis for Watchful Sleep Mode in PON Power Management, 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON 2016), pp. 1-3. (EI)
- [12] Xiaobo Zeng, Min Zhu and Guixin Li, Modelling and analysis of baseband unit pool for green C-RANs, 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Girona, Spain,

2017, pp. 1-4. (EI)

三. 项目关键技术与创新点

1. 设计并实验验证了单个 PON 体系结构的集中式控制的智能自保护机制，分析了其工作原理，并实验研究了在不同下行信号 ER 情况下，波长为 1545.5nm 的上、下行信号的 BER 关系和波长为 1545.5nm 的 10Gbit/s 下行信号和 1.25Gbit/s 上行信号分别在工作和保护路径上的 BER 关系。同时，为了证明提出的体系结构的简单性和机制有效性，比较了传统的系统结构和我们提出的系统结构在所使用的器件数量上和网络可靠性上的不同，突出了该保护机制的优越性。
2. 设计并实验验证了双 PON 体系结构的互保护机制，设计了波长分配方案，分析了其工作原理，并实验研究了该系统在工作和保护模式下，在 C 波段和 L 波段的上、下行信号的 BER 关系和业务修复过程中保护切换时间的关系。还研究了当下行信号 ER 对在 20 公里单模光纤中传输的上、下行信号误码率的影响。最后通过对比分析证明了所提出的体系结构具有较好的网络资源利用率和有效的保护能力。
3. 建立了基于新型 watchful sleep 节能模式的概率论数学模型，定义了 ONU 关于平均能耗，状态转移延迟和归一化成本 cost 值的性能函数指标，仿真分析了 ONU 关于上下行数据业务到达率和 sleep 状态的时间长度对 ONU 的平均能耗，状态转换延迟和归一化 cost 成本值的变化关系，从而确定出了最佳的 sleep 状态时长。
4. 建立了基于新型 watchful sleep 节能模式的 Markov 链的数学模型，基于定义了 ONU 关于平均功率，数据包延迟和归一化成本 cost 值的性能函数指标，仿真分析了 ONU 关于上下行数据业务到达率，各个逻辑状态的状态数和 sleep 状态的拓展时间长度变化模式的类型对 ONU 的平均功率，数据包延迟和归一化成本 cost 成本值的变化关系，确定出最佳的 sleep 状态时长的拓展变化模式和相应的最佳 (listen, sleep) 状态对数。最后，将上述两种研究方法和仿真结果进行了对比分析。

四、项目组织与管理

为了保证项目如期完成，加强项目质量控制与实施能力，项目承担单位东南大学和常州太平通讯科技有限公司协力合作，从项目实施、队伍组织、条件保障等方面加强管理，成立了 16 人研发团队（如表 1 所示），明确工作分工和责任，制订了研究进度计划

表1 项目研发团队

序号	姓名	性别	职称	从事专业	所在单位
1	朱敏	男	副高	光通信技术与光网络	东南大学
2	石新根	男	副高	信息管理与信息系统	常州太平通讯科技有限公司
3	孙小菡	女	正高	光通信	东南大学
4	樊鹤红	女	副高	物理电子学	东南大学
5	陈开卓	男	副高	机电一体化	常州太平通讯科技有限公司
6	张教	男	其他	物理电子学	东南大学
7	张旋	男	其他	物理电子学	东南大学
8	吴景辉	男	副高	计算机信息管理	常州太平通讯科技有限公司
9	柏宁丰	男	副高	物理电子学	东南大学
10	石俊伟	男	副高	电气自动化	常州太平通讯科技有限公司
11	刘志清	男	中级	计算机科学与技术	常州太平通讯科技有限公司
12	沈长圣	男	中级	物理电子学	东南大学
13	曾小波	男	其他	物理电子学	东南大学
14	王东鹏	男	其他	物理电子学	东南大学
15	王启龙	男	中级	机械设计制造	常州太平通讯科技有限公司

16	丁东	女	副高	物理电子学	东南大学
----	----	---	----	-------	------

五、经费来源与使用情况

表2 项目实际到位经费情况

	项目总经费	其中			
		省拨款	单位自筹	部门、地方配套	其他来源
预算总额	140	30	110	0	0
已到位数	140	30	110	0	0

表3 项目经费预算与支出：

单位：万元

科目	总经费		省拨经费		自筹经费	
	预算数	支出数	预算数	支出数	预算数	支出数
（一）直接费用	126	120	25	25	101	95
1、设备费	50	18.46	0	3.32	50	15.14
（1）设备购置费	50	16.47	0	1.33	50	15.14
（2）设备试制费	0	0	0	0	0	0
（3）设备改造与租赁费	0	1.99	0	1.99	0	0
2、材料费	43	39.16	10	0.66	33	38.5
3、测试化验加工费	10	14.67	0	0	10	14.67
4、燃料动力费	0	10.55	0	0	0	10.55
5、差旅费	5	9.83	3	4.93	2	4.9
6、会议费	3	4.57	3	1.27	0	3.3

7、国际合作与交流费	3	1.85	3	1.85	0	0
8、出版/文献/信息传播/知识产权事物费	0	14.29	0	10.77	0	3.52
9、劳务费	4	2.02	4	2.02	0	0
10、专家咨询费	2	0.18	2	0.18	0	0
11、其他支出	6	4.42	0	0	6	4.42
（二）间接费用	14	20	5	5	9	15
其他：绩效支出	3.8	1.25	1.25	1.25	2.55	0
合计	140	140	30	30	110	110

六、结语

本报告在现有研究基础上，针对波分复用无源光网络的保护和节能机制的关键技术进行研究，采用实验与仿真相结合的方法，提出并研究了单个 PON 体系结构的集中式控制的智能自保护机制，实验分析了系统性能和可靠性；设计并实验验证了双 PON 体系结构的互保护机制，设计了波长分配方案，分析了网络资源利用率，实验研究了保护切换时间与网络性能之间的关系；研究了新型 watchful sleep 节能模式的系统性能，建立了基于概率论数学模型，优化了系统参数；同时，也建立了基于新型 watchful sleep 节能模式的 Markov 链的数学模型，提出了四种 sleep 状态的拓展时间长度变化模式类型，研究了不同 sleep 状态时长和（listen，sleep）状态对数对系统性能的影响。最后，对上述两种建模方法及其仿真结果进行了对比分析。各项技术指标符合要求，填补了国内空白，达到了国际先进水平。