

《二维光正交码码字结构与实现关键技术研究》

项目总结报告

目 录

目 录	I
插图清单	III
附表清单	IV
一、项目概况	1
1.1 项目名称	1
1.2 立项时间	1
1.3 项目编号	1
1.4 项目负责人	1
1.5 合作企业	1
1.6 经费情况	1
1.7 主要研究内容	2
二、项目实施情况	4
2.1 实施基本情况	4
2.2 实施计划的制定与落实	4
2.3 企业研发人员的培养培训	5
2.4 项目完成情况评价及预算执行情况	5
三、项目技术总结	6
3.1 项目的研究方法及技术路线	6
3.1.1 总体方案考虑	6
3.1.2 二维光正交码码字结构设计	7
3.1.3 基于二维光正交码的光码字标签处理方法	13
3.1.4 FBG 型二维光正交编码器优化设计与制备	16
3.1.5 FBG 型二维光正交编码器测试	21
3.2 项目解决的关键技术	21
3.3 取得的突破性进展及创新点	21
四、合同任务指标完成情况	23
五、项目绩效分析	24
六、存在问题、有关建议及下一步研究设想	27

参 考 文 献	28
附录 A 授权发明专利	31
附录 B 申请发明专利	31
附录 C 软件著作权	31
附录 D 期刊论文	32
附录 E 会议论文	32
附录 F 第三方测试报告	33
附录 G 新装置	33

插图清单

图 3-1 OFH/PC 光码字{(3,7,4,0), 5}光编码信号示意图.....	8
图 3-2 各端口对应输出.....	10
图 3-3 端口所在路径示意图.....	11
图 3-4 32 用户 PON 系统模拟结果.....	12
图 3-5 分级光码字标签原理示意图.....	13
图 3-6 核心节点光分组信号处理和转发结构示意图.....	14
图 3-7 FBG 级联编码器结构.....	16
图 3-8 光纤光栅写入平台框架.....	17
图 3-9 光纤光栅写入平台实际照片.....	18
图 3-10 四种光栅相位掩模板照片.....	18
图 3-11 系统外观图（正、背面）.....	18
图 3-12 基于 FBG 级联编码器 PON 链路监测技术的实验验证系统框图.....	19
图 3-13 基于 FBG 级联编码器 PON 链路监测技术的实验结果.....	20

附表清单

表 3.1 部分典型参数下的最优生成序列.....	8
表 3.2 集中式与分布式结构光栅数量比较.....	9
表 3.3 不同输出端口级联编码器对应元器件数量.....	17
表 5-1 智能 ODN 管理系统与国内同类产品性能对比分析表.....	25

一、项目概况

1.1 项目名称

多用户二维光正交码码字结构与实现关键技术研究

1.2 立项时间

2014年7月

1.3 项目编号

BY2014127-04

1.4 项目负责人

赵兴群、孙小菡

1.5 合作企业

南京普天通信股份有限公司

1.6 经费情况

(1) 项目经费来源预算

经费单位：万元

	合计	2014年	2015年	2016年	备注
合计	200	80	60	60	
1、省拨款	30	30	0	0	
2、部门、地方配套	0	0	0	0	
3、承担单位自筹	170	50	60	60	南京普天公司 承担
4、其他来源	0	0	0	0	

(2) 项目经费支出预算

经费单位：万元

	预算数	其中:省拨款	备注
(一) 直接费用	185	25	
1、设备费	25	0	
(1) 购置设备费	25	0	购置测量用设备
(2) 自制设备费	0	0	
(3) 设备改造与租赁费	0	0	
2、材料费	40	10.5	光纤光栅元部件、光收发模块、电子元部件等
3、测试化验加工费	10	0.5	光器件加工、测试
4、燃料动力费	10	0.5	洁净间电费、设备运行动力费等
5、差旅费	20	1.5	开展项目必须的试验、考察以及业务调研等交通费。
6、会议费	20	1.5	参加会议、国内同行交流等
7、国际合作与交流费	10	3	邀请国际同行、学术交流等
8、出版/文献/信息传播/知识产权事务费	10	1.5	论文发表、专利申请费、专利维护费等
9、劳务费	20	4.5	参加项目研究生、临时聘用人员的酬金
10、专家咨询费	10	1.5	项目聘请顾问、专家咨询费等
11、其他支出	10	0	
(二) 间接费用	15	5	项目管理, 学校房屋、设备使用费, 水、电、气暖消耗等
其中: 绩效支出	6	1.2	绩效考核
合计	200	30	

1.7 主要研究内容

本项目提出, 针对高速光传输系统、核心光交换网络、光接入网、综合传感网对多用户光编解码技术的应用需求, 在“东大-普天光通信网络技术联合工程研究中心”前期开展的“相位OTDR光链路监控关键技术”工作基础上, 研究多用户二维光正交码码字结构与实现技术。主要研究内容为:

- (1) **二维光正交码码字结构设计**, 研究二维光正交码方案, 提交性能优越的码字结构;
- (2) **基于二维光正交码的光码字标签处理方法**: 研究分级二维光码字标签方案, 以及产生、

传输、接收和处理方法，建立基于该光码字标签的网络性能分析模型；

(3) **FBG型二维光正交编码器优化设计**：研究光纤布拉格光栅（FBG）型光编码器性能，优化设计光编码器；

(4) **FBG型二维光正交编码器制备**：研究FBG光编码器制备方法，探究精确刻写FBG工艺与方法。

二、项目实施情况

2.1 实施基本情况

东南大学早在 2006 年便与南京普天通信股份有限公司在光网络系统领域开展技术交流与合作。2013 年 1 月 21 日双方在多年合作的基础上，成立了“东大-普天光通信网络技术联合工程研究中心”，标志着东南大学和南京普天在光通信网络技术领域产学研合作平台已经建立。联合工程研究中心面向“宽带光网、智慧中国”工程系统构建以及应用层各类服务的需求，围绕光纤到户、光纤到桌面、有线/无线高速宽带接入网络应用系统的建设目标，针对光网络大用户数接入与用户区分、故障快速获取、监控管理等核心技术，开发具有自主知识产权的光网络监控管理系统，为各类用户提供可行的解决方案，力争使南京普天成为国内最大的光通信网络系统产品生产和应用的生产基地。

联合工程研发中心成立后，已启动了东南大学校企合作横向项目“光纤链路监控系统关键技术研究”、“多用户二维光正交码码字结构与实现技术”等项目。本项目研究工作自 2014 年 7 月开始启动。为了项目的开展和高质量实现研发目标，首先组织了完善的校企联合研发团队。东南大学成立了 2 名教授、3 名副教授、3 名讲师、1 名工程师和多名博士生为主的强大研发团队。团队中包含了在光通信领域中的全国知名专家，又包括数名多年从事光通信研究的海外回国人员。整个人才队伍年龄结构完整。南京普天通信股份有限公司也组成了相应的研究团队。团队中既有从事产品研发的工程技术人员，具备技术成果接受和转化能力，又有从事企业管理和市场销售的专业人员，为未来产业化打下基础。

至 2016 年 12 月完成光编码器样品制作与实验室内测试工作。2017 年 7 月第三方测试结果达到了项目原定技术指标。

2.2 实施计划的制定与落实

本研究自 2014 年 7 月开始启动以来，制定了完善的实施计划。按照合同规定的研究目标、内容，以每 6 个月为一个研究周期，检查落实。同时，东南大学与普天通信股份有限公司研发团队每 2-3 周定期召开项目汇报与协调会议，及时解决项目研究过程中的问题。

2016年6月已制备出二维光正交编码器样品。目前该类技术尚无国家标准与测试方案。因此，我们增加了二维光正交编码器测试技术研究内容，在实验室内建立了实验测试系统，2016年12月进行了测试。2017年1-6月，重点研究该编解码器功能与技术指标的确定方法与验证手段。2017年7月委托第三方检测机构检测。至此，本项目完成了合同规定的各项内容与技术指标。

2.3 企业研发人员的培养培训

本研究自2014年7月开始启动以来，开展了大量并且完善的企业研发人员的培养培训。首先，确定培训课题：FBG光栅技术、二维光正交编码器以及基于该编解码技术的无源光网络链路监测系统研发。然后，确定培训课题的详细内容；结合普天通信公司的愿景和二维光正交编码器研发的需求，确定了详细的培训内容。最后，实施培训，使得企业参与培训的研发人员充分了解了二维光正交编码器原理与技术内涵，掌握了FBG光栅刻写技术，已可熟练操作FBG光栅刻写平台的全部装置与设施。获得公司领导和研发人员的认可。

2.4 项目完成情况评价及预算执行情况

本研究自2014年7月开始启动，至2016年12月完成二维正交光编码器样品制作，通过系统联调与测试，第三方测试结果达到了项目原定技术指标。

在研制过程中我们提出了多项创新思想和技术，授权发明专利3项，申请发明专利5项，登记软件著作权1件，发表了13篇高水平论文，自主研制了多用户二维正交光编码器及测试系统装置1套。

项目总经费200万元，其中省拨款30万元，南京普天通信股份有限公司承担170万元。项目执行期间，按照财务预算实施研究，经费使用合理。2017年8月20日止，已使用204.01万元，其中省拨经费使用26.04万元，结余3.96万元。结余部分主要用于专家评审、论文发表与少量水电费等。

三、项目技术总结

3.1 项目的研究方法及技术路线

3.1.1 总体方案考虑

为满足当前或下一代无源光网络（PON）系统监测的总体需求，必须设计一套功能齐全、性能优越的监测系统，其技术要求如下：

- (1) 集中式：可通过远程操作完成对监测信息的收集，无需终端用户协作；
- (2) 自动化：网络管理员无需到现场便可完成对监测信息的收集和相关故障的探测；
- (3) 透明性：对正常在线业务通信无干扰实现网络物理层监测；
- (4) 大用户容量：具备可检测64、128或更大分光比的PON系统能力；
- (5) 故障探测与定位：实现多分支链路某条或几条故障分支链路故障识别与定位；
- (6) 无源性：在中心局与网络用户端间避免使用有源器件；
- (7) 低成本：接入网对成本异常敏感，对用户不能增加任何额外成本；
- (8) 低复杂度：尽量采用技术复杂度低的方案，以便操作简单，便于实用化；
- (9) 可扩展性：能应对网络基础设施的变化，预留适当的扩容和升级改造空间；
- (10) 响应时间短：故障发生到被探测时间要尽可能短，以便提升维护效率。

我国已持续十年实施光纤到户（FTTH）计划，基于光时域反射（OTDR）监测技术的相关产品已经投放市场，但不能同时满足以上 10 项要求。本项目研究的多用户二维光正交编解码技术，可构成非 OTDR 的 PON 链路监测系统。项目研究的基本切入点为，在尽可能满足上述各类技术要求的前提下，从技术性能和监测系统总成本之间寻找平衡点。目前，多用户二维光正交编解码技术仍存在如下问题：（1）成本、实现难度及有效性三者之间难以均衡；（2）缺乏码字结构设计的理论与方法；（3）缺乏分级二维光码字标签设计方法；（4）制备二维光正交编码器的国产化手段与工艺探索不足。

因此，本项目研究工作围绕 多用户二维光正交码码字结构与实现技术，从二维光正交码码字结构设计、基于二维光正交码的光码字标签处理方法、FBG 型二维光正交编码器优化设计与制备 等四个方面展开。

3.1.2 二维光正交码字结构设计

(1) 跳频周期光码字构造方法

跳频周期光码字 (OFH/PC) 可表示为 (q, d, L, P_i) , q 表示 OFH/PC 在频域上可使用频率 (波长) 的数量, L 为频域跳频序列的长度, d 为频域跳频的跳频间隔阈值 ($d \geq 0$), P_i 表示 OFH/PC 在时域上的周期值, w 为 OFH/PC 的码重, 且 $w=L$ 。其中 q 、 w 、 P_i 均为正整数。OFH/PC 在时域进行周期编码, 其周期值选取方法如下:

- 1) 确定光码字的码重 w ;
- 2) 确定 OFH/PC 光码字的第一个周期值, 例如 $P_1=2$;
- 3) 假设第 $i(i \geq 2, i$ 为正整数) 个光码字的周期值 $P_i=P_{i-1}+1 (i \geq 2)$, 如果这个光码字与之前任意的第 $k(k=1, \dots, i-1)$ 个光码字的最大互相关值不大于 1, 则将此周期值定为第 i 个光码字的周期值; 如果最大互相关值大于 1, 则将周期值再加 1 并重新判决码字之间的互相关值, 直到符合条件要求为止;

OFH/PC 在频域进行跳频编码, 其跳频序列的构造方法如下: 用一个 L 维数组 $F_j = (f_1, f_2, \dots, f_L)$ 来表示跳频序列, 其中 $f_i, 1 \leq i \leq L$, 选自于可使用频率的集合 (f_1, f_2, \dots, f_q) 。跳频序列 F_j 中的频率均不相同, 且任何跳频序列中的任意相邻频率之间的距离大于一个固定阈值 $d (d \geq 0)$, 跳频序列 F_j 的长度 L 不超过 q 。当 q 为奇数时, 取 $L=q-2d-1$; 当 q 为偶数时, 取 $L=q-2d-2$, 其中

$$d \leq [(\sqrt{4q+1}-1)/2] \quad (3.1)$$

在此, 以 q 取奇数为例, 介绍跳频序列的生成方法。设 $2m = q-2d-1$, 由 $d+1, d+2, \dots, q-d-1$ 这 $2m$ 个数生成一组排列数 $C_0, C_1, \dots, C_{2m-1}$ 。设 $D_n(j) = C_n + C_{n+1} + \dots + C_{n+j-1}$, 让 $D_n(j)$ 进行模 q 运算, 下标进行模 $2m$ 运算。如果某组排列数满足

$$C_y + C_{y+m} = q, \quad 0 \leq y \leq m-1 \quad (3.2)$$

并且 $D_0(j), D_1(j), \dots, D_{2m-1}(j)$ 对于任意 $j, 2 \leq j \leq m$, 均不相同, 即

$$D_0(j) \neq D_1(j) \neq \dots \neq D_{2m-1}(j), \quad 2 \leq j \leq m \quad (3.3)$$

则称该排列数为生成序列 $C_0, C_1, \dots, C_{2m-1}$, 通过下式可产生 q 个跳频序列:

$$F_j = (D_0(1) + j, D_0(2) + j, D_0(3) + j, \dots, D_0(2k) + j) \quad (3.4)$$

其中 $0 \leq j \leq q-1$, F_j 中的各数组元素进行模 q 加运算。当 q 为偶数时, 令 $2m = q-2d-2$, 生成方法与上相同。

按照上述方法, 通过计算得到一些典型参数下的最优生成序列, 如表 3.1 所示。

表 3.1 部分典型参数下的最优生成序列

q	d	L	生成序列
7	0	6	1,3,2,6,4,5
7	1	4	2,3,5,4
9	2	4	3,4,6,5
11	2	6	3,4,6,8,7,5
13	2	8	3,5,6,4,10,8,7,9
13	3	6	4,5,7,9,8,6
15	2	10	3,9,7,4,5, 12,6,8,11,10
15	3	8	4,6,7,5,11,9,8,10

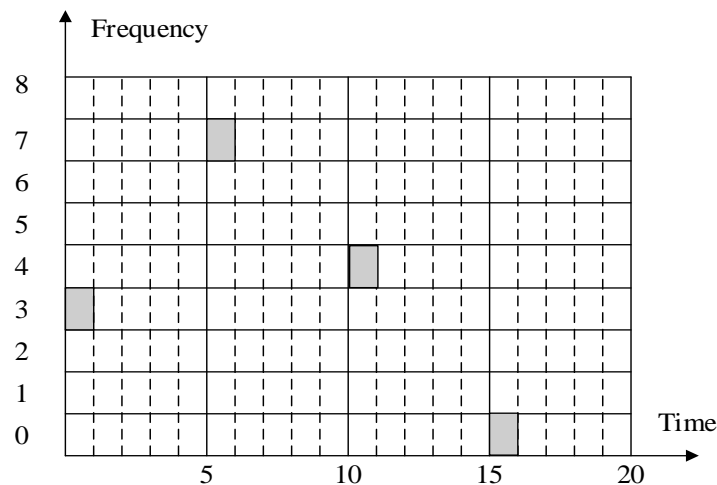


图 3-1 OFH/PC 光码字 $\{(3,7,4,0), 5\}$ 光编码信号示意图

图 3-1 为 OFH/PC 光码字 $\{(3,7,4,0), 5\}$ 的光编码信号时频示意图, 该码字选自于 OFH/PC 码字集 $(9, 2, 4, P_1=5)$ 。该码字的可用频率片数为 9, 即光码字将在这 9 个光频率上进行跳频编码。光码重为 4, 表示光编码后的编码子脉冲数量, 频域跳频间隔大于 $d=2$ 。该光码字的时域周期值为 5, 即编码后的每个子脉冲之间的时域间隔为 5 个单位时间。该码字的跳频序列为 $(3,7,4,0)$, 4 个子脉冲在频域上依次占据频率片 3, 频率片 7, 频率片 4, 频率片 0, 完成频域上的跳频编码。

OFH/PC 光编码器可由 w 个 FBG 通过相等长度的光纤延迟线串联组成，FBG 之间的光纤延迟线具有相同的长度 l_i ，长度可通过下式计算：

$$l_i = \frac{cP_iT_s}{2n_g} \quad (3.5)$$

其中 c 为光在真空中的传播速度， n_g 为光纤纤芯的有效折射率， T_s 为检测光脉冲的时域宽度，每个 FBG 的中心波长由 OFH/PC 光码字中的跳频序列决定。OFH/PC 光解码器与光编码器具有相同的结构，但方向相反。

(2) 分布式结构设计

为了保证各端口输出波长组合的唯一性以及刻写 FBG 数量的最小化，远端(RN)处 WBG 在各分支上的排列遵循以下三个基本设计规则：

(1) 具有 2^P 个输出端口的编码器结构所需监测波长的数量为 $P+1$ 个。

(2) 将具有 2^P 个输出端口的编码器结构分为 n ($1,2,\dots,N$) 级，每一级内包含的一分二子树结构及 WBG 的数量均为 2^{n-1} 。

(3) 从第一级起，各级仅在子树结构的一个分支上刻写一个 FBG，该级内所有 FBG 的中心反射波长均为 λ_n 。

我们定义分布式及集中式结构。分布式结构 (DS) 为每个波导子分支上最多刻写一个光栅；集中式结构 (CS) 为所有光栅均刻写在某一级子分支波导上，如波导末端。根据这个定义，两种结构所需光栅的总数如表 3.2 所示。分布式结构可降低光栅编码器的制备成本及难度。

表 3.2 集中式与分布式结构光栅数量比较

结构	分支数(k)				
	4	8	16	32	64
CS	3	10	25	66	154
DS	3	7	15	31	63

为了保证每一个末端分支输出端口对应监测信号的唯一性，以 64 端口的波导光栅编码器为例，集中式结构需要 7 种不同的波长共计 154 个光栅。相比之下，分布式结构仅需 6 种波长共计 63 个光栅。从某种意义上而言，

(3) 端口波长输出

将光栅编码器各输出端口从上至下依次顺序编号（编号分别为 $1,2,3,\dots,K$ ），为了便于描述，假设所有的光栅均刻写在图中一分二子树结构的上分支。 P 个不同的监测波长

($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$) 在通过 K 端口的波导光栅编码器时, 因此各端口输出的监测信号中均包含波长 λ_p 。此外, 除输出端口 1 中的监测信号仅包含 1 个波长, 其它输出端口所包含波长的个数均不少于 2。而且, 从端口 2 开始, 其端口编号值与监测波长的下标值正好满足特定的数量关系。因此, 各端口输出波长可由下式表示:

$$\begin{cases} \Gamma_K = \lambda_p & K = 1 \\ \Gamma_K = \lambda_p + \sum \lambda_{(p-1-m)} & K \geq 2 \end{cases} \quad (3.6)$$

其中 $K = 1 + \sum 2^m, m \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$, 即 m 为满足所有将 $K-1$ 按权展开的集合。如当 $K = 14$ 时, 则有 $13 = 2^0 + 2^2 + 2^3$, 此时 m 的值为 0, 2 和 3, 该端口对应输出波长为 $\{\lambda_p, \lambda_{p-1}, \lambda_{p-3}, \lambda_{p-4}\}$; 当 $K = 64$ 时, 则有 $63 = 2^0 + 2^1 + 2^2 + 2^3 + 2^4 + 2^5$, 此时 m 的值为 0, 1, 2, 3, 4 和 5, 该端口对应输出波长为 $\{\lambda_p, \lambda_{p-1}, \lambda_{p-2}, \lambda_{p-3}, \lambda_{p-4}, \lambda_{p-5}, \lambda_{p-6}\}$ 。

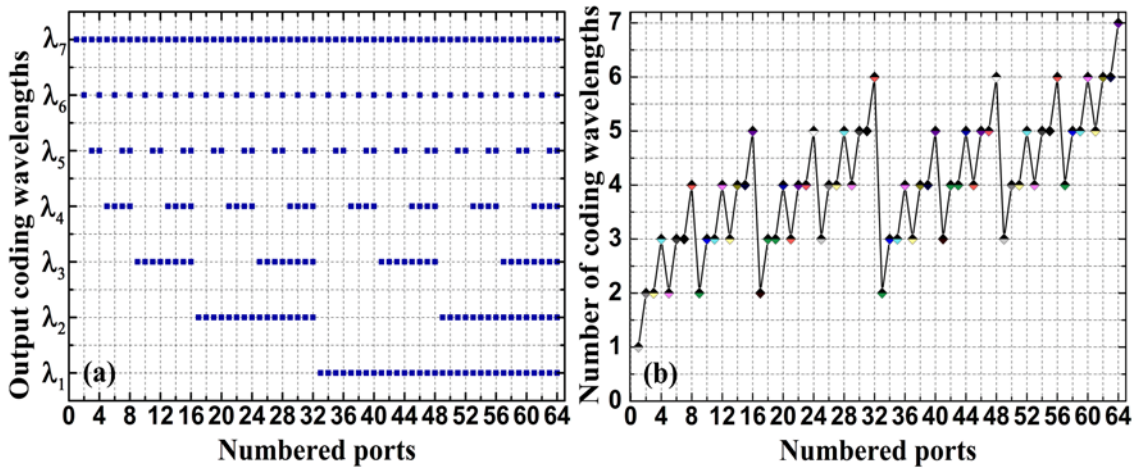


图 3-2 各端口对应输出 : (a)监测波长 ; (b)波长数量

如图 3-2(a)所示为 64 端口波导光栅编码器各端口对应输出编码波长, 此时 $P = 7$ 。换言之, 64 用户的 PON 系统需要含 7 个不同的波长的监测信号。但 6 个不同波长可包括 63 个用户。

(4) 网络监测容量

监测容量较大程度上依赖于出射探测脉冲中所包含的波长数量。假设波长数为 P , 即监测波长分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ 。当波导光栅编码器对应输出端口所在路径上的各级内仅存在一个中心反射波长为 λ_{p-1} 的 WBG 时, 该端口对应输出的监测信号中包含的波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{p-2}, \lambda_p$ 。同理, 当波导光栅编码器对应输出端口所在路径上无任何 WBG 时, 该端口对应输出的波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ 。值得指出的是, 任一输出端口所在路径上所连接 WBG 的数量均不能超过 P (各 WBG 的中心反射波长与监测波长一一对应)。如其所在路径上连接的 WBG 中心反射波长依次为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$, 则所有的监测信号中的波长分量将在 RN 处被反射, 从而造成无监测信号分配至相应的分支链路光纤中。基于此, 该监测技术所支持的最大监测

容量可表示为：

$$C = \sum_{i=0}^{P-1} \binom{P}{i} = \binom{P}{0} + \binom{P}{1} + \dots + \binom{P}{P-1} = 2^P - 1 \quad (3.7)$$

上式表明，对于可支持 2^P 个用户的 PON 系统，需要 $P+1$ 个监测波长才能实现对全网各用户的有效监测，从而保证各终端用户对应监测信号中波长组合唯一。理论上， $P+1$ 个监测波长可监测的网络用户容量为 $2^{P+1} - 1$ 。因此，在所产生的所有监测信号组合中，将有 $2^{P+1} - 2^P - 1$ 种组合不会得到使用。

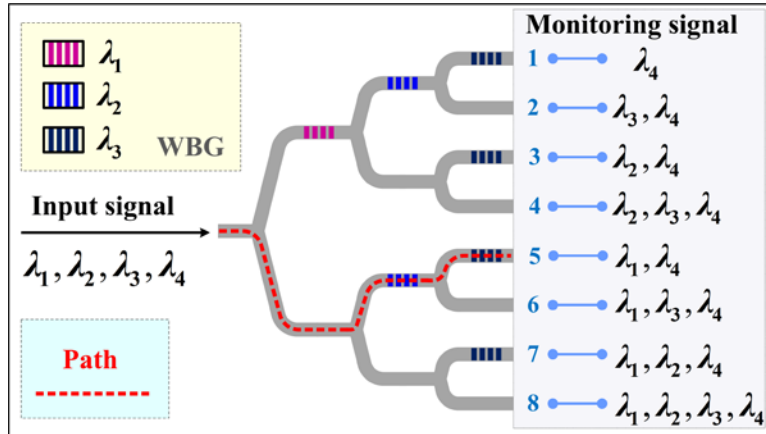


图 3-3 端口所在路径示意图

这里，我们有必要对上述端口所在路径的概念作出相关定义。端口所在路径即为所有经该端口下路至对应分支链路光纤的监测信号中，各波长脉冲从入射端口到出射端口所共同经过的路径，如图 3-3 所示，在 8 端口的波导光栅编码器中，端口 5 的所在路径如红色虚线所示，其为监测信号中脉冲波长为 λ_1 和 λ_4 由输入端口到输出端口所共同经过的路径。

(5) 模拟结果与分析

根据 ITU-T 的建议，我们可以在贴近真实部署条件下计算该监测技术所需的功率预算。例如，对于一主干光纤长度为 20km，用户数量为 64 的 PON 系统，其所需标准的链路损耗预算不少于 30dB，且各分支链路损耗的动态范围要求（单向）约为 15dB。由此可知，监测信号的在光路中往返传输的总损耗将超过 60dB，要求光接收机的灵敏度应在 $\sim nW$ 量级，且动态范围不能小于 30dB。

在实际部署的 PON 系统中，其典型的分光比通常为 1:32 或 1:64，例如 EPON 一般为 1:32，GPON 一般为 1:64。这里，以 32 用户的 PON 系统来模拟并讨论在实际部署条件下本监测技术方案监测信号特征与可能遇到的一些挑战。首先，将编码器端口值 K 置为 32，由式 (3.2) 计算得到各对应分支链路预分配监测信号中的波长组合，各波长组合中最多存在 6 种不同的波长，分别记为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ 及 λ_6 。在模拟计算中，假设 32 用户 PON 系统中存在 10 个等

距离用户，并且在动态范围要求内随机产生相应数值。10 个等距离用户对应的等距离链路分别为 DF_1 , DF_2 , DF_5 , DF_7 , DF_8 , DF_{16} , DF_{20} , DF_{25} , DF_{26} 和 DF_{30} 。值得指出的是，链路 DF_1 被有意放置于等距离链路序列中，由于其监测脉冲信号中仅包含 1 个波长，因此当对应链路发生断裂且该脉冲幅度非常微弱时，其信号变化特征被捕捉到的难度或为最大。

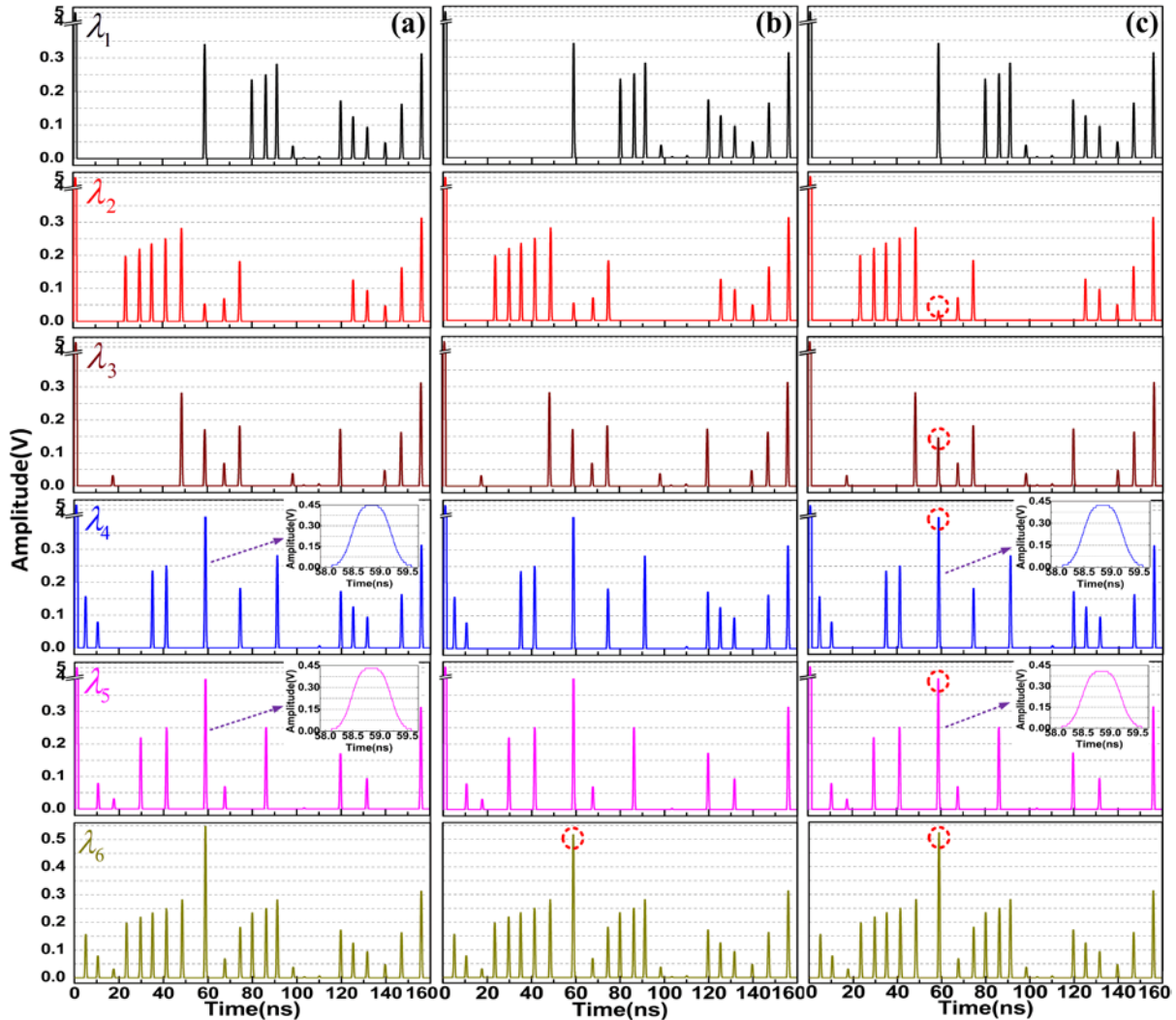


图 3-4 32 用户 PON 系统模拟结果：(a)正常情况下经波分解复用后的各路信号；(b) DF_1 链路发生故障时各路信号；(c) DF_{16} 链路发生故障时各路信号

模拟结果如图 3-4 所示，相应分支链路状态可通过不同波长通道的波形迹线在同一时域位置上的变化进行观测，等距离链路在时域上的位置出现在约 $60ns$ 处。由于动态范围要求的限制，各反射回的监测脉冲信号幅度在接收端可能出现较大差异。例如，由链路 DF_{16} 与 DF_{32} 反射回的具有相同波长的脉冲幅度相差 $11dB$ 。图 3-4(a)表示经波分解复用后，各波长通道对应各分支链路均正常工作状态下的波形迹线。图 3-4(b)则表示当链路 DF_1 发生断裂时，各波长通道所对应的波形迹线，由于下路到 DF_1 链路中的监测信号只包含波长 λ_6 ，因此只有 λ_6 对应的波长通道在时域上约 $60ns$ 处发生幅度变化，如图中红色虚线圆圈标识所示，其幅度减小

约为 0.031V。图 3-4(c)模拟了链路 DF₁₆发生断裂，从图中可知，除波长通道 λ_1 外，波长通道 $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$ 所对应同一时域位置上脉冲幅度同时出现 0.025V 的微小变化，相应波长脉冲幅度的变化用红色虚线圆圈标识。为了更清晰地说明脉冲幅度的微小变化，在图 3-4(a)和(c)中分别提供了局部放大图。

上述模拟结果验证了监测技术方案的可行性。此外，当各等距离链路用户监测信号中含有相同波长时，在经接收模块波分解复用后，具有相同波长的脉冲将在同一波长通道上发生叠加。由于出现在同一波长通道相同时域位置上的脉冲幅度可能差别较大，例如某两个脉冲幅度之差正好等于动态范围要求的最大值。当对应链路发生断裂时，可能出现在一个幅度较大的叠加信号上，信号幅度的大幅或微弱变化等情形，这就对光接收机的灵敏度及动态范围提出了较高的要求，而如何有效地识别该微弱信号的变化，对接收模块中微弱信号处理电路的设计提出了要求。

3.1.3 基于二维光正交码的光码字标签处理方法

基于二维光正交码，可以构建光网络组播传输方案。提出分级光码字（Cellular-based optical code, CBOC）标签方法，通过生成不同的 CBOC 光标签组，能够灵活地创建，更改或撤销光组播方案，具有良好的光组播发送能力。通过 CBOC 光标签直接表示各网络节点的地址信息，光分组信号传输时在各网络节点处不需要进行光标签交换，降低了节点结构的复杂度。分级光码字标签方案还可以提高光码字的利用效率，增加可用 CBOC 光码字标签的总量。

（1）系统方案

图 3-5 所示为分级光码字标签的原理示意图。首先，整个光分组交换网络会被虚拟地划分为相互连接的 N 个子网络，其中 N 表示子网络的数量，并且为各个虚拟的子网络分别分配一个唯一的光码字 α_i 作为网络地址光标签，其中 $i=1,2,\dots,N$ 。其次，系统为各虚拟子网络内的各个网络节点分配一个唯一的光码字 β_j 作为节点地址光标签，其中 $j=1,2,\dots,MN$ ，MN 表示第 N 个虚拟子网络的节点数量。因此，一个网络节点的 CBOC 光标签是由网络地址光标签和节点地址光标签组成。

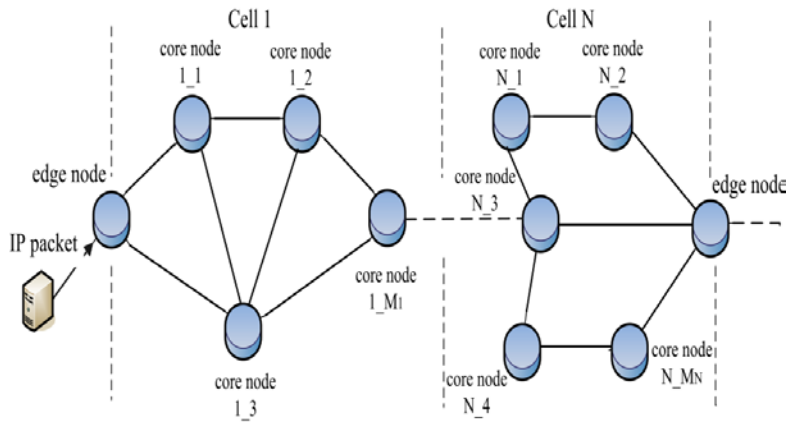


图 3-5 分级光码字标签原理示意图

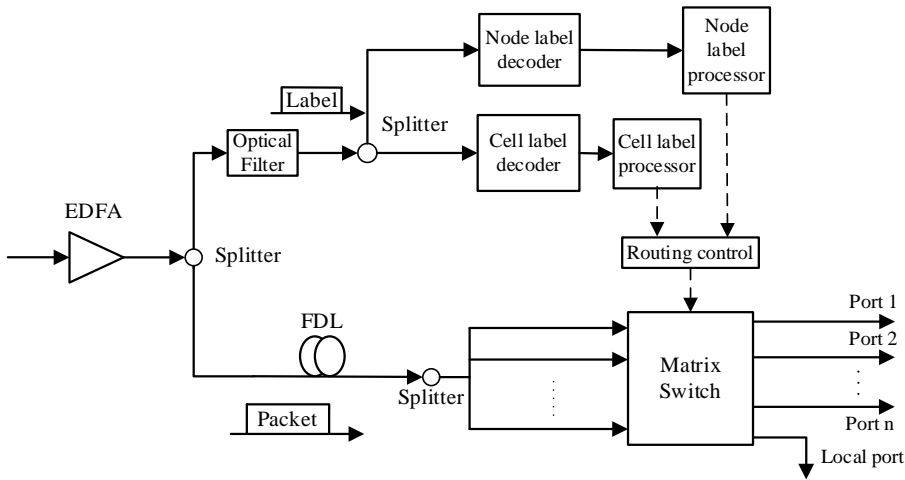


图 3-6 核心节点光分组信号处理和转发结构示意图

图 3-6 为核心节点光分组信号处理和转发结构示意图。在核心节点的输入端，光分组信号首先经过 EDFA 补偿传输链路和节点交换的功率损失，接着经过光分路器分成两路光信号。一路光分组信号进入光纤延迟线等待路由信息处理和光开关矩阵的配置完成，另一路光分组信号经过光滤波器将 CBOC 光标签分离出。CBOC 光标签信号经过光分路器分别进入网络地址光解码器和节点地址光解码器进行解码相关处理，产生的解码光信号分别送入网络标签处理器和节点标签处理器。根据处理结果和节点的路由转发表，路由控制模块生成相应的控制信号控制光交换矩阵的交换状态。当光交换矩阵的配置完成后，经过光纤延迟线缓存的光分组信号会从相应的输出端口输出，在网络中继续传输。由于 CBOC 光标签表示节点地址信息，光分组信号在传输过程中不需要进行光标签交换。

(2) 性能分析模型

建立了基于分级光码字标签的光组播传输性能分析模型。系统采用非相干二维时频光编解码方案，所用光码字为多波长光正交码。多波长光正交码可表示为 $(L_W \times L, w, \lambda_a, \lambda_{cross})$ ，其

中 L 是光码字的码长, L_w 是光编码所用的光波长数量, w 是光码字的码重, λ_a 和 λ_{cross} 分别是光码字的自相关限制和互相关限制。用 N 表示多波长光正交码的码字容量, N 可通过下式计算:

$$N = \frac{L_w \times (L_w L - 1)}{w(w - 1)} \quad (3.8)$$

用 x 表示网络所划分的虚拟子网络的数量, 因此可用于作为节点地址光标签的光码字的数量为 $N-x$ 。如前所述, CBOC 光标签是由网络地址光标签和节点地址光标签组成的, 而节点地址光标签可以在不同的虚拟子网络中重复使用, 用 C 表示系统中可获得的最大 CBOC 光标签数量, 则 C 可由下式计算得到:

$$C = (N-x) \times x \quad (3.9)$$

在光组播传输过程中, 假设网络链路状态及载荷数据传输性能良好, 在每个时隙中, 属于同一虚拟子网络的节点地址光标签相互重叠, 因此节点地址光标签之间的 MAI 是导致 CBOC 光标签传输错误的主要因素, 也是造成光分组丢包的主要因素。在此我们忽略接收机的噪声, 多波长光正交码系统的误码率 (BER) 可由下式计算 [18]:

$$BER(K, L) = \frac{1}{2} \sum_{i=th}^{K-1} \binom{K-1}{i} \cdot \left(\frac{w^2}{2L^2} \right)^i \cdot \left(1 - \frac{w^2}{2L^2} \right)^{K-1-i} \quad (th = w - 1) \quad (3.10)$$

其中 K 是相互重叠的光码字的数量, 即本系统中相互重叠的节点地址光标签数量, th 是判决门限值。假设每个虚拟子网络中的网络节点数量相同, 且节点数量为 M 。设 p 为一个网络节点存在于组播组中的概率, 则对于一个虚拟子网络, 有 k 个网络节点存在于组播组中的概率 $P(k, M)$ 服从二项分布, 可由下式计算得到:

$$P(k, M) = c_M^k p^k (1-p)^{M-k} \quad (3.11)$$

因此, 对于一个虚拟子网络的相应时隙内, CBOC 光标签的平均 BER 可通过下式求得:

$$BER(M, L) = \sum_{k=1}^M P(k, M) \cdot BER(k+1, L) \quad (3.12)$$

CBOC 光标签组中任何一个光标签的识别错误, 均会导致光组播发送的失败, 造成光分组的丢包, 因此, 对于整个光组播传输的丢包率 PLP 可通过下式计算得到:

$$PLP = 1 - (1 - BER(M, L))^S \quad (3.13)$$

其中 S 为组播组中虚拟子网络的数量。

(3) 性能仿真分析

分析了多波长光正交码中光码字数量 N 与码字长度 L 的关系。得知光码字数量随着码字长度的增大而增加，当 $L=30$, $w=3$ 和 $L_w=5$ 时，光码字数量可达 120。通过增加光编码所用的光波长数量，同样可以得到更多的光码字数量，但同时也增加了光编解码器结构的复杂度。

分析了 CBOC 光标签数量与多波长光正交码光码字数量的关系。得知当 $x=0$ 时，网络中不存在网络地址光标签，CBOC 光标签数量与多波长光正交码的光码字数量相同。对于一个固定的 N ，当 $x=N/2$ 时，系统所获得的 CBOC 光标签数量最多，此时如果 $N=60$ ，系统可获得的 CBOC 光标签数量为 900。与 $x=0$ 的情况相比，通过划分虚拟子网络的方法，可在有限的多波长光正交码光码字数量情况下获得更多的 CBOC 光标签数量。

分析了光组播传输的丢包率与虚拟子网络中的网络节点数量 M 的关系。不同 L 取值下，丢包率随着 M 的增加而逐渐增大，由于节点地址光标签叠加数量的增加导致 MAI 更加严重。对于 $M=15$ ，当码长从 31 增加到 127 时，系统丢包率从 1×10^{-5} 量级下降到 1×10^{-10} 量级。可见当 L 的取值变大时，系统的丢包率得到较明显的改善。此外，还分析了不同 p 、 S 取值，光组播传输的丢包率与虚拟子网络中的网络节点数量 M 的关系。

3.1.4 FBG 型二维光正交编码器优化设计与制备

(1) 编码器的设计

采用光分路器与 FBG 的级联，可以构建远端光编码器，实现在 RN 处光分路与编码的同时进行。因此，我们研制了基于多个分光比为 50:50 的 1×2 光分路器与高反射率（通常大于 95%）FBG 构建的 FBG 级联光编码器。

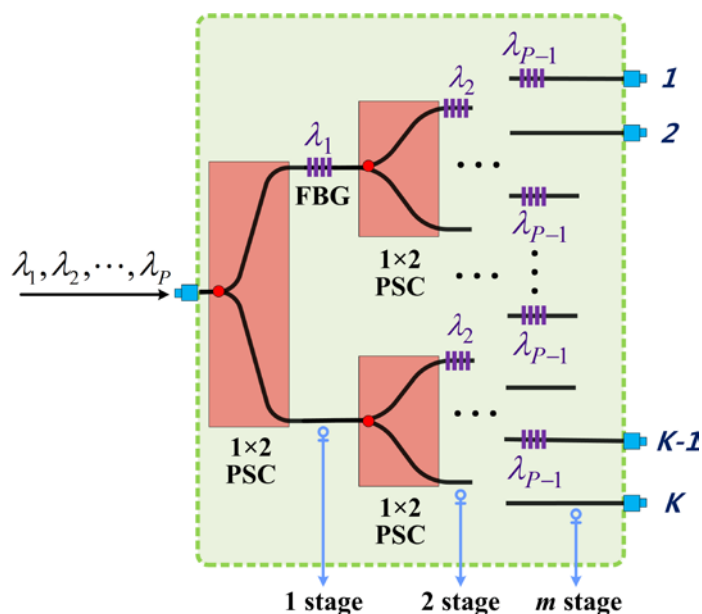


图 3-7 FBG 级联编码器结构

如图 3-7 所示，该级联编码器由多个 1×2 光分路器逐级连接而成，为了便于说明，将整个级联编码器分为 m 级，显然，该编码器各输出端口数 K 与级数 m 满足： $K = 2^m$ 。上一级中光分路器的两个输出端口分别与下一级中两个光分路的输入端口相连，在上一级各个光分路器两个输出端口中仅选择一个输出端口放置 1 个 FBG，且同一级内所连接的所有 FBG 都具有相同的参数指标（如中心反射波长、反射率以及 3 dB 带宽）。以第 2 级为例，该级内包含 2 个 1×2 光分路器，其输入端口分别连接第 1 级中 1×2 光分路器的两个输出端口，其中第 1 级内的 1×2 光分路器的一个输出端口上放置有 1 个中心反射波长为 λ_1 的 FBG。

由上述可知，构造具有不同输出端口的级联编码器，其所需 1×2 光分路器与 FBG 的数量各不相同，如表 3.3 所示。对级联编码器的各输出端口按照 3.1 节中的方式分别进行编号，假设输入监测脉冲信号中包含 P 个波长（ $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ ），则各端口输出波长同样可由前式计算得到。

表 3.3 不同输出端口级联编码器对应元器件数量

名称 \ 数量 \ 端口数	4	8	16	32	64	128
1×2 光分路器	3	7	15	31	63	127
FBG	3	7	15	31	63	127

(2) FBG刻写平台的建立

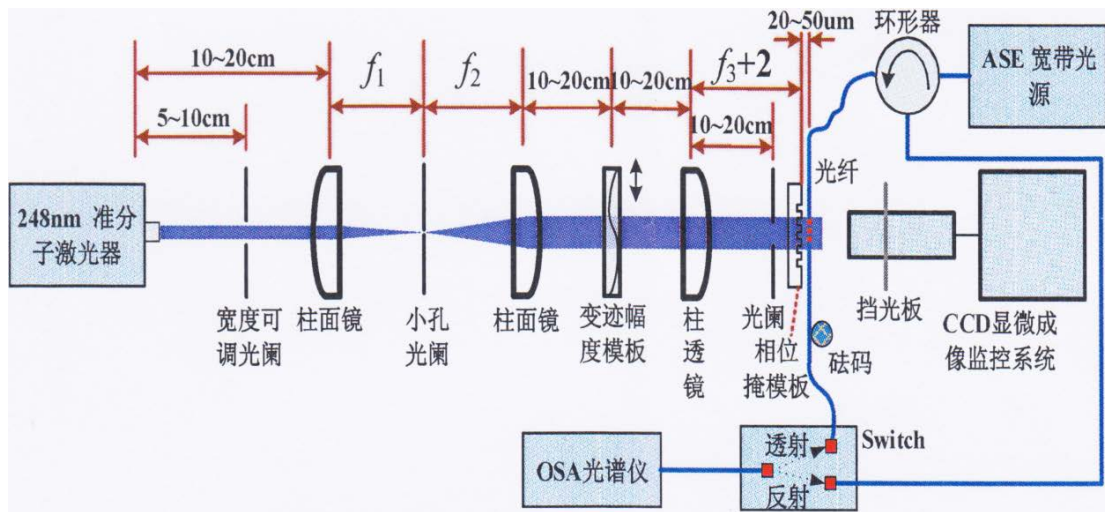


图 3-8 光纤光栅写入平台框架

南京普天与东南大学在东南大学 OSC 中心中国（南京）软件谷基地洁净实验室建立了 FBG 刻写工艺平台。平台框架见图 3-8，实物照片见图 3-9。平台包括准分子激光器、宽度可调光阑、扩散准直透镜、电动变迹砌趾模块、调聚透镜、相位掩模板、手动拉力调节模块、宽带光源和光谱仪。其中，紫外激光器需要纯度 99.995%，瓶压 4.4bar-5.2bar 的氦气；以及标准为：由 0.12%氟气、2.30%氦气、3.03%氩气、94.55%氖气混组成，瓶压 4.4bar-5.2bar 的混合稀有气体，并且激光器有一个连接大气的排风管道。

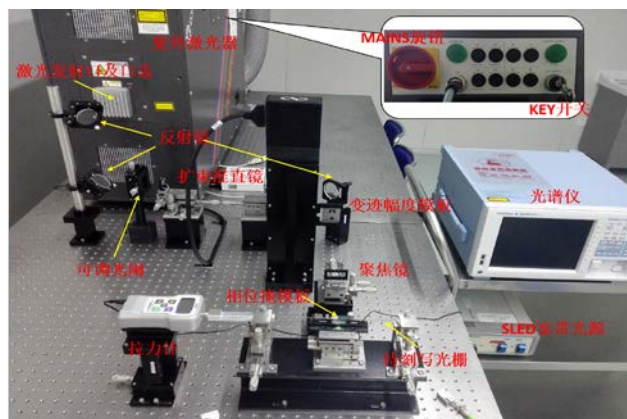


图 3-9 光纤光栅写入平台实际照片



图 3-10 四种光栅相位掩模板照片



图 3-11 系统外观图 (正、背面)

图 3-10 为已研制的啁啾、切址、普通光栅相位掩模板照片。已掌握了具体制备工艺，建立了完整的工艺流程。研制出 64 用户二维光正交码编码器实物见图 3-11。经测试，单只光编解码器制作时间 < 4 分钟；光纤光栅距离误差 $< 2\text{mm}$ ；光纤光栅中心反射波长误差 $< 0.2\text{nm}$ 。

(3) 实验验证

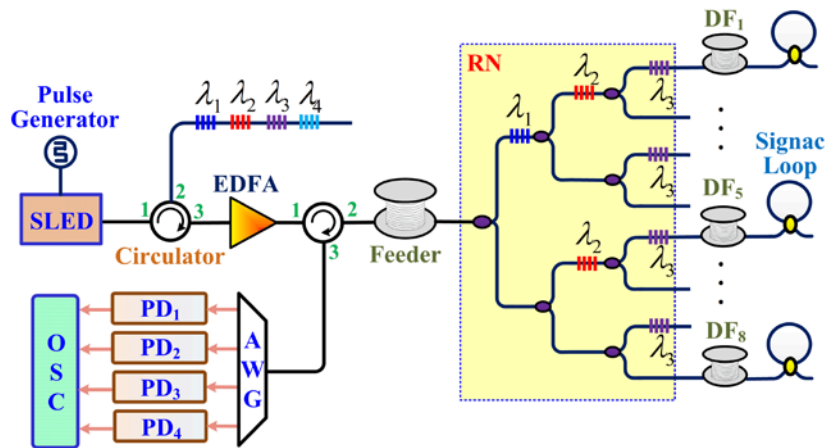


图 3-12 基于 FBG 级联编码器 PON 链路监测技术的实验验证系统框图

为了验证基于 FBG 级联编码器的远端编码监测技术方案的可行性，按照图 3-12 建立相应的实验验证系统。考虑到实验器材的可用性，我们采用 C 波段的脉冲信号进行验证。光源采用 SLED 宽带光源，利用内调制的方式产生脉宽为 $1\mu\text{s}$ ，重复频率为 1kHz 的矩形探测脉冲。探测脉冲中所需的 4 个波长通过宽带频谱分割的方法获取，波长分别为： $\lambda_1 = 1547.72\text{nm}$ ， $\lambda_2 = 1550.92\text{nm}$ ， $\lambda_3 = 1549.32\text{nm}$ ， $\lambda_4 = 1546.12\text{nm}$ 。

值得指出的是，由于探测脉冲的脉宽对应的光纤长度 ($1\mu\text{s}$ 对应的长度为 200m) 远大于各光栅间的连接长度 (各 FBG 尾纤长度不超过 0.5m)，因此可认为 4 种具有不同波长的探测

脉冲为同步输出。同时，为了解决由频谱分割方法导致的探测信号功率不足的问题，实验中采用掺铒光纤放大器（EDFA）来对探测信号进行放大。在 RN 处，由 7 个 1×2 光分路器及 3 种不同中心反射波长的 FBG 组成级联编码装置，其中各 FBG 的反射率大于 95%，3-dB 带宽约为 0.3nm，中心反射波长分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 。各分支链路末端处采用 Signac 环作为同一反射器，该反射环由 2×2 的光耦合器通过连接两个输出端构成。选取 AWG 的四个通道，分别为：CH33、CH35、CH37、CH39，其中四个通道分别与 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 和 λ_4 一一对应。主干光纤长度为 20km，各分支链路光纤的长度分别为： $DF_1=0.84\text{km}$ ， $DF_2=1.3\text{km}$ ， $DF_3=2\text{km}$ ， $DF_4=2\text{km}$ ， $DF_5=1\text{km}$ ， $DF_6=3\text{km}$ ， $DF_7=3.5\text{km}$ ， $DF_8=4\text{km}$ 。实验中，我们有意将 DF_3 与 DF_4 设置为相同长度，以便检验在等距离链路情况下该技术方案的有效性。

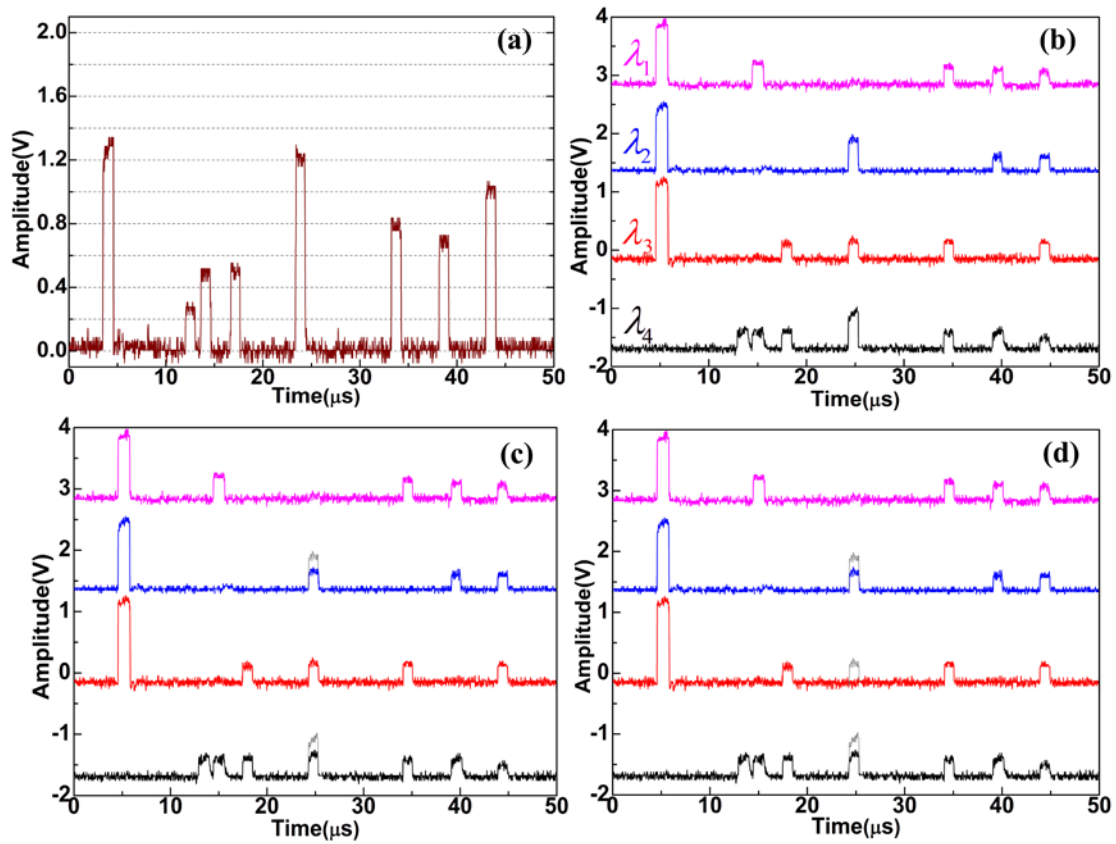


图 3-13 基于 FBG 级联编码器 PON 链路监测技术的实验结果：(a)接收的叠加总信号；(b)正常状态下的各通道接收信号；(c) DF_3 断开时各通道接收信号；(d) DF_4 断开时各通道接收信号

图 3-13 为基于 FBG 级联编码构成的简化 8 用户 PON 链路系统实验验证结果。图 3-13(a) 为所有分支链路均正常情况下的总接收信号。由于 DF_3 和 DF_4 具有相同的链路长度，二者所对应的监测信号中具有相同波长的脉冲在经波分解复用后，将会在同一波长通道的某一时域位置上发生叠加。为了模拟 DF_3 和 DF_4 链路中的故障，对应的两条链路分别被断开，通过对对应脉冲反射峰的缺失或减小可成功对故障链路进行确认。图 3-13(b) 表示在正常状况下，4 个波长通道分别对应的波形迹线。图 3-13(c) 表示 λ_2 和 λ_4 对应波长通道在约 $25\mu\text{s}$ 处的脉冲幅度

同时出现减小，表明链路 DF₃出现故障；同理，当 DF₄发生故障时， $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 对应波长通道同样在约 25 μ s 处出现脉冲幅度同时减小，如图 3-13(d)所示。

3.1.5 FBG 型二维光正交编码器测试

按照通信行业标准，由江苏省质量技术监督通信产品质量检验站完成了对所制备的二维光正交编码器的检定测试。分别测试可实现的检测区域、多用户分支光编码功能、编码器光功率代价、32/64 用户光纤光栅数以及等距用户的区分功能或技术指标，均达到合格。

第三方检测报告，详见附件 F。

3.2 项目解决的关键技术

本项目围绕PON链路监测关键技术之一---多用户二维光正交码编码技术，开展了深入研究。通过分析所提出的二维光正交码码字结构与性能，获得了性能优越的码字结构；提出了基于二维光正交码的分级光码字标签及其光分组组播传输方案，仿真分析了其性能，论证其可用于构建光分组组播无源光网络；建立了光纤光栅刻写制备工艺平台，研制出二维光正交码编码器，搭建了实验验证平台，验证了该编码器二维编码、功率分配、链路监测等功能。

东南大学本研究与南京普天公司技术人员通力合作，集中攻关，解决了以下关键技术：

- (1) 通过设计高性能二维光正交码码字结构，解决了大码字数量获得最短相关距离的问题，从而能够有效抑制多用户干扰，提高光链路监测系统性能；
- (2) 通过设计高性能二维分级光正交码字标签，生成不同的CBOC光标签组，解决了海量用户时光分组组播网络光地址码利用率低的问题，增加光标签总量，可灵活创建、更改或撤销光组播方式。
- (3) 研制并建立了FBG刻写工艺平台，找到FBG快速、批量制备方法，总结得出工艺规范。刻写出波长漂移低、性能优越的FBG与光功分器级联的光编码器，实验验证了其编码功能。

3.3 取得的突破性进展及创新点

本项目取得的突破性进展与主要创新点如下：

- (1) 提出了一种跳频周期二维光正交码码字方案。该光码字在时域采用周期编码，在频域采用跳频编码。给出跳频周期光码字构造方法，对码字容量、相关距离和多用户干扰

进行了分析。结果表明，该跳频周期光码字在获得大码字量同时，可保持小的相关距离，从而能够有效抑制多用户干扰，提高系统监测的性能。

- (2) 提出了一种基于该跳频周期光编码的OTDR光纤链路监测方案，该方法将检测光脉冲的光谱划分为光编码区域和背向散射区域两部分，充分利用检测光脉冲信号的光谱资源。通过光编码区域实现PON光纤链路故障的支路识别，而通过背向散射区域的光检测完成故障的距离定位，同时实现支路判别和故障定位，区分具有相同支路长度的光纤链路故障，通过实验验证了该方案的可行性，可对PON光纤链路进行中央集中式、实时性监测。
- (3) 提出了一种基于二维光正交码的分级光码字标签方案，可提供大量可用二维光码字标签，具有良好的组播发送能力、标签量大等特点。提出了基于该光标签的光分组组播传输方案，通过生成不同的CBOC光标签组，可灵活创建、更改或撤销光组播方式，具有良好的光组播发送能力。建立了CBOC光标签组性能分析模型，仿真结果表明该方案可提高光码字利用率，增加光标签总量，仅需60个多波长光正交码字，最多可得900个可用的CBOC光标签，验证了该光分组光组播传输方案的可行性。
- (4) 提出基于跳频周期二维光正交码的FBG分路级联光编码器结构，提出了一种特定的设计规则，可同时保证各端口输出信号的唯一性和使用光栅数量的最小化，建立了网络监测容量、端口波长输出和信噪比模型，并在64用户PON系统中进行了计算、评估。该光码字编码器结构简单，易于实现，降低了对器件制作的要求。
- (5) 通过自建的FBG刻写平台，研制出FBG型二维光正交码分路级联光编码器，建立了该编码器测试系统，定义了其性能参数，给出测试方案。第三方检测结果表明，该编码器全部功能与指标符合合同要求，功率代价低，支持多用户，可区分等距用户故障。研制了基于FBG级联编码器的PON链路监测实验系统，完成了对远端编码型PON链路监测技术的实验验证，实现了在远端节点处光编码和光分路的同步进行。

四、合同任务指标完成情况

本项目自2014年7月开始启动，至2016年12月完成项目方案提出、理论建模、平台搭建、实验制作、测试等工作。第三方测试结果达到了项目合同约定的技术指标。至此，完成合同规定的所有研究内容、目标、技术与成果要求。

在研制过程中我们提出了多项创新思想和技术，建立了光调频周期编码码字结构以及性能分析模型，解决了3个关键技术难题，建立了FBG刻写工艺平台，研制出32用户FBG型二维光正交编码器。该编码器可实现PON主干15km、连接1x32分支链路、多用户分支唯一编码、等距用户的区分故障等功能；编码器插入损耗 $\leq 16\text{dB}$ ；其后连接1km光纤的编码信号强度 $\geq -55\text{dBm}$ ；32用户光纤光栅数 ≤ 5 ；64用户光纤光栅数 ≤ 6 ；32端口编码器，可支持10个等距用户链路编码。

授权发明专利3项，申请发明专利5项，登记软件著作权1件，发表了13篇高水平论文，自主搭建新装置1套。本研究与东大-普天光通信网络技术联合工程研究中心的研究目标紧密联系，促进了企业技术转型以及高技术产品的更新换代。

五、项目绩效分析

随着光纤到户，三网合一的规模应用，用户对 PON 可靠运行提出了更高的要求。当网络出现故障，对故障抢修的时间容忍度在下降。而且，电信改革后，运营商之间的竞争也越发激烈。除了价格竞争外，服务质量也将是竞争的核心。提供一个畅通无阻、安全运行的网络是运营商对用户的基本保证。因此，保证网络安全运营，快速发现问题、解决问题为光分配网监控系统拓展了广阔的市场发展空间，国内外越来越多的企业开始相关产品的开发与生产。

国外公司主要是日本住友，该公司在 2008 年推出了针对 EPON 的网络监控系统 RFTS，该系统融合最终用户等距离的间隔+高反射终端与 OTDR 技术，能够快速判断故障用户，达到及时排除故障的目的。但是系统成本昂贵，且在检测当中存在识别盲区，不利于大规模推广。

加拿大 EXFO 公司推出了针对 EPON 线路光功率的监测技术，该技术能够判断出故障用户，但无法进行定位。台湾青鼎在 2003 年进入干线网安全监控领域，但还未见到有完全针对光分配网的产品推出。

武汉光讯一直从事网络安全监控的研究，产品较为齐全，既有干线网的安全监控，又有 EPON 线路光功率的监测产品，问题同样在于无法快速定位故障。国内还有一些其他公司如北京雷森、中天宽带、苏州新海宜、广州天乐、上海霍普等相关公司从事相关产品的研究，但都未见相关新产品的推出。

华为 i 光分配网 (ODN) 由三个关键环节组成:电子标签、手持施工工具和 ODN 网络管理系统。电子标签类似于 MAC 地址，具有全球唯一性的识别码，存储了该段光纤的地址信息，通过管理电子标签，就能实现对整个 ODN 网络内各光纤链路的管理。手持施工工具 PDA 提供施工、维护的主要工作界面，可实现工单管理、操作指引、信息查询等功能。网管系统则可以收集并管理所有端口的光纤连接状态，并自动生成拓扑、自动进行光纤连接校验等。

中兴 eODN 聚焦于光纤网络资源管理的流程优化，在不中断在线业务的基础上实现传统光纤网络节点设备的智能化快速改造，能很好与原网络匹配，在光纤管理维护方面颇具优势，同时充分结合了无线互联网技术。“在维护方面，运维人员只需要在任一移动智能手机中安装相关工具软件，就可以通过无线 Wi-Fi 非接触方式进行光纤网络的管理和维护，操作非常便捷。”

上海贝尔 Smart ODN 解决方案是智能化的 ODN 解决方案，其基于 RFID 技术，模块化的设计理念，覆盖包括配线架、交接箱和分纤箱等节点，真正实现 ODN 端到端的智能化管理；综合 Tablet 支持对所有节点的现场管理、可视化维护导航和测试测量功能；ODN 管理系统平

台支持整个 ODN 网络的管理、监测和维护管理功能；ODN 管理平台与局端现有资源管理系统和工单管理系统的完美对接。

但以上智能 ODN 产品都不具备链路故障诊断功能，兼容性较低，与传统的 ODF、OCC、OBD、连接器形态和使用方式都有改变。产品可靠度相较于本项目产品较低。本项目研制出的基于 FBG 二维光正交编码技术可以直接构成 ODN 链路监测系统，满足市场需求。表 5-1 给出本项目构成的 PON 链路监控链路管理系统产品性能与国内外同类产品比较分析。

表 5-1 智能 ODN 管理系统与国内同类产品性能对比分析表

同类产品	项目产品	日本住友	武汉光迅	华为 iODN	中兴 eODN	上海贝尔 SmartODN
技术指标	智能 ODN 管理系统	链路监控系统		ODN 端到端智能化管理系统		
代表技术	二维光编码	OTDR	OTDR	eID	eID	RFID
无源/有源	无源	无源	无源	有源	有源	有源
技术实现难度	低	较低	较低	高	高	高
链路故障监测	软件系统支撑，自动操作、告警	自动	自动	定位端口匹配类故障。可与其他故障定位系统结合使用		
链路故障诊断	可识别故障类型、实现故障点定位	可识别故障类型、实现故障点定位	可识别故障类型、实现故障点定位	—	—	—
功耗	低	低	低	高	高	高
扩容升级	具备兼容网络结构变化及软硬件升级	—	—	兼容性较低，与传统的 ODF、OCC、OBD、连接器形态和使用方式都有改变		
抗干扰能力	强	强	强	一般	一般	差（频段开放，易被干扰）
可靠性	高	高	高	短期内较高		
周期扫描	自动	自动	自动	手动	手动	手动
网络容量	大	有限	有限	大	大	大
维护费用	低	较低	较低	高	高	高

2015-2020 年，是光纤到户，三网合一在世界范围内大规模铺设的时间。毋庸置疑，光分配网铺设成功后，网络故障问题也随之凸显。高速宽带 PON 链路监控链路监控系统在快速故障定位、简化故障判别、缩短维护时间、降低维护成本、减少客户投诉，提升服务质量等方面提供全面支持，能极好的解决光分配网使用过程中出现的问题。

我国从 2004 年开始光纤到户，2008 年开始三网合一，PON 链路监控的总市场规模将达到 15000 亿人民币。通常，一个网络的维护成本占投资成本的 30%左右。所以，PON 链路监控的维护将高达 4500 亿的市场份额。而高速宽带 PON 链路监控链路监控系统作为维护的核心部分，估计将有 1000 亿左右的市场需求。

六、存在问题、有关建议及下一步研究设想

本项目完成了合同规定的各项研究内容，建立了 FBG 刻写工艺平台，研制出符合要求的二维光正交码编码器，通过第三方检定测试。

接下来，我们将从提高 FBG 刻写速度与成品率的角度出发，固化其工艺加工参数，保证级联光纤光栅编码器制备的可靠性、稳定性。进一步探究实现高性价比、简单易制备的光编码器途径；进一步研究 PON 链路监测技术与设备，直接用于“宽带光网”工程中。

我们将紧密开展产学研合作，双方共同攻克多分支、大用户数、长距离、低成本光链路检测技术难关，实施技术成果转化与孵化，依据企业参与制定的光分配网络国家标准，研制光链路管理系统的关键器件、模块与设备。

参 考 文 献

- [1] Kramer G, Pesavento G. Ethernet Passive Optical Network (EPON): Building a Next-Generation Optical Access Network [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(2): 66-73
- [2] Yuksel K, Moeyaert V, et al. Optical layer monitoring in Passive Optical Networking (PONs): A review [C]. International Conference on Transparent Optical Networks, 2008, 92-98
- [3] 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
- [4] Ng B, Syuhaimi M, et al. Development of monitoring system for FTTH-PON using combined ACS and SANTAD [J]. International Journal of Communication Systems, 2010,23:429-446
- [5] Urban P J, Vall-Ilosera G, et al. Fiber Plant Manager: An OTDR- and OTM-Based PON Monitoring System [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2): S9-S15
- [6] Hehmann J, Pfeiffer T. New Monitoring Concepts for Optical Access Networks [J]. Bell Labs Technical Journal, 2008, 13(1):183-198
- [7] Esmail M A, Fathallah H. Current and Next-Generation Passive Optical Networks Monitoring Solution [C]. 8th International Conference on High-capacity Optical Networks and Emerging Technologies, 2011, 334-338.
- [8] Rad M M, Fouli K, et al. Passive Optical Network Monitoring: Challenges and Requirements [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(2): S45-S52
- [9] Abbas H S, Gregory M A. Passive Optical Network Survivability: Protection, Detection and Restoration [J]. Australasian Journal of Information, Communication Technology and Applications , 2015,1(1):128-142
- [10] Rahamn M S A, Chuan N B, et al. The Overview of Fiber Fault Localization Technology in TDM-PON Network [C]. International Conference on Electronic Design, 2008, 1-3
- [11] Kilper D C, Bach R, et al. Optical performance monitoring [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1):294-304
- [12] Pan Z Q, Yu C Y, et al. Optical performance monitoring for the next generation optical communication networks [J]. Optical Fiber Technology, 2010, 16(1):20-45
- [13] Esmial M A, Fathallah H. Physical Layer Monitoring Techniques for TDM-Passive Optical Networks: A Survey [J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2013, 15(2): 943-958
- [14] Temporão G P, Vilela de Faria G et al. Fault Location in Passive Optical Networks Using T-OTDR and

- Wavelength-Selective Isolators [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2013, paper NM2I.4
- [15] Zhou X, Zhang F D, et al. A Modified Optical Coding Monitoring Scheme in PON with Electronic Decoding Processing [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(9): 1849-1851
- [16] Esmail M A, Fathallah H. Novel Coding for PON Fault Identification [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(6): 677-679
- [17] Rad M M, Fathallah H, et al. A Novel Pulse-Positioned Coding Scheme for Fiber Fault Monitoring of a PON [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(9): 1007-1009
- [18] Zhao T, Han H, et al. Precise Fault Location in TDM-PON by Utilizing Chaotic Laser Subject to Optical Feedback [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 6803909
- [19] Naim N F, Baka A A A, et al. Real-time monitoring in passive optical access networks using L-band ASE and varied bandwidth and reflectivity offiber Bragg gratings [J]. Optics & Laser Technology, 2016,79:45-51
- [20] Toge K, Ito F. Recent Research and Development of Optical Fiber Monitoring in Communication Systems [J]. Photonic Sensors, 2013, 3(4): 304-313
- [21] Enomoto Y, Izumita H, et al. Design and performance of novel optical fiber distribution and management system with testing functions in central office [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(12): 1818–1834
- [22] Champavère A. New OTDR Measurement and Monitoring Techniques [C]. Optical Fiber Communication Conference , 2014, paper W3D.1
- [23] Temporão G P, Faria G V, et al. OTDR reach extension for monitoring of high-loss optical links [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2014, 56(4): 974-977
- [24] Thollabandi M, Cheng X F, et al. Encoded Probing Technique for Detection of the Faulty Branch in TDM-PON [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(18): 1610-1613
- [25] Rad M M, Fathallah H, et al. Fiber Fault PON Monitoring Using Optical Coding: Effects of Customer Geographic Distribution [J]. IEEE Transactions on Commnications, 2010, 58(4):1172-1181
- [26] Zhou X, Zhang F D, et al. Centralized PON Monitoring Scheme Based on Optical Coding [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(9): 795-797
- [27] Zhang X, Lu F J, et al. OTDR similarity traces analysed effective method for fault location in point-to-multipoint PON [C], IEEE Photonics Conference, 2015, 421-422
- [28] Yi X G, WANG A B, et al. Fiber faults diagnosis based on correlation detection in passive optical network [C]. 14th International Conference on Optical Communications and Networks, 2015, 1-3
- [29] Abbas H S, Gregory M A. A New Method for Monitoring GPON Based on Optical Coding [C]. 2015

International Telecommunication Networks and Applications Conference, 2015, 292-297

- [30] Caballero D V, Wied J P, et al. Tuneable OTDR measurements for WDM-PON monitoring [C]. Microwave & Optoelectronics Conference, 2013, 1-5
- [31] Xia L, Huang D, et al. Simultaneous and precise fault locating in WDM- PON by the generation of optical wideband chaos [J]. Optics Letters, 2013, 38(19):3762-3764
- [32] Montalvo J, Tapetado A, et al. WDM-PON Preventive Optical Monitoring System with Colourless Reflectors [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2016, paper W2A.57
- [33] Rad M M, Penon J, et al. Probing the Limits of PON Monitoring Using Periodic Coding Technology [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(9): 1375-1382
- [34] Rad M M, Fathallah H, et al. Computationally Efficient Monitoring of PON Fiber Link Quality Using Periodic Coding [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(1): 77-86
- [35] Zhou X, Sun X H. A centralized optical monitoring for high capacity TDM-PON based on optical frequency-hopping/periodic code [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2012, paper JTh2A.29
- [36] ITU-T Recommendation G.983.3. A broadband optical access system with increased service capacity by wavelength allocation [S], 2001
- [37] Chanclou P, Cui A, et al. Network Operator Requirements for the Next Generation of Optical Access Networks [J]. IEEE Network, 2012, 26(2): 8-14
- [38] Chen J J, Urban P J, et al. Fast Fault Monitoring Technique for Reliable WDM PON: Achieving Significant Operational Saving [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2013, paper JTh2A.07
- [39] Urban P J, Dahlfort S. Cost-Efficient Remote PON Monitoring Based on OTDR Measurement and OTM Functionality [C]. 13th International Conference on Transparent Optical Networks, 2011, 1-4
- [40] Scholder F, Gautier J D, et al. Long-distance OTDR using photon counting and large detection gates at telecom wavelength [J]. Optics Communications, 2002, 213(1-3):57-61
- [41] Cen M, Chen J J, et al. Advanced Transmission-Reflection-Analysis (TRA) System for Long-Reach Passive Optical Network Monitoring [C]. 17th International Conference on Transparent Optical Networks, 2015, 1-4
- [42] Chi C C, Lin H M, et al. Cost-effective and monitoring-active technique for TDM-passive optical networks [J]. Optical Fiber Technology, 2014, 20(4):434-441

附 录

附录 A 授权发明专利

- [1] 孙小菡、周诤,基于光码字标签的光分组组播发送、接收方法及其装置, 发明授权号: ZL201110167542.4 ,授权日: 2014.04.16
- [2] 孙小菡、周诤,一种无源光网络光纤链路故障检测方法, 发明授权号: ZL201210509715.0, 授权日: 2015.05.06
- [3] 孙小菡、张旋、朱敏、周诤、郑宇,含地址标记分路器的无源光网络链路监测系统及监控方法, 发明授权号: ZL 201310611586.0,授权日: 2016.03.30

附录 B 申请发明专利

- [1] 孙小菡、张旋、陈斯、陆凤军、朱敏, 基于光时域反射仪的无源光网络链路等距故障识别方法, 已受理, 申请号: CN201510504395.3
- [2] 孙小菡、张旋、陈斯、陆凤军、朱敏, 一种波长脉宽编解码方法及光编码器, 已受理, 申请号: CN201510504536.1
- [3] 孙小菡、张旋、陈斯、陆凤军、朱敏, 一种光纤布拉格光栅级联式分路编码装置及编解码方法, 已受理, 申请号: CN201510505493.9
- [4] 孙小菡、张旋、陈斯、朱敏, 一种基于轮询自匹配的网络监测方法及装置, 已受理, 申请号: CN201710055567.2
- [5] 朱敏、张教、张旋、王东鹏、孙小菡, 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, 已受理, 申请号: CN201410806010.4

附录 C 软件著作权

- [1] 光纤网络智能管理系统网管软件V1.0, 南京普天通信股份有限公司, 证书号: 软著登字第1301896号, 2016.5.30

附录 D 期刊论文

- [1] Xuan Zhang, Fengjun Lu, Si Chen, Xingqun Zhao, Min Zhu, Xiaohan Sun. Remote coding scheme based on waveguide Bragg grating in PLC splitter chip for PON monitoring. *Optics Express*, 2016,24(5):4351-4364(SCI)
- [2] Xuan Zhang, Si Chen, Fengjun Lu, Xingqun Zhao, Min Zhu, and Xiaohan Sun. Remote Coding Scheme Using Cascaded Encoder for PON Monitoring. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016,28(20): 2183-2186(SCI)
- [3] Zhu Min, Zhang Jiao, Wang Dongpeng, 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): 137-147 (SCI)
- [4] Zhu Min, Zhang Jiao, Sun Xiaohan. 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)
- [5] 陈斯、张旋、孙小菡. PON 监控系统中双周期结构编码器的性能分析. *电子器件*, 2016, 39(4): 801-804

附录 E 会议论文

- [1] Xuan Zhang, Fengjun Lu, Min Zhu, Xiaohan Sun. Remote Coding for PON Monitoring System Using Waveguide Bragg Grating Based PLC Splitter Chip. 14th International Conference on Optical Communications and Networks(ICOCN), 2015, 1-3 (EI)
- [2] Zhu Min, Zhang Jiao, Wang Dongpeng, 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 (ICOCN), 2015: 1-3 (EI)
- [3] Xuan Zhang, Fengjun Lu, Min Zhu, Xiaohan Sun. OTDR similarity traces analysed effective method for fault location in point-to-multipoint PON. *IEEE Photonics Conference(IPC)*, 2015, 421-422 (EI)
- [4] Zhu Min, Zhang Jiao, Wang Dongpeng, et al. Lower Bound on Signal-to- Interference Ratio for a Novel Polling-Based PON Monitoring System [C]. *IEEE Photonics Conference (IPC)*, 2015: 408-409 (EI)
- [5] Zhu Min, Zhang Jiao, Wang Dongpeng, 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)
- [6] Zhu Min, Zhang Jiao, Sun Xiaohan. 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)

- [7] Zhang Jiao, Zhu Min, Lin Yang, 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)
- [8] 张旋, 陈斯, 陆凤军, 孙小菡. 一种用于无源光网络监测系统中提升脉冲信号幅度的改进型周期编码器, 全国第 17 次光纤通信暨第 18 届集成光学学术会议, 2015, 1-5

附录 F 第三方测试报告

- [1] 江苏省质量技术监督通信产品质量检验站《FBG 型光正交编码器》检验报告

附录 G 新装置

- [1] FBG 刻写工艺平台一套