

# 一种新的动态指配光网络资源的接口信令协议

姚 劲<sup>1</sup>, 迟彩霞<sup>2</sup>, 郑小平<sup>1</sup>, 李艳和<sup>1</sup>, 张汉一<sup>1</sup>

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 朗讯公司, 贝尔实验室, 北京 100080)

**摘 要:** 本文提出了一种新的用户光网络接口(UNI)信令协议, 以实现动态指配光网络资源的功能. 该协议支持多种类客户寻址, 考虑了光网络的特殊要求. 采用通信有限状态机(CFSM)模型对协议进行了形式化描述和验证, 分析了协议设计的出错处理. 分析和验证结果表明, 协议在网络正常和超时故障条件下均能确保对光通道的建立、修改、拆除和查询等操作无误, 具有无死锁、无活锁、完整性和容错性等重要性质.

**关键词:** 光网络; UNI 接口; 信令协议; 形式化描述和验证

**中图分类号:** TN929 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 10-1442-05

## A Novel Signaling Protocol for Optical Networks User Network Interface

YAO Jin<sup>1</sup>, CHI Caixia<sup>2</sup>, ZHENG Xiaoping<sup>1</sup>, LI Yanhe<sup>1</sup>, ZHANG Hanyi<sup>1</sup>

(1. Dept. of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Lucent Technologies, Bell Laboratories, Beijing 100080, China)

**Abstract:** A novel optical User Network Interface(UNI)signaling protocol for optical network dynamic resource provisioning is proposed for dynamic lightpath provisioning. The protocol supports multi client addressing and meets the special requirements of optical networks. The protocol has been formally specified and validated, employing a Communicating Finite State Machine (CFSM) model. Exceptional handling of the protocol is analyzed. Validations confirm that the protocol performs lightpath actions correctly under both normal and any time out conditions, with its no deadlock, no livelock, and other good properties.

**Key words:** optical networks; UNI; signaling protocol; formal validation and verification

## 1 引言

智能化是光网络发展的一个主攻方向. 智能光网络的一个重要特征是光网络能够动态地指配网络资源. 光网络资源的动态指配使得光网络不但能够适应因特网爆炸式增长的业务对网络带宽的需求, 而且为运营商推出新的增值服务, 如光虚拟专用网(OVPN), 波长租用, 按需分配带宽等, 提供了技术保障.

光网络资源的动态指配功能主要通过接口信令协议与网络状态更新、路由和波长分配等机制相结合, 在智能光网络控制平面中完成. 为满足光网络多种类用户环境的需要, 光互连论坛(OIF)和光域服务互连联盟(ODSI)均以层叠模型为基础, 致力于电层-光层边界, 称为用户网络接口(UNI)的研究. ODSI 定义了一个光网络客户可以请求建立或拆除光通道的框架<sup>[1]</sup>, 而 OIF 扩展了标签分发协议(LDP)和资源预留协议(RSVP)作为可能的信令协议基础, 并付诸公开讨论<sup>[2]</sup>.

考虑到用于 IP/MPLS 的信令协议 LDP 和 RSVP 正被扩展以纳入因特网工程任务组(IETF)普遍多协议标签交换(GMPLS)体系内<sup>[3]</sup>, 而光网络与 IP 网络有着本质的不同, IP 网络

的信令协议特性并不都支持光通道的指配, 因此本文在上述协议的基础上通过引入新的要素, 提出了一种新的 UNI 信令协议用以实现光网络资源的动态指配, 该协议满足了光网络的特殊性, 如对多种类客户寻址的支持和对双向通道的支持等. 该协议设计时考虑了信令协议的使用过程中的实际情况, 详细设计了出错处理. 而后利用通信有限状态机(CFSM)模型对其进行了形式化描述和验证. 就我们所知, 这是首次对光网络 UNI 信令过程在正常和超时故障的条件下进行形式化描述和验证.

## 2 光 UNI 信令过程的描述

把光通道的起始客户称为 SC, 终点客户称为 DC, 光网络中与它们相邻的节点分别称为 SN 和 DN. 为支持动态指配光网络资源, UNI 信令过程如下所述:

(1) 信令系统自举: UNI 客户与 UNI 网络节点交互之前, 各个节点的信令系统分别自举, 以获得该层地址、信令通道 ID 等相应信息;

(2) 邻居发现和服务发现: 信令通道启动后, UNI 信令为相连的客户和网络节点建立接口联系. 验证端口连接状况后,

收稿日期: 20020408; 修回日期: 20020912

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60132020); 国家 863 高科技项目(2001AA122051); 清华大学 Bell 实验室基础科学院(中国)光通信网络系统联合实验室项目

地址、端口和其他信息都被记录入各自系统数据库,使光网络节点明确其连接客户的性质;客户了解光网络提供的服务可能。

本方案中仔细考虑了寻址问题,以满足对当前多用户支持的要求。在邻居发现过程中,从客户发往光网络节点的消息应包括以下内容:3 客户地址类型,客户地址,端口 ID4,经光网络节点的匹配处理,该信令系统不仅可兼容路由器的 IPv4、IPv6 地址,还可为非 IP 的客户如 ATM 交换机或一些传统电信网络设备建立光通道;

(3) 信令控制通道维护:信令通道启动后,基于链路管理协议(LMP)检验、维护控制通道;

(4) 信令操作:为了动态指配光网络资源,客户向光网络发出请求,这类请求应受预定政策的限制,如用户所在组同一性,还有安全验证的要求。本协议支持的操作请求定义如下:

“建立(SET UP):为两个客户设备,即 SC 和 DC 建立一条光通道;

“拆除(TEAR DOWN):拆除一条给定 ID 的光通道;

“修改(MODIFICATION):修改已建立的光通道的参数。修改信令可分为两类,一种是破坏性修改,另一种为非破坏性修改,二者的区别是在对原有光路的数据传输是否产生影响。对于破坏性修改可等同于光路删除后又创建出一个具有新特性的光路,而非破坏性修改则必须不影响原有业务的传输;

“查询(INQUIRY):给出特定光通道的 ID,可查询其状态和参数。适用于管理者的需要,或当设备故障时,其原有光路的特性参数可能丢失,可以用查询信令获取这些参数。

在 ODSI 的方案中<sup>[4]</sup>,光网络首先判定能否在两个特定的客户间建立一个光连接,并把判定结果通知相应的两个客户;得到建立的许可后,光网络建立光通道并把结果通知请求连接的发起者。可见这种方式偏重于集中式信令。本文方案中,客户层是一个分布式系统,光网络内部交换的信息可相对灵活地与 UNI 分离:光网络内部光通道建立、修改和拆除的过程既可由分布式系统进行信令交互,也可由集中式管理系统向相应节点发送命令消息来完成。鉴于分布式系统的可扩展性和发展前景,我们设定一个分布式的光网络内部系统来描述光通道建立、修改和拆除的过程。显然,该方案也适用于集中式的光网络内部系统。

对光通道进行操作的请求可以基于光网络上层业务量的变化。当需要增加新的带宽时,客户发起光通道建立请求。请求消息需要给出源宿客户的地址和种类,端口 ID,及对光通道的特性要求。文献[4]、[5]等建议了一些特性,本文方案中,简化了原 MPLS 信令下标识标签交换路径(LSP)的对光通道不适用的参数,在带宽、合同号、优先级、帧格式外加入了光网络特有的一些新参数如双向/单向标识、保护等级、光通道组绑定/分隔标识等。当光网络节点收到请求后,通过路由波长分配算法(RWA)选出路由和可用的波长资源。若节点本身不能满足请求,则直接向上游返回拒绝响应。若本节点能满足,则将此相应网络资源状态设置为预留(RESERVED),并将操作请求沿所选路由传递。被标记为预留的相应资源,不可以被其他请求所使用;但是这时光节点的开关等硬件并不进行相

应的配置操作。当操作请求到达终端客户,进行处理后,客户返回操作响应给相邻的光网络节点(DN),同意或拒绝对光通道的操作。操作响应沿反向路由传递到光网络边缘的起始节点(SN),然后到达起始客户(SC)。在这个过程中,每个沿反向路由的光节点若收到同意,则将相应资源从预留设置为 UP,并对节点相应的硬件进行配置;若收到拒绝,则将相应资源设置为 DOWN,表示本次请求失败,资源释放用于其他请求。在任一次操作过程结束前,各节点触发控制面的更新机制交换信息以同步网络资源的最新状态。

如果沿路由的任意节点不能提供所需资源,或节点间通信超时,将沿反向路由返回拒绝响应和出错代码。相应的标记为预留的网络资源被设回 DOWN。此处,超时定义为消息重发达到预定次数仍无响应(即包括一般所述的超时重传),信令通道故障监测机制的主动上报可同样处理。当拒绝响应返回起始客户和发起者(若不同于起始客户)后,其停止操作,报告失败或是根据预设策略重新发起请求。对光通道的其他操作如修改和拆除的机制同理。通过出错处理的仔细设计,防止了系统出现虚假的资源占用或是错误配置。

### 3 协议描述和验证

#### 3.1 协议的描述

根据通信有限状态机(CFSM)理论,UNI 信令协议由若干 CFSM 组成:每个节点的进程 P 用一个 CFSM 来描述;节点进程间用一对先进先出队列相连接。对文献[6]进行扩展,UNI 信令协议用如下五元组表述:

$$33 S_i 4_{i=1}^N, 3 0_{i=1}^N, 3 M_j 4_{i,j=1}^N, 3 I_i 4_{i=1}^N, \#$$

其中 N 为正整数,表示进程的个数; $3 S_i 4_{i=1}^N$  为 N 个分立的有限状态集, $S_i$  代表进程 i 的状态集; $0_i$  是  $S_i$  的一个元素,代表进程 i 的初态; $3 M_j 4_{i,j=1}^N$  为  $N^2$  个分立的有限状态集,对于任意 i,  $M_i$  为空集,而  $M_j$  代表可从进程 i 发送到进程 j 的消息集。其传递对应着 CFSM 的外部事件; $I_i$  对应进程 i 的内部事件集;# 是状态转移函数映射,对任意  $S_i, \#$ , 有:  $S_i @ E \cup S_i$ , 其中,  $E = \{m\} G \{N\}$ ,  $m I \{3 M_j 4_{i,j=1}^N\} G \{3 M_j 4_{i,j=1}^N\}$  而  $N I I_i$ 。即 E 是一个集合,它包含了 CFSM 的全部收到/发出一条消息的外部事件和内部事件。若事件  $R I E$ , 状态  $s I S_i$ , 则转移函数  $\#(s, R)$  表示状态机在发生事件 R 后由状态 s 转移到下一个状态。

用! 表示发送消息的功能,? 表示接受消息的功能,则对于某个 CFSM 系统,进程 i 发送一条消息给进程 j 表示为! $m_j$ ,而进程 i 收到进程 j 一条消息表示为? $m_j$ 。内部事件 N 触发的状态转移表示为  $N_i$ 。它可以是超时触发或是其他满足的条件。

设  $S_1, S_2, S_3$  和  $S_4$  分别表示 SC, SN, DN 和 DC 的状态集,则 UNI 信令过程可由图 1 来表示。其中,  $M_{12}, \dots, M_{43}$  为其间相应可传递的消息集, SN 和 DN 之间消息传递既可分布式亦可集中式,因此队列用虚线表示。信令协议的客户实体在功能上可以既是源端也是终端,而光网络节点也是对等的实体,因此  $P_1$  和  $P_4$  及  $P_2$  和  $P_3$  的状态转移分析相同。

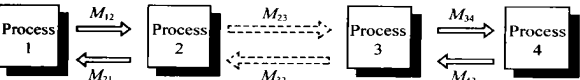


图 1 UNI 信令过程CFMS系统模型

在系统自举,邻居/服务发现和信令通道验证后,系统进入对光通道操作进程的 idle 态.此操作进程与上文所述信令通道的维护和出错处理进程可通过发送消息交互.这里以 SET UP 为代表进行操作进程的形式化描述,其他操作参数可能不同但机制同理.如前所述,为确保网络资源的授权使用和客户的计费,文中的消息要进行鉴别验证处理.安全机制可采用如文献[7]中所述,不合法的消息被直接丢弃.客户进程 P<sub>1</sub>和 P<sub>4</sub>的描述如图 2 所示.消息和内部事件描述如表 1 中所列.状态 0~ 状态 11 的详细描述如表 2 所示.

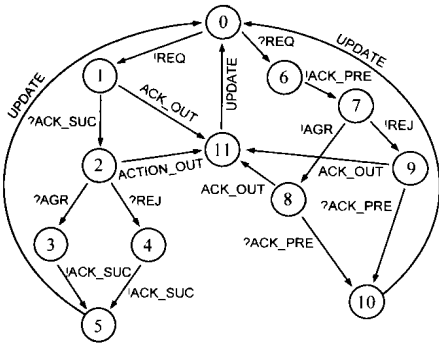


图 2 客户操作进程的状态转移图

表 1 消息列表

消息和内部事件	描述
REQ	操作请求,包括 SETUP/TEARDOWN/MODIFY/INQUIRY,从源端客户产生经过光网络传递处理至终端客户.
ACK_ PRE	本节点与信令传递路径上游节点消息传递的确认.
ACK_ SUC	本节点与信令传递路径下游节点消息传递的确认.
AGR	操作同意的响应,表示请求被终端客户或光网络节点同意.
REJ	操作拒绝的响应,表示请求被终端客户或光网络节点拒绝.
ACTION_ OUT	若重发经过预设时间达到预定次数仍无操作响应,操作请求被内部计时器 Action Timer 触发超时.
ACK_ OUT	若消息发往相邻节点经过预设时间达到预定次数仍无 ACK_ PRE/ACK_ SUC 响应,被内部计时器 ACK Timer 触发 ACK 超时.
UPDATE	内部事件.在一次操作结束前,客户和光网络节点触发控制面机制交换信息以同步网络资源的更新,完成后记录网络资源最新状态,若本次对光通道操作失败,显式指明资源重置为原状态.

表 2 图 2 中状态的描述

状态	描述
0	空闲(本次结束,等待下一次操作).
1	操作请求发送往光网络,等待请求的 ACK 响应 ACK_ SUC.
2	收到 ACK_ SUC 打开 Action Timer,等待操作响应.
3	从 SN 收到操作响应 AGR,光通道 ID 和相应资源设为所要求(如 SET UP 请求下资源设为 UP).
4	从 SN 收到操作响应 REJ,光通道 ID 和相应资源设为所要求(如 SET UP 请求下资源设为 DOWN).
5	ACK_ SUC 发送给 SN,客户和光网络节点触发控制面机制交换节点信息以同步网络资源的更新状态.
6	收到 DN 的操作请求.
7	发送 ACK_ PRE 给 DN,处理操作请求.
8	发送 AGR 给 DN,等待 ACK 响应 ACK_ PRE.
9	发送 REJ 给 DN,等待 ACK 响应 ACK_ PRE.
10	从 DN 收到 ACK_ PRE,等待进行网络资源的同步更新.
11	ACK Timer 或 Action Timer 触发超时,恢复预留网络资源为操作之前的状态,等待进行网络资源的同步更新.

光网络节点进程 P<sub>2</sub>和 P<sub>3</sub>的描述如图 3 所示.消息和内部事件描述如表 2 中所列.状态 0~ 状态 12 的详细描述如表 3 所示.

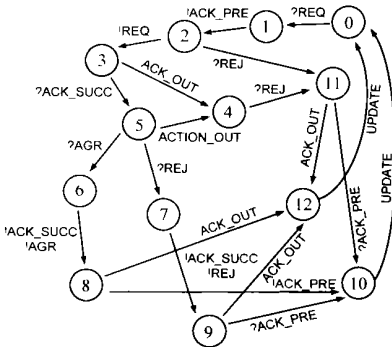


图 3 光网络节点操作进程的状态转移图

表 3 图 3 中状态的描述

状态	描述
0	空闲(本次结束,等待下一次操作)
1	收到上游节点的操作请求.
2	ACK_ PRE 发送往上游节点,节点内部处理请求.
3	根据节点内部处理,操作 REQ 发送往计算出路由的下游节点,等待其 ACK 响应 ACK_ SUC,相应资源标记状态为预留.
4	对下游节点的计时器 ACK Timer 超时,相应资源标记状态为 DOWN.
5	收到下游节点 ACK 响应 ACK_ SUC,启动 Action Timer,等待操作响应.



- ly 2000.
- [ 5 ] G Bernstein, et al. IP-centric control and management of optical transport networks[ J]. IEEE Commun. Mag. , 2000, 38(10): 161- 167.
- [ 6 ] D Brand, et al. On communicating finite state machines[ J]. Journal on Assoc. Comp. Mach. , 1983, 30(2): 323- 342.
- [ 7 ] D Durham, et al. The COPS (Common Open Policy Service) Protocol [ S]. IETF RFC2748, Jan. 2000.
- [ 8 ] R Ramaswami, et al. Distributed network control for optical networks [ J]. IEEE/ ACM Trans. Net. , 1997, 5(6): 936- 943.

#### 作者简介:



姚 劲 男, 1978 年 4 月生于湖北省大冶县, 2000 年 7 月于清华大学电子工程系获学士学位, 现继续攻读硕士, 主要从事光网络规划设计、光网络接口信令和管理研究。

迟彩霞 女, 1973 年生于山东省蓬莱县, 2000 年博士毕业于中国科学院应用数学研究所运筹学与控制论专业, 同年四月加入朗讯公司贝尔实验室中国基础科学研究院, 主要从事网络协议的设计、实现、验证、测试等方面的工作, 参与设计实现了光网络管理协议, 用户光网络接口协议, 链路管理协议等多种光网络通讯协议, 目前的主要研究方向为网络性能分析、协议可靠性验证、软件特征冲突检测等。