

基于 GMPLS 的光突发交换网络的仿真研究

任海兰^{1,2} 罗志会² 刘德明¹

(华中科技大学光电子科学与工程学院 武汉 430074)¹

(武汉邮电科学研究院烽火科技学院 武汉 430074)²

摘 要 光突发交换技术(OBS, Optical Burst Switching)是电路交换到分组交换的过渡技术, G-LOBS 网络是通用多协议标记交换(GMPLS, Generalized Multi-Protocol Label Switching)技术和 OBS 技术结合的产物, 后者是将现有光网络技术向光因特网过渡的有效途径。提出了基于 OPNET 软件的 G-LOBS 通用仿真平台的设计, 设计出了基于流量工程的资源预留(RSVP-TE, Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering)信令模块, 并用 OPNET 软件对 RSVP-TE 协议进行了仿真分析。

关键词 光突发交换(OBS), 通用多协议标记交换(GMPLS), 基于 GMPLS 的光突发交换网络(G-LOBS), 基于流量工程的资源预留(RSVP-TE)

中图分类号 TN915.04 **文献标识码** A

Simulation of GMPLS-based OBS Network

REN Hai-lan^{1,2} LUO Zhi-hui² LIU De-ming¹

(College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)¹

(Fiberhome Technologies College, Wuhan Research Institute of Post & Telecommunication, Wuhan 430074, China)²

Abstract OBS(Optical Burst Switching) is a transitional solution from electrical switch to packet switch, G-LOBS (GMPLS-based Optical Burst Switching Network) is a combination of MPLS(Multi-Protocol Label Switching) technology and OBS technology, which is an effective solution for the evolvement of present optical network to optical internet. The idea of building a uniform G-LOBS network simulator was put forward. The signaling module of RSVP-TE (Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering) was designed, and the simulation analysis of RSVP-TE by OPNET was done.

Keywords Optical burst switching(OBS), Generalized multi-protocol label switching(GMPLS), GMPLS-based optical burst switching network(G-LOBS), Resource reservation protocol-traffic engineering(RSVP-TE)

1 引言

随着网络业务量的爆炸性增长以及高性能光网络设备(如光交叉连接器 OXC、光分插复用器 OADM 等)的出现, 波分复用技术(WDM)成为下一代骨干网络的核心技术, 网络业务也对网络带宽和交换粒度有了更高的要求。然而, 当前基于波长路由的光网络只能提供波长级交换粒度的服务, 带宽利用率很低, 而以分组作为交换粒度的光分组交换技术又因为光器件的不成熟而发展缓慢。在这一背景下, 一种结合了波长交换和光分组交换的优点、在光路上实现突发数据包交换的光突发交换(OBS)技术应运而生。由于通用多协议标签交换(GMPLS)统一了开放式系统互联(OSI, Open System Interconnect)模型中的物理层、链路层、网络层的控制信令协议, 简化了网络结构, 因此它代表着未来网络技术的发展方向。将 GMPLS 技术和 OBS 技术结合^[1], 设计出基于 GM-

PLS 的 OBS 网络(G-LOBS), 它具有其它光网络技术无可比拟的优势, 并继承了 OBS 包交换的技术特点, 同时吸收了 GMPLS 的思想, 在 IP 层与光层都加上能统一管理的标签, 使网络结构简化, 突发包转发速度更快, 并具有支持流量工程、QoS 等优点, 理所当然成为实现 IP over WDM 的首选技术。

由于网络结构和规模的复杂化以及网络应用的多样化, 单纯依靠经验进行网络规划和设计、网络设备的研发以及网络协议的开发, 已经不能适应网络的发展, 亟需一种科学的手段来反映和预测网络的性能, 因此网络仿真技术应运而生。1987 年, OPNET 公司发布了其第一个商业化的网络性能仿真软件, 提供了具有重要意义的网络性能优化工具, 使得网络性能管理和仿真具有预测性^[2,3]。尤其对于 G-LOBS, 设计搭建任何实验网络都意味着高昂的费用^[4], 因此网络仿真是现阶段研究和分析这一技术的重要手段。但是由于 G-LOBS 网络研究尚处于起步阶段, 到目前还没有一个通用的 G-LOBS

到稿日期: 2010-03-25 返修日期: 2010-07-18 本文受国家 863 计划项目(“波时分混合复用及无源光网络与电网络复合接入技术”, 2007 AA01Z229), 华中科技大学博士后基金项目资助。

任海兰(1970-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为光纤通信和光电子技术, E-mail: renhl@wri.com.cn; 罗志会(1975-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为光纤通信和光电子技术; 刘德明(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光纤通信和光电子技术。

网络仿真平台,导致各研究者在研究 G-LOBS 网络某一问题时常常需要各自构建仿真环境,造成大量重复劳动,而且不利于各种研究结果的对比分析。为了解决这个问题,我们提议开发一种通用的 G-LOBS 网络仿真工具:G-LOBS-OPNET。鉴于网络本身及实现的复杂性,构架仿真平台的工作量浩大。本文研究构建基于 OPNET 的 G-LOBS 通用仿真平台的可行性,并在此基础上提出该仿真平台的设计思想,以为后继开发工作提供参考。

实际网络设计时,通常是按照“器件选型→模块设计→设备研制→系统组网测试”的流程逐步进行。OPNET 软件采用面向对象的设计思想,采用层次化建模结构,分网络、节点和进程 3 个层次建模。其中最底层为进程模型,它以有限状态机(FSM, Finite State Machine)来描述单个对象的行为,然后以节点模型来反映设备特性。最上层则为网络模型,即设备模型互联成的网络,用来测试和仿真网络性能。对网络仿真平台的设计可参照实际网络设计方法来进行,即按照“进程→模块→设备模型→网络的分层设计”方法来实现网络仿真。我国部分高校,如电子科技大学、北京邮电大学、西安电子科技大学等,已利用 OPNET 软件对 OBS 网络建立了一些简单的模型来做仿真分析^[5]。从理论上讲,将 OBS 网络改造成 G-LOBS 网络是可行的。下面在设计 G-LOBS 网络中 RSVP-TE^[6]信令模块的基础上,借助 OPNET 工具来分析 G-LOBS 网络中的 RSVP-TE 信令协议,探索利用 OPNET 研究 G-LOBS 网络性能的可行性。

2 RSVP-TE 信令协议在 G-LOBS 网络中的扩展及信令模块的设计

GMPLS 是 MPLS 的扩展,网络由两个主要元素组成:节点标记交换路由器(LSR, Label Switched Router)和标记交换路径(LSP, Label Switched Path)。LSR 的主要功能是将面向非连接的 IP 业务移植到面向连接的标记交换业务之上,实现将路由选择层面与数据转发层面的分离,在 LSP 路径上实现业务的快速转发。鉴于 OBS 网络仍以波长路由交换作为载体,在基于 GMPLS 的 OBS 网络中,通过基于流量工程的开放式最短路径^[7](OSPF-TE, Open Shortest Path First-Traffic Engineering)来刷新网络的状态信息,使网络中的每个节点都知道网络状态的全局信息。基于获取的全局信息,源节点有充分的信息来运行节点内部的波长路由分配程序。然后通过 RSVP-TE 信令协议来建立和拆除光通路。G-LOBS 网络中的波长配置使用分布式控制机制,其难点是寻找合适的带宽接入控制协议,即控制分组与突发数据流之间的协调问题,亦即带宽释放何时被触发的问题。本文对光通路的建立和释放控制机制选用 RSVP-TE 信令。为了满足不同业务通信质量的需求,G-LOBS 网络核心节点应该能为边缘节点间的通信提供直接的光通路 LSP,并且提供相应的控制信令支撑协议。

RSVP-TE 模块设计的重要内容是消息包的传播机制及波长和 LSP 的状态管理。RSVP-TE 关于光通路 LSP 的建立过程,主要利用了包括 5 种类型的消息^[8],即 Path 请求消息、Resv 预留消息、PathErr 消息、PathTear 消息、Ack 确认消息;对应的波长有 4 种状态,即“空闲”、“预留”、“占用”和“待释放”。信令协议还涉及到用户网络接口(UNI, User-to Network Interface)上端口资源、网络节点接口(NNI, Network

Node Interface)上波长资源和交叉连接资源、LSP 的管理。这里仅详细讨论 UNI 上的 LSP。LSR 波长和 LSP 通道的工作状态转移图分别如图 1 和图 2 所示。

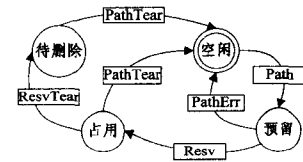


图 1 LSR 波长的个工作状态转移图

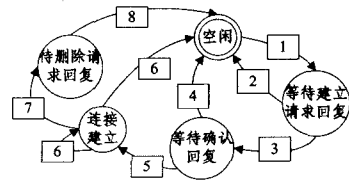


图 2 LSP 通道的工作状态转移图

考虑到实际网络中 RSVP-TE 运行时可能出现的各种情况并结合 OPNET 中进程工作的模式,我们需要对 RSVP-TE 的状态转移图进行扩展和完善,如在 init 状态中处理控制信息接收失败的 Fail_Rec、增加空闲状态 idle、定时更新网络状态的 Refresh、网络设备故障时 No_Support 处理及 Sender 发送状态单元,并清楚地界定各状态单元之间的转移条件。整理和分析上述工作状态后,设计出 RSVP-TE 的 FSM 状态图,如图 3 所示。

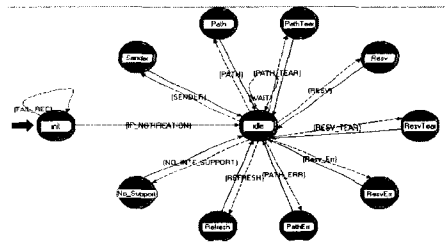


图 3 RSVP-TE 的 FSM 状态图设计

所有图中的工作状态都需要运用软件来编写内部动作及状态之间的转移条件的程序代码。OPNET 拥有丰富的自带函数库,上述 FSM 单元的处理函数和中断变量大部分都可以在 MPLS 模块的核心函数库中找到。因此,我们可以方便地在 OPNET 的开放界面上运用面向对象的 VC++ 语言描述各个 FSM 的动作及转移条件,再分别编译、Debug 每一个 FSM 中的 C++ 代码,然后将各个 FSM 状态的程序代码链接起来,组装成能完成 RSVP-TE 信令协议功能的控制模块。这就设计出了 OPNET 中的一个基本功能模块。

3 G-LOBS-OPNET 通用仿真平台的设计

以上对 RSVP-TE 的信令模块进行了设计,从而了解了进程、模块的设计方法。为了设计一个完整的设备模型,还需要做一些其它模块的开发设计工作,如 OSPF-TE 模块、链路管理协议(LMP, Link Management Protocol)模块等。按 RSVP-TE 的设计步骤,先对 OSPF-TE、LMP 的执行过程和状态转移图做细致的分析,归纳出它们的 FSM 状态图,再运用 VC++ 语言描述这些 FSM 状态的执行过程及转移条件,并通过编译链接后封装成相应的 OSPF-TE 路由模块和 LMP 链路管理模块,并参照 G-LOBS 的分层工作原理,对应增加突

发控制分组(BHP,Burst Header Packet)控制包的封包/拆包模块及收发器、数据信号收/发器、OXC 中央处理单元(OXC-CPU,OXC-Central Processing Unit)转发执行与资源管理模块;相对而言,OXC-CPU 模块比较简单,它主要是读取控制层的中断信息并按要求完成波长配置和转发执行,并及时更新波长资源管理模块中的信息。在完成各个相对独立模块的设计后,最后将上述工作模块组装成具有完整功能的核心光节点模型。

图4为一个四波长核心光节点的模型图。其中核心光节点的工作过程是:BHP包在专用的控制通道中传输,通过接收器Rec0接收到BHP模块,转到BHP_encap模块中解封装,获取控制层信息类型,再根据检测到的信息类型触发相应的RSVP-TE,OSPF-TE或LMP模块中动作,然后驱动OXC-CPU进行波长配置,并按设定的时间偏移量保持配置状态,以便数据信息包在相应的光通道中通过,同时更新该节点的状态信息,并将更新值封装进BHP包,通过发射器Tra0向下游转发。

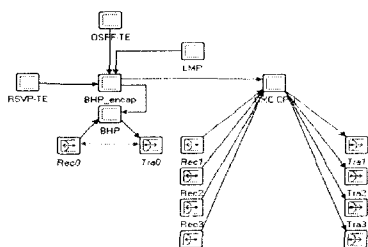


图4 四波长核心光节点的模型图

完成了对核心光节点的模型设计后,还需要设计边缘节点的模型。在不影响核心光节点研究的基础上,为了简化边缘节点的设计,我们省略边缘节点对IP数据的流汇聚和分发处理功能,可以将边缘节点的标签边缘路由器中央处理单元(LER-CPU,Label Edge Router-Central Processing Unit)设定为数据流发生器 and 终端吸收器。数据流发生器可以设计为泊松流和Pareto流^[5],终端吸收器接收数据包后直接调用库函数销毁数据包。图5为四波长边缘节点的模型图。

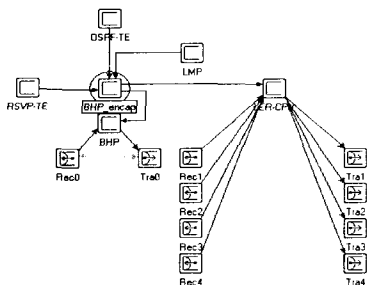


图5 四波长边缘节点的模型图

要构建一个完整的G-LOBS网络,还需要设计相应的数据包格式、BHP包格式、数据流传输链路、BHP包传输链路,这些都可以在OPNET Packet/Link界面中按需求设计,这里不作一一描述。有了边缘节点、核心节点、通信链路及包格式,就可以按照图6配置一个简单的四波长G-LOBS通用仿真平台,进行网络甚至网际间的性能仿真,诸如节点间End-to-end性能分析、确定增加应用和用户对网络的影响、快速的“what if”(如果…将会怎样)分析等,在这虚拟的实验网络环境中完成信令协议和G-LOBS网络性能的分析与验证。

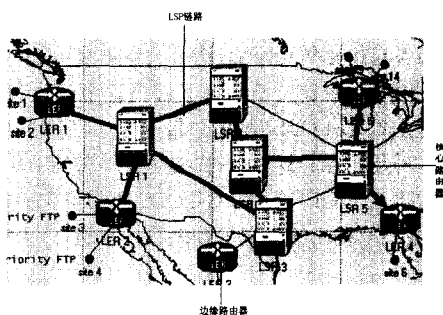


图6 四波长G-LOBS网络通用仿真平台的架构

4 基于OPNET的RSVP-TE信令协议的仿真

为了分析RSVP-TE信令协议的运行效果,下面将利用OPNET软件对运行RSVP-TE信令协议时网络的流量工程、QoS、网络保护/恢复方面的性能进行验证和分析。

前面已经从理论上分析了G-LOBS网络中的RSVP-TE的信令协议,事实上我们可以利用OPNET现有模块来近似仿真RSVP-TE的实现过程,进一步分析和验证RSVP-TE信令协议在网络中的特性。由于OPNET公司GMPLS的功能模块尚未推出,要利用OPNET来建立完整的G-LOBS网络模型,自行设计这一网络不仅需要创建网络节点,还涉及到与大量其它协议、设备和网络的嵌套,这样需要编写大量的“嵌入式软件”,并将这些软件编译调试正确后再链接起来,工作量大且实现过程非常复杂。因此在实际建模时,我们仍主要以调用MPLS模块库中的一些设备来组建网络。具体仿真思路是:在仿真软件中自定义RSVP-TE的各种信令包,在每个信令包中再定义信令的各个对象,用于承载信令消息的具体内容。一些复杂的特性通过调用模块库中的OPNET自带模块和设备组建网络模型,对网络模型的参数进行修正或配置,来模拟实际网络中RSVP-TE信令协议的运行状况。

4.1 网络仿真环境的设置

网络模型共有20个路由节点、31条链路、3个点点对点工作站、两台服务器。3个工作站经过建立起的干线网络拓朴向服务器发送单向数据流(数据请求),来模拟实际G-LOBS网络中RSVP-TE信令协议的运行状况,并对运行RSVP-TE信令协议时网络中的流量工程、QoS保证和网络保护/恢复等性能进行比较和分析(见图7)。对网络节点作如下配置。

(1)流量的源、宿及流量模型:

Sample工作站向服务器Maine_1发射(如4Mbits/s)呈均匀分布的单向UDP数据请求包,请求与请求之间间隔1s; San Francisco, Los Angeles工作站向服务器Maine发射(如2Mbits/s)同分布的单向UDP数据请求包,请求与请求之间间隔1s。

(2)节点模型:

LER边缘标签交换路由器:Las Vegas, Boston;
LSR核心标签交换路由器:其它路由器节点。

(3)链路模型:

所有链路带宽均设定为4.5M bits/s; Las Vegas经Houston建立两条动态LSP链路Primary with Ingress Backup和Primary with Bypass(分别用白色和黑色堆叠表示);备用Ingress Backup和Bypass Tunnel的动态LSP链路用虚线表示。

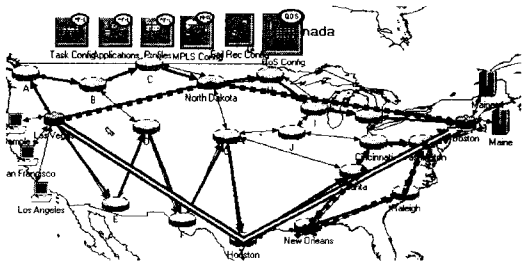


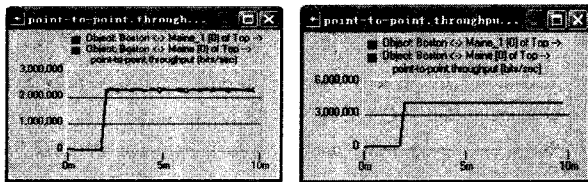
图7 RSVP-TE 信令协议的网络仿真场景

4.2 RSVP-TE 的流量工程仿真

流量工程的目的是实现对网络中业务流的精确控制,通过将业务流合理地映射到网络资源,达到提高网络性能、减少拥塞和提高可靠性的目的。这里主要针对流量工程面向资源性能进行仿真,其主要目的是统计当网络吞吐量达到最大时,RSVP-TE 信令协议提高网络链路利用率,实现负载均衡的效果。

仿真场景 1 该场景中不运行 RSVP-TE(即没有 LSP),3 个工作站发送的 UDP 数据包都集中在 OSPF 建立起来的路径中传输,此时网络已经饱和,服务器 Maine_1 和 Maine 分别接受数据约为 2.25Mbits/s,网络利用率达到 100%,Las Vegas 路由器节点处丢包率达 44%(基于 17.5M 的转发存储空间),且因为资源竞争流量传输出现周期的微小波动,图 8(a)为没有运行 RSVP-TE 时服务器接收数据的流量-时间图。

仿真场景 2 在场景 1 中运行 RSVP-TE 信令协议,LER:Las Vegas 利用 RSVP-TE 动态建立经过 Houston 的两条动态 LSP,用以传输工作站 San Francisco 和工作站 Los Angeles 的 UDP 数据流;而网络中 Sample 工作站的数据在传统路由协议(OSPF)建立起的路径上传送。工作站所发送的超负荷流量(共计 3.5Mbits/s)被较均衡地分配到了网络的空余链路中。从图 8(b)可看出,此时网络仍未饱和(仅为满载的 89%),服务器 Maine_1 和 Maine 分别接受数据约为 4Mbits/s,网络利用率达到 178%,服务器接收的流量仍然平稳,且没有丢包和资源竞争现象发生。



(a) 不运行 RSVP-TE 时 (b) 运行 RSVP-TE 时

图 8 服务器的接受数据的流量-时间图

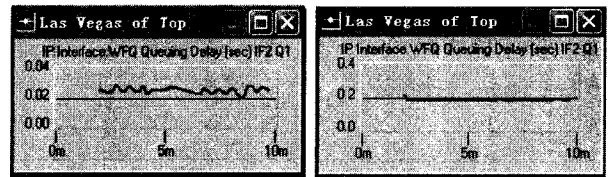
仿真结果表明,RSVP-TE 信令协议通过流量工程实现了网络负载均衡,大大提高了网络的吞吐量,而且使网络资源得到了充分的利用。

4.3 RSVP-TE 的 QoS 仿真

RSVP 能提供最高的 IP QoS 等级,使客户服务得到保障、资源分配量化。在运行 RSVP-TE 信令协议的网络中,通过设定 LSP 和 QoS 参数,可以请求高量化程度、具有最佳传输质量保证的 QoS。下面对传统路由和运行 RSVP-TE 信令协议后网络的 QoS 进行仿真。

仿真场景 3 在场景 1 中将数据流划分 QoS 等级,工作站 San Francisco 和工作站 Los Angeles 以 Best effort(0)的方

式传输 UDP 数据流,Sample 工作站以 Brackground(1)方式传输 UDP 数据流。检测链路,发现 3 个工作站发送的 UDP 数据包都集中在 OSPF 建立起来的路径中传输。当网络饱和时,服务器接收的流量因为资源竞争出现丢包并大幅波动,Maine_1 和 Maine 接受平均数据速率约为 3.25Mbits/s 和 1.25Mbits/s;将上面 3 个工作站的服务等级参数做相反设置后再仿真。当网络饱和时,服务器 Maine_1 和 Maine 接收的平均数据速率约为 3Mbits/s 和 1.5Mbits/s,数据丢包和流量波动状况没有改善,发送速度快的 Sample 工作站数据流始终具有较强的资源竞争力,而 QoS 服务级别的设置只在公平排队的平均时延和资源竞争力上有所表现,网络拥塞时 QoS 得不到保障。Las Vegas 入口节点的端口在设置 Best effort(0)和 Brackground(1)时加权公平排队的平均延时分别如图 9(a)和(b)所示。



(a) 设置 Best effort(0)方式时 (b) 设置 Brackground(1)方式时

图 9 加权公平排队的平均延时

仿真场景 4 在场景 2 中增加 QoS 的定义,同时将工作站 San Francisco 和 Los Angeles 的 UDP 数据流提高到 2.5Mbits/s,然后通过在 QoS Config Project 中定义流规范(flowspec)和过滤规则(filterspec),设定 2.5Mbits/s 的带宽预留来保障 UDP 数据流高 QoS 传输。将过滤规则设置为 FF(Fixed Filter),匹配的 Reservation Parameters 中设置 sender:Los Angeles,运行仿真场景。监测链路流量时,发现工作站 Los Angeles 的 UDP 数据通过优先建立的 LSP 到达服务器 Maine,而仿真日志 Simulation log 中显示工作站 San Francisco 的 LSP 因为资源不足而预留失败,转而以 Best effort(0)的方式按传统路由建立的路径传输 UDP 数据流,与 Sample 工作站的数据流竞争资源,在链路拥塞的情况下出现大量的数据包丢失。

仿真结果表明,RSVP-TE 信令协议在资源分配量化的情况下能使 QoS 服务获得完好的保障,使 IP 网络具备提供最高优先级 QoS 服务的能力。

4.4 RSVP-TE 的网络保护/恢复仿真

当发生网络部分链路或节点失效时,保护网络中的重要业务或快速重选路由,是体现网络健壮性的一个重要指标。传统网络保护/自愈恢复均采用逐层上报的方式,由控制平面/管理平面来决定对网络故障的处理,处理过程复杂且速度慢。在 G-LOBS 网络中,物理链路或节点的失效将导致对应的 LSP 也失去作用。在这条失效 LSP 上传送的数据需要根据其重要性进行链路保护或快速重路由恢复,以转换到新的路径上继续进行传送。控制平面可以通过信令协议的刷新或直接检测 LSP 链路故障的信息,实施 1:1 的保护倒换动作;或运用快速重选路由来实现 LSP 的快速恢复和本地 LSP 旁路恢复。快速重选路由的选路方式又有多种途径,新的路径可以通过预置重路由 LSP 的方式来减少路径转换的时间。

仿真场景 5 图 7 中两条用虚线标记的交换通道 Ingress Backup 和 Bypass Tunnel 分别为 Primary with Ingress Back-

up 和 Primary with Bypass 预置 LSP,在“ Failure/Recovery”的属性中配置好链路的故障和恢复动作:链路 Cincinnati<->Washionton 设定在 400s 时失效,460s 时恢复(不要求业务恢复到原 LSP)。当网络运行时,起初数据流都通过主 LSP 进行传输,链路在 400s 故障时网络便通过快速路由改变数据流的通道路径,启用备用的 LSP,从而可以在不预先占用资源的情况下,通过快速重路由实现 LSP 路径的快速恢复,保护倒换时间只有新建 LSP 时间的 1/3(小于 50ms);而通过局部路由器实现 Bypass Tunnel LSP 的旁路保护,恢复时间约为全局重路由由恢复时间的 1/10,业务无明显丢失。图 10 为链路在 400s 故障时全局/局部快速重路由由耗费的对比;图 11 为网络在 400s 故障前后主用 LSP/预置 LSP 中的数据流状况。

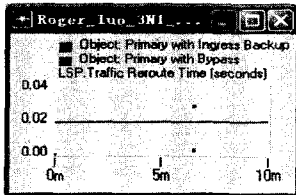


图 10 全局/局部快速重路由的耗时

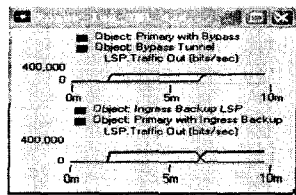


图 11 LSP 中数据流状况

仿真结果表明,RSVP-TE 信令协议能够快速处理网络元素的变化情况,可以在不预先占用资源的情况下,通过快速重路由到备用的 LSP 上工作,从而避免在 LSP 故障时数据资源

的大量丢失。

结束语 本文讨论了基于 OPNET 的 G-LOBS 通用仿真平台开发的可行性及总体设计思想,最后运用 OPNET 软件对 RSVP-TE 运行效果进行了进一步的仿真分析,为深入开展 RSVP-TE 在 G-LOBS 网络中的研究提供了思路和蓝本。

参考文献

- [1] Ben Yoo S J. Optical Packet and Burst Switching Technologies for the Future Photonic Internet[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4468-4492
- [2] 李志先,张灵玲. OPNET 在网络仿真中的应用研究[J]. 洛阳理工学院学报:自然科学版, 2009(3): 44-47
- [3] 陈岩,董淑福,蒋磊. OPNET 网络仿真技术及其应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2009(02): 199-201, 204
- [4] Jue J P, Yang W-H, et al. Optical Packet and Burst Switched Networks; a review[J]. IET Communication, 2009, 3(3): 334-352
- [5] 罗洪斌. OBS 网络边缘节点实现方案及相关技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2004
- [6] 邢子杰,孙卫强,金耀辉,等. 基于 RSVP-TE 信令的 GMPLS 动态性能研究[J]. 光通信技术, 2009(08): 36-38
- [7] 伍杰明. 智能光网络信令技术[J]. 电脑与电信, 2009(05): 35-36
- [8] 杨春勇. GMPLS 智能光网络中波长路由器的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2005
- [5] Haffner P, Sen S, Spatscheck O, et al. ACAS: Automated Construction of Application Signatures[C]//Proc of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Mining Network Data. New York, NY: ACM, 2005: 167-202
- [6] Caballero J, Yin Heng, Liang Zhenhai, et al. Polyglot: Automatic Extraction of Protocol Message Format Using Dynamic Binary Analysis[C]//Proc of the 14th ACM Conference on Computer and Communications Security. New York, NY: ACM, 2007: 317-329
- [7] Cui Weidong, Kannan J, Wang H J. Discoverer: Automatic Protocol Description Generation from Network Traces[C]//Proc of 16th USENIX Security Symposium on USENIX Security Symposium. Berkeley, CA: USENIX Association, 2007
- [8] Ma J, Levchenko K, Kreibich C, et al. Unexpected Means of Protocol Inference[C]//Proc of the 6th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. New York, NY: ACM, 2006: 313-326
- [9] 赵咏,姚秋林,张志斌,等. TPCAD: 一种文本类多协议特征自动发现方法[J]. 通信学报, 2009, 30(10): 29-35
- [10] Application Layer Packet Classifier for Linux [OL]. <http://17-filter.sourceforge.net>
- [11] 刘兴彬,杨建华,谢高岗,等. 基于 Apriori 算法的流量识别特征自动提取方法[J]. 通信学报, 2008, 29(12): 51-59
- [12] Agrawal R, Srikant R. Fast Algorithms for Mining Association Rules in Large Databases [C]//Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases, San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1994: 487-499