

摘要

OBGP（光边界网关协议：Optical Border Gateway Protocol）作为创建跨域的 End-to-End Lightpath 的解决方案之一，近年来受到广泛关注。它通过在多域光网络中综合传递路由信息和信令信息，为网络边缘的客户提供一种跨过多个光网络域来创建 End-to-End Lightpath 的机制。然而，就目前为止，OBGP 并未标准化，除了提供了一个创建 End-to-End Lightpath 的解决方案外，其他很多问题还亟待进一步深入研究，例如资源分配问题，安全性问题，Lightpath 的保护与恢复等。本文主要针对多优先级请求环境中的资源分配问题展开研究。

文章第一部分首先介绍了在光网络环境下创建跨域的 End-to-End Lightpath 的相关研究背景和发展动力。第二部分讨论了 OBGP 能够在多域光网络中创建 End-to-End Lightpath 需要具备的条件，并对目前的 OBGP 实现机制进行了详细描述。在以上分析基础上，在第三部分中对传统的 OBGP 协议进行了扩展，创新地提出了一种新的多域协同的 End-to-End 的 Lightpath 提供机制—DiffServ-aware OBGP。第四部分进行了仿真验证。仿真结果表明：1) DiffServ-aware OBGP 不仅能够为客户请求创建所需的 End-to-End Lightpath，而且在 Lightpath 创建过程中能够根据客户请求的不同优先级别来提供区分服务。2) DiffServ-aware OBGP 能在一定程度上解决地理位置相对较远的源的资源请求竞争问题。3) 资源请求竞争激烈的情况下，与 DiffServ-aware OBGP 两步法工作模式相比较，DiffServ-aware OBGP 四步法工作模式下各优先级请求的 Lightpath 创建成功率更能得到保障。

总体来看，本文主要贡献点如下：

- 基于 IETF 的 IP DiffServ 体系结构，对 Optical BGP 协议在区分服务上进行了有效的扩展，主要包括对 Optical BGP 协议中 OBGP MESSAGE 的报文格式以及波长表的基本扩展。
- 在扩展的 Optical BGP 协议基础上，引入客户请求接入控制以及虚预留资源的方法，提出了一种新的多域协同的 End-to-End 的 Lightpath 提供机制即 DiffServ-aware OBGP，该机制既能有效地分配资源，又能提供区分服务。该研究成果已形成论文一篇，并被 EI 检索。
- 基于上述机制，提出了两种简便的实现方法，即 DiffServ-aware OBGP 四步法和 DiffServ-aware OBGP 两步法。源 OBGP 路由器能够根据当前的资源竞争状况，选择相应的实现方式来为客户创建 End-to-End 的 Lightpath。

关键词：区分服务，虚预留，End-to-End Lightpath，OBGP

Abstract

OBGP(Optical Border Gateway Protocol) is one of the solutions for establishing End-to-End lightpath for customers in optical networks, thus it has been got a lot of attention these years. It provides the edge network customers establishing and managing lightpaths through multi-heterogeneous domains by transmitting inter-domain routing / signaling information. However, OBGP has not been standardization by now, also there are many problems for farther researching except the simply establishing lightpaths for customers, such as resource allocation, security, protection and recovery of lightpath.. This paper mainly aims at researching how to allocate resource in the case of multi-priority requests.

This paper firstly introduces the background of researching for establishing End-to-End lightpath in optical networks, then we discuss the requirements for the terms of OBGP to establish End-to-End lightpath and also the establishing process. In order to provide distinguish service in the process of establishing End-to-End lightpath, a new scheme called DiffServ-aware OBGP is proposed. The simulation results show that: 1. DiffServ-aware OBGP can provide distinguish service for different priority requests in the process of establishing End-to-End lightpaths besides establishing the end-to-end lightpath for customers. 2. DiffServ-aware OBGP can solve the problem of resource competition for requests from distant source partly. 3. The four-step operational mode of DiffServ-aware can provide more guarantee than the two-step one in successfully establishing the lightpath under the furious resource competition.

The contributions of this paper are as following:

- IP DiffServ which is based on IETF has extended the Optical BGP in distinguishing service, including the extension of the message format and the wavelength table.
- The proposed DiffServ-aware OBGP can provide distinguish service for different priority requests in the process of establishing End-to-End lightpaths in optical networks, also can allocate resources efficiently besides distinguish service. This idea has been involved in a paper which is indexed by EI
- Based on these protocols, the four-step operation mode and two-step operation mode for origin OBGP router have been proposed. OBGP router can choose effective operation mode to establish End-to-End lightpath for customer

according to resource competition status.

Key Words: DiffServ-aware, Virtual reservation, End-to-End Lightpath, OBGP

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 重庆邮电大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名: 李佳

签字日期: 2007 年 5 月 25 日

学 位 论 文 版 权 使 用 授 权 书

本学位论文作者完全了解 重庆邮电大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 重庆邮电大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名: 李佳

导师签名:



签字日期: 2007 年 5 月 25 日 签字日期: 2007 年 6 月 1 日

第一章 绪论

1.1 研究背景

光网络巨大的传输能力和较低的传输时延，一直以来，就被认为是最合适的传输网络。在过去的几年时间里，因特网成为了光网络空前扩张的推动力^{[1][2]}，在光网络上，不仅能够传输低时延的语音业务，还被用于传送包括因特网业务在内的其他数据业务。随着如 GridFTP、SAN 等大容量数据传输业务量的不断增加，创建 End-to-End Lightpath 的需求量呈现出了快速增长的趋势^{[3][4]}。智能光网络不仅要求能够动态、分布式并且快速可靠的建立光通路，还需要进一步提高其可管理性和互动能力。

目前世界上许多地区都有多个网络服务提供商，能够为客户或者应用提供一些局部的高带宽连接。在相同区域的客户之间建立高带宽的直接连接比较容易，但处于不同自治域的客户之间建立 End-to-End 的连接则比较困难。在传统的网络中^[5]，End-to-End 的连接都是基于网络服务提供商，由他们来管理和连通不同客户之间的通信业务，所有光设备、Lightpath 资源的管理和控制权都掌握在网络提供商手中。需要网络服务提供商使用设备制造商开发的网元管理系统（EMS）和自己开发的网络管理系统(NMS)来为客户提供 End-to-End 的连接。EMS 和 NM 都使用专有技术，并且需要进行烦琐的手工配置。因为各厂家独自开发管理系统，导致很难迅速有效地将新技术集成到现存的体系中。更重要的是，边缘客户对网络具有不可见性，无法真正参与到 Lightpath 的创建中去，不能对自己所需的 Lightpath 进行灵活地管理和控制。

密集波分复用（DWDM）^[6]技术进一步挖掘了光纤的频带资源，出租波长以及各种光设备端口成为了越来越多运营商选择的带宽运营方式。和传统的固定带宽租用和光纤租用这另外两种带宽运营方式相比，波长租用业务具有两个明显的优势：一方面可以提高光纤资源的利用率；另一方面可以降低客户的租用费用。最重要的是波分复用上每个波长可以承载的业务十分灵活，可完全满足客户的各种需要，也利于网络的升级。随着这些租用业务的发展，客户有了从多个网络提供商中租用波长以及各种光设备端口的可能，相应地，也促进了一种新的被称为“customer-controlled”网络体系的产生^[7]。在这种网络体系中，客户（如研究机构，政府部门，银行，医院等）或者应用，能够更加灵活地根据自己的需要，动态地跨过多个独立的自治域去建立，管理和控制它们所需要的 End-to-End 的 Lightpath，另

外还可以根据自己的需要来建立 optical VPNs., 并能将网络的控制和管理权转移给其他客户。

在光网络中建立跨域的 End-to-End 的 Lightpath, 需要一种域间的协议来完成各个域之间信息的交换。目前, 将成熟的边界网关路由协议 (BGP)^[8]扩展到多域光网络的光边界网关协议 (OBGP-Optical border gateway protocol)^{[19][10]}以及域间路由协议 (DDRP- Domain to domain routing protocol)^[11]和分层路由协议 (HRP-Hierarchical routing protocol)^[12]是广受关注的解决方案。其中, DDP 和 HRP 主要用于一个网络服务提供商管理的不同域之间的信息交换, OBGP 用于不同的网络服务提供商之间信息的交换^[13]。由于 BGP 在 Internet 上的应用已经很成熟, 对一种已经被证明是成功的, 并且被广泛应用的协议进行一些必要的扩展后, 相对于创建一种全新的协议, 更容易被 Internet 所接受^[14]。

边界网关路由协议 (BGP) 是一种外部网关路由协议 (EGP), 用于在各个系统之间传送“可达性信息”, 这种可达性信息只是一种用于表示经由哪些特定的自治系统 (AS) 可到达哪一个网络的信息。BGP 的运作主要通过消息来进行^[8], 定义了四种类型的消息: 初始消息 (OPEN MESSAGE), 更新消息 (UPDATE MESSAGE), 通知消息 (NOTIFICATION MESSAGE) 和保持激活消息 (KEEPALIVE MESSAGE)。初始消息是建立传输协议后发送的第一个消息, 为对等设备之间打开一个 BGP 通信会话, 只有等到双方确认后才可以交换更新, 通知和保持激活消息。更新消息用于提供其他 BGP 系统的路由更新。路由器根据接收到的更新消息可以从路由表中清除一条或者多条失效路由, 同时发布若干路由。通知消息在检查到有错误发生 (如连接中断, 磋商出错, 报文出错) 时发送。保持激活消息主要用于保持两个路由器会话连接的激活状态。两个 BGP 系统之间首先建立一条 TCP 连接, 然后开始交换整个路由表, 不需要对整个路由表进行定期的更新, 只有路由表发生变化以后才发送其他的更新报文。路由器通过这些信息构造出自治系统连接图, 根据连接图删除环路, 制定选择路径策略。

自治系统 (AS) 的经典定义^[15]是, 一组路由器在同一管理之下, 在 AS 内部使用内部网关协议 (IGP) 和统一度量来路由数据包, 通过外部网关协议将数据包路由到其他 AS。本论文中的自治系统和域的概念可以相互替换, 指在一个统一管理下的一组路由器和网络的集合。在生成的网络拓扑图中, 节点表示单域中的用于处理域间路由和信令信息的 OBGP 路由器, 边代表相邻 OBGP 路由器之间的连接。

利用 BGP 的域间交换特性, 并在其基础上进行一些必要的扩展后, OBGP 能够在多域光网络中综合传递建立 Lightpath 所需要的路由和信令信息, 最终为网络边缘的客户提供一种跨过多个光网络域建立, 管理和控制 End-to-End Lightpath 的机制。基于 OBGP 如何更好地为客户提供所需要的 End-to-End 的 Lightpath, 无论从技术本

身或者应用价值方面都有重要的意义。

然而, 到目前为止 OBGP 并未标准化, 实现机制主要有两种^{[13][16]}。一种是 CANARIE 在 CA*NET4^[17]光网络中提出的并且向 IETF 提交的相关草案^[18]里描述的, 通过对传统 BGP 的更新报文 (UPDATE MESSAGE) 里的网络层可达信息属性域 (NLRI)^{[19][20]}进行扩展, 并引入多协议扩展属性 MP-BGP (Multiprotocol Extensions for BGP)^[21]和扩展团体属性 BGP-COMM (BGP Extended Communities Attribute)^[22]来实现 Lightpath 的创建。其中在 Lightpath 标识类型属性域 (Type) 里, 通过 0XA101 和 0XA102 这两个值指明当前处于 Lightpath 创建的哪个阶段。路由器接收到扩展的 UPDATE 报文后, 进行相应的处理。实践证明, 这种对传统 BGP UPDATE 报文格式进行修改的实现机制, 并不会影响到 BGP 目前的应用, 同时能为客户建立跨过多个光网络域的 End-to-End 的 Lightpath。

另外一种实现机制是考虑到光网络的持续发展, 以及今后研究工作的进一步开展, 在将 BGP 扩展应用到多域光网络的思想基础上^{[14][18]}, 对原有 BGP 引入了一种新的报文格式即 OBGP MESSAGE, 专门用于创建跨域的 End-to-End 的 Lightpath^[23]。在这种新的报文格式中, 定义了 Lightpath 创建的阶段, 波长信息, 操作模式以及其他一些相关信息。同时, 在每个 OBGP 路由器里增加了一张波长表, 用于记录与邻居 OBGP 路由器间的波长信息。在资源发现和预留过程中, OBGP 路由器根据该表来判断当前是否有可用的波长资源。研究证明, 这种通过添加新的 OBGP MESSAGE 的实现机制, 不会对其他四种报文格式以及 BGP 的应用产生影响, 同时能够满足客户创建跨域的 End-to-End Lightpath 的需求。由于本论文的工作是在该机制上做的进一步扩展, 所以还将会在下一章中对该机制进行详细地描述。

然而, 就目前的研究现状来看, 无论哪种机制都只是实现了在多域光网络中, 利用 OBGP 为客户创建 End-to-End 的 Lightpath, 还有其他一些关键性问题, 比如: 当发生资源请求竞争时, 如何更加有效地分配有限的资源; 当有多个源向同一目的节点发送请求, 并且请求需要占用部分相同链路资源时, 如何使地理位置相对较远的源的请求能有较高的成功率建立 Lightpath; 根据当前资源请求竞争状况是否激烈, 如何采取不同的机制来有效地创建 End-to-End 的 Lightpath 等方面, 并没有进行更深层次的研究。

为此, 本文针对以上需要进行的工作做了一定的探讨, 对第二种实现机制进行了进一步扩展, 定义了对目前 OBGP 协议中 OBGP MESSAGE 报文格式以及波长表的基本扩展, 引入客户请求接入控制以及虚预留资源的方法, 提出了一种新的多域协同的 End-to-End 的 Lightpath 提供机制即 DiffServ-aware OBGP。在该机制中, 每个自治域能够根据预先制定的接入控制策略^[24], 接受或者拒绝某个客户的 Lightpath 创建请求; 对客户请求进行了优先级的区分, 当发生资源请求冲突时, 能够根据客

户的优先级别来有效地分配有限的资源，高优先级的客户请求将有更多的机会抢占低优先级的客户请求虚预留的波长资源，从而在一定程度上提高获得每段链路上所需要的波长资源的成功率。DiffServ-aware OBGP 具有两种工作模式：四步法和两步法。在资源竞争不激烈的情况下，使用两步法工作模式能相对快速地创建 End-to-End 的 Lightpath，而且不同优先级请求的 Lightpath 创建成功率也能够得到保证。在资源竞争激烈的情况下，四步法工作模式创建 End-to-End Lightpath 的时间开销相比于两步法稍多一些，但各个优先级客户请求的 Lightpath 创建成功率（尤其是高优先级客户请求）比两步法更能得到保障。源 OBGP 路由器根据当前的资源请求竞争激烈状况，选择有效的工作模式来创建 End-to-End 的 Lightpath。

论文的最后部分使用 OPNET modeler10.0 网络仿真工具对 DiffServ-aware OBGP 的有效性进行了仿真验证，并对资源请求竞争逐渐增大情况下，它的两种工作模式的性能进行了仿真比较。

1.2 依托课题及本文主要研究内容

本文的研究依托于国家 863 项目“动态灵活光网络的体系结构与关键技术研究”（项目编号：2005AA122310）。根据该项目的研究目标和内容，本论文围绕基于 OBGP 如何更好地为客户提供所需要的 End-to-End 的 Lightpath 展开研究，具体内容包括：引入域的接入控制策略，实现各个独立的自治域能够灵活地管理 Lightpath 资源；引入客户请求区分服务的思想，实现在资源请求竞争发生的情况下更加合理地分配有限的资源；讨论资源请求竞争激烈的情况下，多域协同的 End-to-End 的 Lightpath 提供机制的两种工作模式的有效性。

1.3 论文结构

本文后续各章的结构安排如下：

第二章，讨论了在光网络里，使 OBGP 能够提供 End-to-End Lightpath 的能力所必需具备的条件。由于我们是在第二种 OBGP 实现机制基础上做的进一步扩展，所以在本章中，将对该实现机制进行了详细地介绍。

第三章，讨论了在光网络环境下，基于 OBGP 为客户提供 End-to-End Lightpath 所面临的一些关键问题，提出了一种新的多域协同的 End-to-End 的 Lightpath 提供机制即 DiffServ-aware OBGP。描述了 DiffServ-aware OBGP 四步法和两步法这两种工作模式的算法和 Lightpath 创建过程，并且分别详细讨论了两种工作模式成功建立 End-to-End Lightpath 的时间，以及 Lightpath 创建失败后对资源的释放时间。

第四章，利用 OPNET 仿真工具对 DiffServ-aware OBGP 的有效性以及随着资源

请求竞争逐渐增大情况下, 两种工作模式的有效性进行了仿真验证。并对仿真结果进行了分析和讨论。

第五章对全文进行总结并描述了未来的工作。

第二章 光边界网关协议 (OBGP)

2.1 OBGP 网络结构和基本要求

在光网络中为客户创建的 Lightpath 种类主要有两种：域内的和域间的。域内的 Lightpath 创建主要通过结合流量工程的域内网关协议和 GMPLS 信令协议，如 [ISIS-TE]、[OSPF-TE]、[CRLDP] 和 [RSVP-TE] 等来控制光交换单元上的连接建立。如何进行域内的 Lightpath 创建在这里不做讨论。

在域间使用 OBGP 进行 End-to-End Lightpath 的创建，不会影响到各个域内部各种协议的正常运行。OBGP 的基本思想是将 BGP 路由器与光交换单元紧密结合起来，通过接收到的信息对它所控制的光交换单元进行连接建立^[18]。OBGP 网络要求在每一个光网络域中至少有一个 OBGP 路由器，用于传递域间的路由信息和信令信息，并且各个 OBGP 路由器能够根据接收到的信息进行相应的处理。路由信息和信令信息的传递都共享一条相同的传输连接（即相同的 TCP 连接被用于传输建立 Lightpath 所需要的路由和信令信息）。由于协议本身对于信息有选择的进行传送，因此能够最大限度的减轻核心路由器的负担。一个典型的 OBGP 路由器，主要包含三个组件：传统的 BGP 路由器（路由引擎），用于执行对等体之间的会话功能，处于 OBGP 的控制面层；光交换单元（比如 OXC，AWG，其中 OXC 可以是任意类型的交叉连接），以及 BGP 路由器与光交换单元之间的交换控制接口（SCS），BGP 路由器通过该接口对光交换单元上具体的波长建立实际的连接。另外，在本论文中，假定所有的 OXC 都具有波长转换能力^{[25][26]}。

End-to-End Lightpath 的建立无论从容量还是 End-to-End QoS 需求等方面都适用于下一代高带宽的网络运用，如网格^[27]。为了将 OBGP 用于多域光网络中创建 End-to-End 的 Lightpath，需要在 BGP 的基础上满足以下几方面要求^[16]：

1. 在多域光网络中，OBGP 能够公布必要的用于建立 Lightpath 的可达性信息。并且光网络中的各 OBGP 路由器能够清楚地知道目前网络的拓扑状况。
2. OBGP 能够描述波长的限制条件以及各个光交换单元是否具有波长转换能力。在光交换单元有波长转换能力的情况下，能够选择不同的波长进行 End-to-End 的连接。
3. OBGP 能够提供标识不同 Lightpath 的功能，比如波长的标识，连接的标识，不同光网络自治域的标识，优先程度的标识等。
4. 类似于 IP 路由列表，能够扩展当前的本地路由信息库（RIB），使它能够记

录路由信息, 可用的波长信息以及其他一些相关信息。在建立从源到目的域的 Lightpath 的过程中, 每个 OBGP 路由器能够根据其信息库里的信息, 来判断当前是否有可用的波长。

2.2 OBGP 的实现机制

目前, 将 BGP 扩展用于多域光网络来创建 End-to-End 的 Lightpath, 主要通过两种机制来实现。一种是对传统的 BGP 更新报文 (UPDATE MESSAGE) 格式进行扩展, 并引入多协议扩展属性和扩展团体属性实现光通道的发现, 丢失, 建立和删除等功能。这种机制对于网络业务不频繁时是有效的, 但在网络链路状态和资源信息不断变化的情况下, 将加剧网络局部资源的冲突, 增加网络的阻塞率和降低网络性能^[28]。另外一种是在传统 BGP 四种报文的基础上, 定义了第五种报文即 OBGP 报文格式 (OBGP MESSAGE) 专门用于 Lightpath 的创建。考虑到光网络的快速发展, 以及使用专门的报文建立 Lightpath 的方便性, 为了更好地为客户创建所需要的 Lightpath, 本文在第二种实现机制的基础上做了进一步扩展。接下来, 对这种实现机制进行详细介绍。

2.2.1 对传统 BGP 的扩展

在这种实现机制中, 为了将 BGP 扩展用于多域光网络来为客户创建所需要的 End-to-End 的 Lightpath, 主要对传统的 BGP 进行了两个方面的扩展^[23]。一是在原来四种报文格式以外, 添加了一种新的被专门用于创建 End-to-End Lightpath 的 OBGP MESSAGE 报文格式。二是在每个 OBGP 路由器中添加了一张波长表, 用于记录与邻居 OBGP 路由器间的波长信息。假设网络中的所有 OXC 都没有波长转换能力。接下来分别对这两部分的扩展进行详细的描述

这种新的 OBGP MESSAGE 由 BGP 标准的信头^[8]和附加域组成。信头格式和附加域格式分别如图 2-1, 2-2 所示。

域长 (字节)

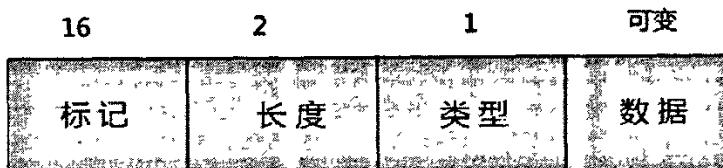


图 2-1 信头格式

标记(Marker): 含有认证值, 用来作为认证机制的一部分, 接受者可由此确认发送者的身份。

长度 (Length): 表示报文的总长度, 单位是字节。

类型 (Type): 标志报文类型。报文类型主要有五种, 分别是初始报文(OPEN), 更新报文(UPDATE), 通知报文(NOTIFICATION)以及保持激活报文(KEEPALIVE)和 OBGP 报文 (OBGP MESSAGE)

域长 (比特)

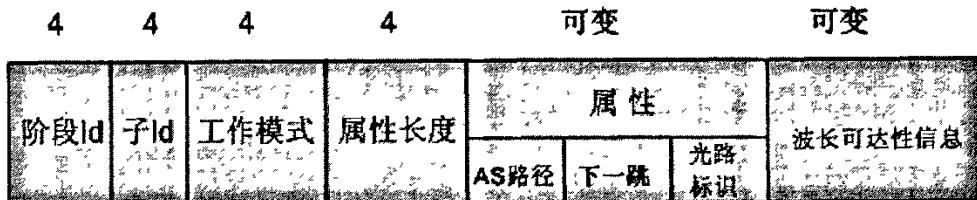


图 2-2 OBGP MESSAGE 报文格式

阶段 Id (Phase_Id): 指明 Lightpath 建立过程中当前所处的阶段, 可能的取值有: 资源发现 (Discovery), 资源预留 (Reservation), 连接建立 (Setup), 证实 (Confirmation), 释放 (Teardown), 出错 (Error)。

子 Id (Subphase_Id): 用于证实阶段和出错阶段。在证实阶段中, 指明当前是 Lightpath 创建成功证实还是 Lightpath 释放成功证实。在出错阶段中, 用于指明具体的出错原因。

工作模式 (Operational Mode): 用于指明工作模式类型。主要有两种工作模式: 两步法 (two-phase) 和四步法 (four-phase)。

属性长度 (Attribute Length): 表示属性的总长度。

属性 (Attribute): 由以下几部分构成:

AS 路径 (AS_Path): 一组显示路径列表, 用于指明所建 Lightpath 从源到目的节点的 AS 路径。具体而言, AS 路径上的第一个节点为源节点, 最后一个为目的节点, 中间依次为从源节点到目的节点需要经过的中间节点。

下一跳 (NEXT_Hop): 下一跳 OBPG 路由器的 IP 地址。

Lightpath 标识 (Lightpath_Id): 与 AS 路径一起, 指明一条唯一的 Lightpath。

波长可达性信息 (Lambda RI): 在资源发现阶段中, 记录一系列可用的波长信息; 在资源预留阶段中, 记录由目的节点最终决定使用的唯一的一条波长信息。

另外, 在每一个 OBGP 路由器里都添加了一张波长表, 用于记录与邻居 OBGP 路由器间的波长信息, 在资源发现和预留过程中, 路由器根据该表来判断当前是否有可用的波长资源。每个波长的入口信息包含以下几个方面的内容, 如图 2-3 所示。

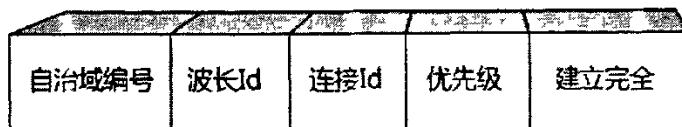


图 2-3 OBGP 波长表

自治域编号 (AS number): 该波长连接的 OBGP 路由器所在的自治域编号。

波长 Id (Lambda Id): 包括波长的编号, 源端口号, 目的端口号, 与自治域编号一起指定一条唯一的波长。

连接 Id (Connection Id): 包括 Lightpath 标识(Lightpath_Id)和 AS 路径 (AS_Path)。用于标识一条唯一的 Lightpath。若此项为空, 表示该波长可以被使用, 否则不可被使用。

优先级 (Preference Lever): 该波长的优先级, 目前该属性域没有被使用, 可用于今后的研究。

建立完全 (Setup Complete): 布尔型变量, 用于指明该波长在 OXC 上的连接是否已经被成功建立。

2.2.2 基于 OBGP 创建 End-to-End 的 Lightpath

四步法工作模式的主要思想是, End-to-End Lightpath 创建由四个阶段构成, 即资源发现阶段 (Discovery Phase)、资源预留阶段 (Reservation Phase)、连接建立阶段 (Setup Phase) 和证实阶段 (Confirmation Phase)。

一条完整的 Lightpath 由多段链路组成, 为了成功创建一条 End-to-End 的的 Lightpath, 首先需要逐一发现从源节点到目的节点之间的每段链路上是否都有可用的资源。在资源发现阶段中, 源 OBGP 路由器产生一个随机的 Lightpath 标识号, 并创建一个用于资源发现的 Discovery OBGP 报文, 从波长表里选取 AS 路径上的下一个节点间的空闲波长, 将路由信息, Lightpath 标识等相关信息写入到该报文中, 然后将该报文发送给 AS 路径上的下一个节点。收到此报文后, 节点查看它的波长表, 由于波长连续性限制, 节点将选择与接收到的报文里可用波长相同的波长, 并将这些可用的波长信息写入到该报文中, 并传给下一个中间节点, 重复此操作, 直至目的节点。

资源发现阶段完成后, 需要将每段链路上的可用资源预留起来。在资源预留阶段, 目的节点将从这些可用波长中选择一个作为创建 Lightpath 所需要的波长, 将该波长的标识写入报文中, 并将报文的阶段 id 属性值改为 Reservation。发送该报文给 AS 路径上的前一个节点。收到该报文后, 节点检查该波长当前是否能够被使用。如果能, 将 Lightpath 标识、AS 路径等记录到该波长对应的属性中, 并将该报文传送给它的前一个节点。当有多个请求需要预留相同的资源时, 先到达的请求将被节点接受。资源被预留以后, 其他后来到达的请求将被拒绝。重复此操作直至源节点。当源节点收到该报文并对 AS 路径上的下一个节点间的该波长资源进行预留后, 此

时欲创建的 Lightpath 需要的所有资源都已经被成功预留, 但此时并没有对它们建立实际的连接。

在第三阶段中, 完成 OXC 上的连接建立工作。从源节点起, 对预留的资源在 OXC 上建立连接。连接建立完成后, 修改波长表里该波长对应的相关属性, 将报文的阶段 id 属性值修改为 Setup, 并发送给 AS 路径上的下一个节点。收到该报文后, 节点对它所控制的 OXC 建立连接, 修改波长表里该波长对应的相关属性, 并将报文发送给 AS 路径上的下一个节点。重复这样的操作, 直至目的节点。

当目的节点收到此报文并对 OXC 进行相应配置后, 一条 Lightpath 已创建成功。但此时源节点并不知道所需要的 Lightpath 已创建成功, 需要目的节点将该报文的阶段 id 属性值修改为 Confirmation, 并将该报文沿 AS 路径发送给源节点。这就是第四阶段即证实阶段完成的工作。当源节点收到该 Confirmation OBGP 报文后, 这条已创建成功的 Lightpath 可被立即投入使用。

两步法工作模式创建 End-to-End 的 Lightpath, 仅由资源发现阶段 (Discovery Phase) 和连接建立阶段 (Setup Phase) 构成。一旦资源发现阶段完成, 发现从源节点到目的节点之间每段链路上都有可用的资源, 立即从目的节点开始逐一对 OXC 建立连接, 直至源节点。

另外, 研究还分析了在 End-to-End Lightpath 创建过程中, 可能会发生的各种错误, 并对其进行相应的处理。

研究最后指出, 如果当前网络中的 Lightpath 资源充足, 资源请求失败的概率较小, 可以使用两步法的工作模式来相对快速的创建 Lightpath。如果建立相同路径或者使用某段相同链路的 Lightpath 请求数目较多, 资源请求失败的概率较大的情况下, 如果采用两步法的工作模式, 一旦在连接建立阶段中出现错误, 需要依次解除从当前节点到目的节点之间每段链路 OXC 上的连接, 并修改波长表的相关信息。将资源提供给其他新到达的请求使用。与四步法工作模式相比较, 需要花更多的时间来释放资源, 建议在这种状况下, 采用四步法的工作模式。但是并没有对二者的性能进行具体的分析和比较。

2.3 小结

本章讨论了在多域光网络里, 使 OBGP 能够提供 End-to-End Lightpath 的能力所需要具备的条件, 并且详细介绍了通过定义一种新的专门用于 Lightpath 创建的 OBGP MESSAGE 的 OBGP 实现机制。但无论是哪种实现机制, 都只是实现了在多域光网络下进行 End-to-End Lightpath 的创建, 其他一些关键性问题, 比如在发生资源请求竞争的情况下, 如何有效地分配有限的资源等方面均未涉及。另外, 在本章

介绍的实现机制中也没有对四步法和两步法的工作模式进行具体的性能分析比较。下一章，将针对以上问题进行深入探讨，在该实现机制的基础上进行进一步扩展，提供一种更好的 End-to-End Lightpath 创建机制。

第三章 一种新的多域协同的 End-to-End Lightpath 提供机制

无论是通过对传统 BGP 的更新报文 (UPDATE MESSAGE) 里的网络层可达信息属性域 (NLRI) 进行扩展, 还是使用专门的 OBGP MESSAGE, 这两种机制都仅仅实现了将传统的 BGP 扩展到多域光网络中, 进行 End-to-End Lightpath 的创建。在实际的 Lightpath 创建过程中, 还有其他一些关键性问题, 比如当发生资源请求竞争时, 如何有效地分配有限的资源; 当有多个源向同一目的节点发送请求而且请求需要占用部分相同波长资源时, 如何使地理位置相对较远的源的请求能有较高的成功率获取需要的资源来建立 Lightpath; 根据当前资源竞争状况是否激烈, 如何采取不同的机制来有效地创建 End-to-End 的 Lightpath 等, 这些问题都需要并且值得进行深入的研究。

本章针对上述问题, 讨论了在多域光网络环境下如何更好地为客户创建 End-to-End Lightpath。在第二种 OBGP 实现机制的基础上进一步扩展, 提出了一种新的多域协同的 End-to-End 的 Lightpath 提供机制即 Diffserv-aware OBGP 来加以解决。

3.1 Diffserv-aware OBGP 的实现

Diffserv-aware OBGP 是在客户请求的接入控制和虚预留资源的方法基础上, 以及对传统 OBGP MESSAGE 的报文格式和波长表进行扩展后实现的。接下来, 将分别对这几部分内容进行详细描述。

3.1.1 客户请求的接入控制

目前使用 OBGP 创建 End-to-End Lightpath 的机制中, 所有的客户请求都能使用域间的 Lightpath 资源。为了最大化每个自治域的自治性, 并对各个请求使用资源时能够提供区分服务, 在 Diffserv-aware OBGP 中引入了客户请求接入控制策略。这里的接入控制指的是, OBGP 路由器能够通过一定的条件来控制各个客户请求对可用资源的使用权限, 有选择的接受或者拒绝某个客户的 Lightpath 创建请求, 并能控制不同优先级别的客户请求在使用可用资源时的优先程度。

具体的实现方法是, 在每个 OBGP 路由器中都添加了一张客户列表, 如表 3-1 所示。

客户 ID	服务类型	优先级别
P1	光路服务	低
P2	光路服务	中
P3	光路服务	高

表 3-1 客户列表

客户列表主要由以下几部分内容构成：

客户 Id(User_Id)即客户的标识。

服务类型(Service_Type)即该域能够为该客户提供的服务类型。

优先级别(Priority)即该客户的优先级。本文假设存在三种不同类型的客户优先级别。

列表中的内容由上层的网络服务提供商进行协商，按照一定的策略制订而成^[29]。

列表中的客户能够得到该域提供的相关服务。在表 3-1 中，我们假定对客户只提供 Lightpath 服务，其他服务在我们今后的研究工作中进行扩展。只有在列表中的客户才有使用该域与邻居域间可用资源的权限，同时被赋予了对可用资源使用时的不同优先程度。客户优先级越高，其对应的资源请求优先级也越高。OBGP 路由器能够根据客户请求的优先级别，来控制不同的请求对可用资源使用时的优先程度。

接下来我们将讨论资源的有效分配问题，当发生资源请求冲突时，如何根据客户请求的优先级别有效地分配有限的资源。

3.1.2 资源预留的方法

由于一条完整的 End-to-End 的 Lightpath 是由多个自治域间的多段链路组成，要成功创建一条 End-to-End 的 Lightpath，需要客户请求不仅能有使用每段链路上可用资源的权限，还必须成功获得每段链路上的波长资源。论文中只对客户请求对每段链路上的可用资源均有使用权的情况加以讨论。为了以较高的概率成功创建一条 End-to-End 的 Lightpath，即使在发生资源请求竞争的情况下，仍需要客户请求有较高的成功率获得每段链路上的波长资源。

我们提出的 Diffserv-aware OBGP 机制中，同^[23]一样也有两种 Lightpath 创建工作模式，即 Diffserv-aware OBGP 四步法和 Diffserv-aware OBGP 两步法。无论是哪种工作模式，首先都需要对源节点到目的节点之间的每段链路进行可用资源的发现。一旦发现当前链路上有可用的资源，从这些可用的资源中选择一个波长进行虚预留。虚预留也就是暂时预留^[30]。只要资源当前处于空闲状态，或者处于虚预留状态，而当前到达请求的优先级别高于在该 OBGP 路由器的波长表中该波长对应的最后一次

登记的请求的优先级别，就能对所要求的资源进行虚预留。在该阶段中，一个波长可能被一个或者多个客户请求进行虚预留。在四步法工作模式中，需要对目的节点到源节点之间每段链路上虚预留的波长资源逐一的进行确定预留，只有优先级别最高的资源请求能够在该阶段被确认。使用虚预留机制的好处主要有两点：一是若不考虑最终查找结果而直接对可用的资源进行预留，那么其他的资源请求则被拒绝。如果后面继续进行的资源发现与预留过程中没有找到可用的资源，在这个时间间隔里，前面预留的资源不能被其他请求所使用，造成资源的浪费。尤其当某段链路上的资源在一段时间内都比较紧张，多个新到达的 Lightpath 请求将会被拒绝，这些请求在前面链路上预留的资源都不能被其他请求所使用，这种资源浪费的情况将更加严重。所以对每段链路上都有可用资源确认之前，不能对资源进行直接预留。二是使用这种资源暂时预留机制，在波长资源被确定预留之前，高优先级客户请求即使相对较晚到达，仍然有机会去抢占低优先级客户请求虚预留的波长资源。这样，在一定程度上提高了高优先级客户请求获得每段链路上可用资源的可能性。一旦资源被确定预留以后，则不能被其他的请求使用。在该阶段，一个波长最终只能被一个客户请求预留。采用这样的机制，在发生资源请求竞争的情况下，节点能够根据客户请求的优先级有效地分配有限的资源。

在两步法的工作模式中，一旦资源发现和虚预留阶段完成，发现从源节点到目的节点之间每段链路上都有可用资源，并且都被成功虚预留以后，不再需要对资源进行确定预留，而是立即从目的节点开始逐一地建立连接。由于没有对资源进行确定预留，有可能在连接建立过程中发现，原先虚预留的资源已被其他更高优先级的客户请求抢占了的情况，而此时在该段链路上没有其他空闲的波长资源或者更低优先级请求虚预留的资源，Lightpath 创建失败。需要依次解除从当前节点到目的节点所控制的 OXC 上的连接，释放 Lightpath 资源，以把资源提供给当前到达的其他客户请求使用。

3.1.3 对传统的波长表和 OBGP MESSAGE 报文格式的扩展

为了在创建 End-to-End Lightpath 时能够为不同优先级的客户请求提供区分服务，还需要对目前的波长表以及 OBGP 报文的内容进行部分扩展。

首先是对原有波长表^[23]的扩展，如图 3-2 所示。

自治域编号	波长Id	连接Id	客户Id	波长状态	优先级	建立完全
-------	------	------	------	------	-----	------

图 3-2 扩展后的波长表

扩展的内容包括客户 Id 和波长状态。

客户 Id(User_Id):即客户的标识。与前面的连接 Id 属性包括 AS 路径(AS_Path), Lightpath 标识(Lightpath_Id)一起, 用于在 OBGP 路由器中登记哪个客户希望跨过哪些自治域建立一条标识为多少的 Lightpath。

波长状态 (Wavelength State): 指明当前波长所处的状态。可能的取值有空闲 (Idle)、虚预留 (Virtual Reservation)、预留 (Reservation)、建立 (Setup)。当有新的请求到达的时候, 如果 OBGP 路由器发现当前波长表中有空闲的波长, 或者有被虚预留的波长而新到达请求的优先等级高于该波长对应的最后一次登记的客户请求, 立即把这个新到达的客户请求相关信息登记到该波长对应的属性中。显然, 处于虚预留状态的每个波长所登记的最后一个客户请求信息, 都是当前时刻优先级别最高的请求。如果所需要的波长处于预留状态, 即使当前到达的客户请求优先级别高于最后一次登记的客户请求, 仍然不能使用该波长。

接口(SCS)对 OXC 上的波长连接建立完成后, 对应波长的建立完全属性值被修改为 TRUE。只有 OXC 上的连接被解除之后, 该属性值才能被置为 FALSE, 对应的波长状态属性值转为空闲。

对现有 OBGP 报文格式的扩展如图 3-3 所示。

域长 (比特)

4	4	4	16	可变	可变
阶段 Id	子 Id	操作模式	属性长度	属性	波长可达性信息

AS 路径 下一跳 光路标识 客户标识

图 3-3 扩展后的 OBGP MESSAGE 报文格式

阶段 Id 中可能的取值有: 资源发现且虚预留(Virtual Reservation), 资源预留 (Reservation), 连接建立 (Setup), 证实 (Confirmation), 释放 (Teardown), 出错 (Error)。OBGP 路由器根据接收到的 OBGP 报文里的阶段 Id 和子 Id 的属性值进行具体的操作。

属性域中添加了客户标识 (User_Id) 项, 该项与 AS 路径 (AS_Path), Lightpath 标识 (Lightpath_Id) 一起, 使 OBGP 路由器知道哪个客户提出了想跨过哪些自治域去建立一条标识为多少的 Lightpath 请求。

波长可达性信息 (Lambda RI): 在资源发现和虚预留阶段中, 逐一记录每段链路可用的波长信息; 在资源确定预留阶段中, OBGP 路由器根据该属性值与客户请求信息依次对每段链路上虚预留的资源进行确定预留。

3.2 基于 DiffServ-aware OBGP 进行 End-to-End Lightpath 的创建

DiffServ-aware OBGP 有两种工作模式，即 DiffServ-aware OBGP 四步法以及 DiffServ-aware OBGP 两步法。下面，我们将对这两种工作模式进行详细的介绍。

3.2.1 四步法工作模式建立 End-to-End Lightpath 的算法以及实现过程

DiffServ-aware OBGP 四步法工作模式创建 End-to-End Lightpath 的过程主要包括以下四个步骤：(1)发现资源并且进行虚预留(2)预留资源(3)建立连接(4)Lightpath 证实。如图 3-4 所示。

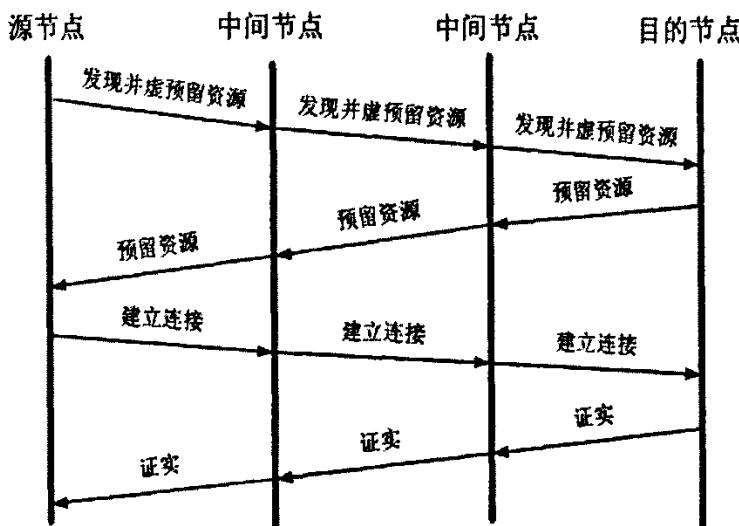


图 3-4 Diffserv-aware OBGP 四步法 Lightpath 创建过程

当 OBGP 路由器收到来自本地应用层的客户请求时，首先查看它的波长表，查看与 AS 路径上的下一个节点之间当前是否有空闲状态的波长。如果有，则对该波长进行虚预留，如果当前没有空闲波长，查看是否有被虚预留的波长而该请求的优先等级高于该波长对应的最后一次登记的客户请求的优先级别。如果有，则对该波长进行虚预留。将该客户请求相关信息添加到该波长相对应的属性中。产生一个随机的 Lightpath 标识号，并创建一个阶段 Id 属性值为 Virtual Reservation 的 OBGP 报文。将客户请求信息，路由信息，Lightpath 标识以及虚预留的波长等相关信息写入到该报文中，然后发送给 AS 路径上的下一个节点。收到此报文后，节点对 AS 路径上的下一个节点间的可用资源进行发现并虚预留。将虚预留的波长信息写入到该报文后，把报文发送给 AS 路径上的下一个节点。重复这样的操作，直至目的节点。

当目的节点收到该 OBGP 报文后，表示所请求 Lightpath 的每段链路上可用的波长资源都被暂时预留起来，但是这些资源有可能会被其他后来到达的高优先级的请求占用，所以还需要对它们进行确定预留。目的节点收到该 OBGP 报文后，将该

OBGP 报文的阶段 id 属性值改为 Reservation，并将该报文发送给 AS 路径上的前一个节点。收到该报文后，节点查看与 AS 路径上的下一个节点之间虚预留的资源是否能够被使用，如果能。对该波长进行确定预留。否则查看当前是否有空闲波长，如果有，则对该波长进行确定预留。此时如果没有空闲波长，查看是否有比该请求优先级别更低的其他请求虚预留的波长资源，如果有，则抢占该资源并对其进行确定预留。如前所述，一旦资源被确定预留以后，则不能被其他的请求使用。节点将该客户请求相关信息添加到该波长相对应的属性中，并把该报文发送给 AS 路径上的前一个节点。重复此操作，直至源节点。当源节点收到该报文，并对 AS 路径上的下一个节点之间虚预留的资源进行确定预留后，此时欲创建的 Lightpath 需要的所有资源都已经被成功预留，但还没有建立实际的连接。

第三阶段，从源节点开始按照预留的资源对 OXC 建立连接，连接建立完成后，修改波长表里的相关信息，将该 OBGP 报文的阶段 id 属性值改为 Setup，并将该报文发送给 AS 路径上的下一个节点。收到该报文后，节点对 OXC 建立连接，连接建立完成后，修改波长表里的相关信息，并把该报文发送给 AS 路径上的下一个节点。重复此操作，直至目的节点。

当目的节点收到此报文，对它所控制的 OXC 进行相应的配置后，一条 Lightpath 创建成功，但此时源节点并不知道，需要目的节点返回一个表示 Lightpath 创建成功的证实报文。目的节点将该 OBGP 报文的阶段 id 属性值改为 Confirmation，并把该报文发送给 AS 路径上的前一个节点。当节点收到该报文后，不做其他处理，立即把该报文发送给 AS 路径上的前一个节点。当源节点收到该 Confirmation OBGP 报文后，知道所需的 Lightpath 已创建成功，可以立即将这条 Lightpath 投入使用。

当 Lightpath 使用结束后，需要释放这条 Lightpath 上所有的资源。源节点解除 OXC 上的连接，修改波长表的相关信息，并发送一个用于 Lightpath 释放的 Teardown OBGP 报文给 AS 路径上的下一个节点，收到该 OBGP 报文后，节点根据报文内容解除 OXC 上的连接。修改波长表的相关信息，并将该报文发送给 AS 路径上的下一个节点。重复刚才的操作，直至目的节点。当目的节点收到该报文，并解除 OXC 上的相应配置后，该 Lightpath 被释放。

假设对 OXC 的连接建立不会出错，在 Lightpath 创建过程中，失败主要出现在两个阶段，即资源发现和虚预留阶段以及资源预留阶段。Lightpath 失败出现的原因以及相应的处理如图 3-5, 3-6 所示。

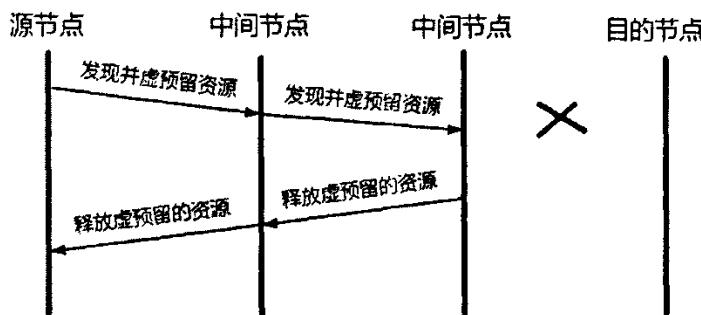


图 3-5 资源发现与虚预留过程中出错

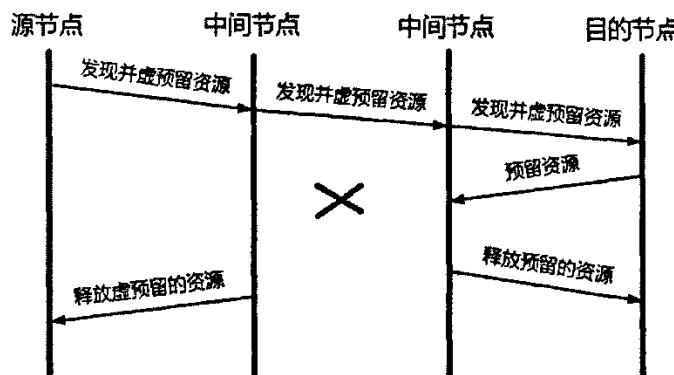
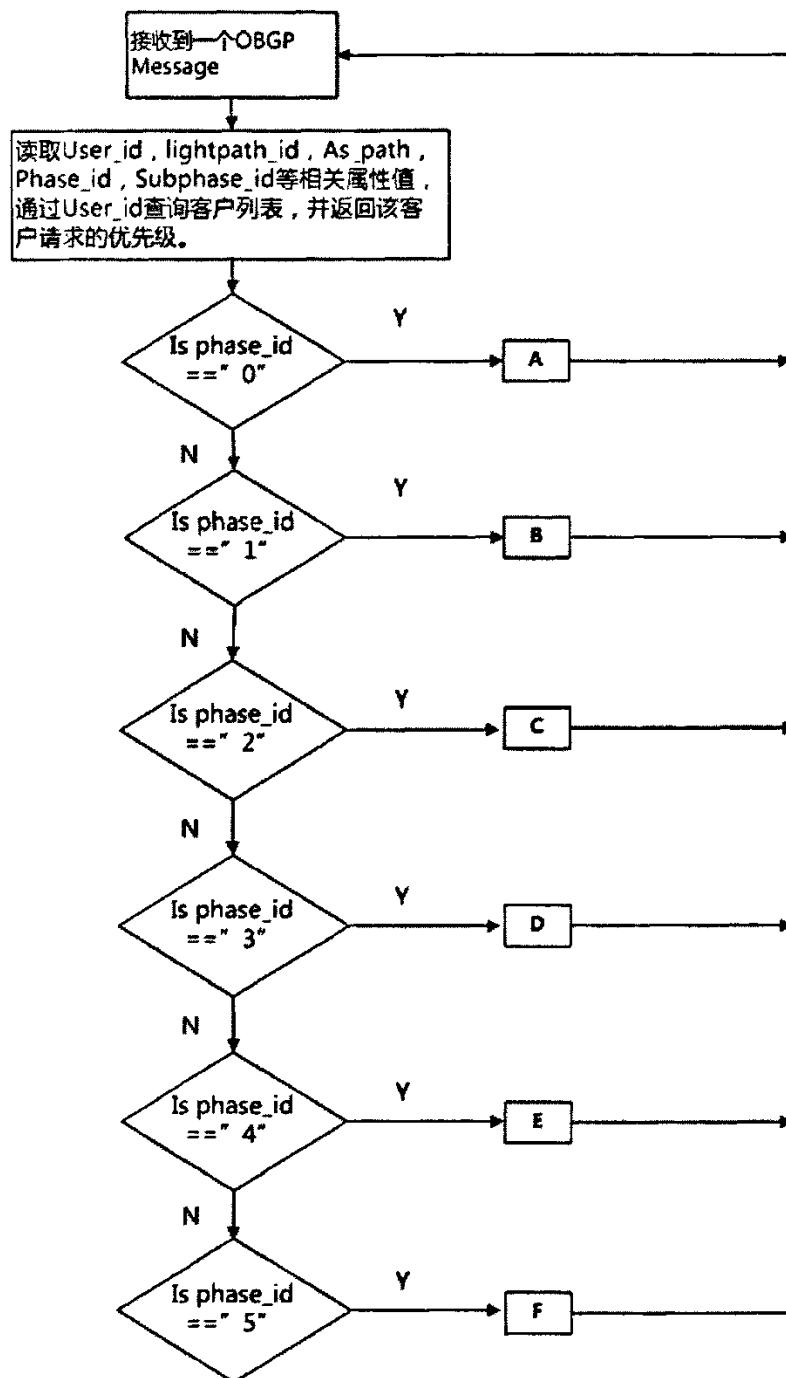


图 3-6 资源预留过程中出错

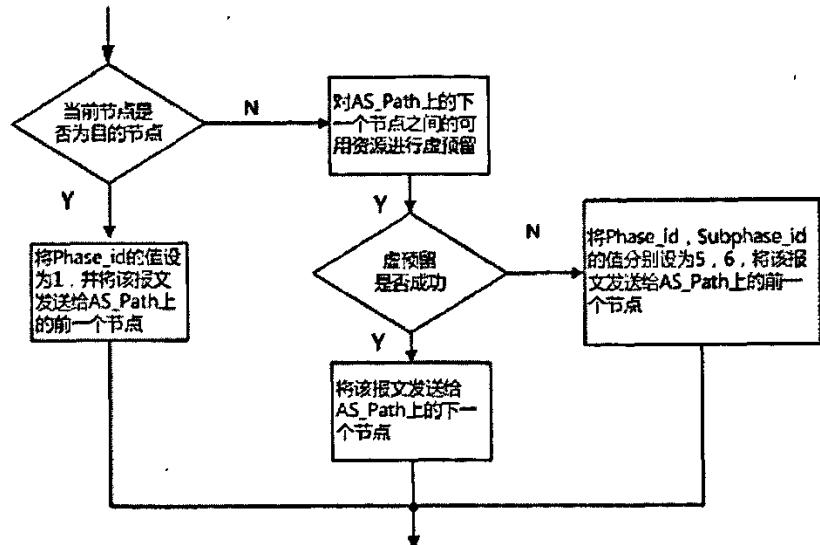
在实际的 Lightpath 创建过程中，OBGP 路由器主要根据接收到的 OBGP 报文中的阶段 Id 和子 Id 属性值进行不同的操作。在仿真中，对阶段 Id 和子 Id 进行定义，如下所示：

Phase-id	0	/* Lightpath_Discovery */
	1	/* Lightpath_Reservation */
	2	/* Lightpath_Setup */
	3	/* Lightpath_Confirmation */
	4	/* Lightpath_Teardown */
	5	/* LightPath_Error */
Subphase_id	6	/* Discovery_Error_release_discovered_resource */
	7	/* Reservation_Error_release_discovered_resource */
	8	/* Reservation_Error_release_reserved_resource */
	9	/* Setup_Error_release_discovered_resource */
	10	/* Setup_Error_release_setuped_resource */

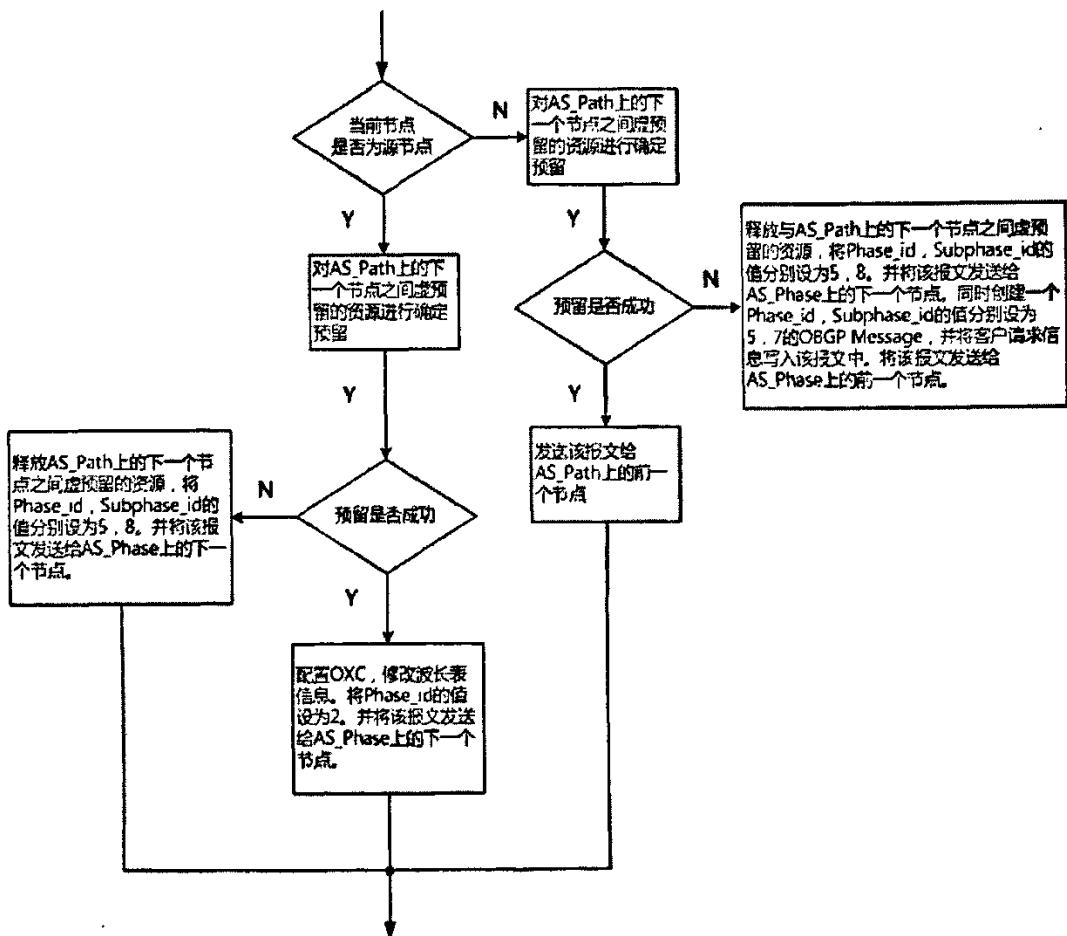
Diffserv-aware OBGP 四步法工作模式的算法如下：



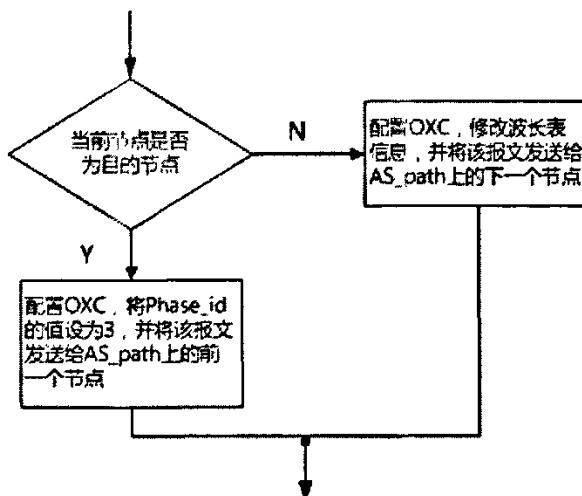
A 模块的具体算法如下：



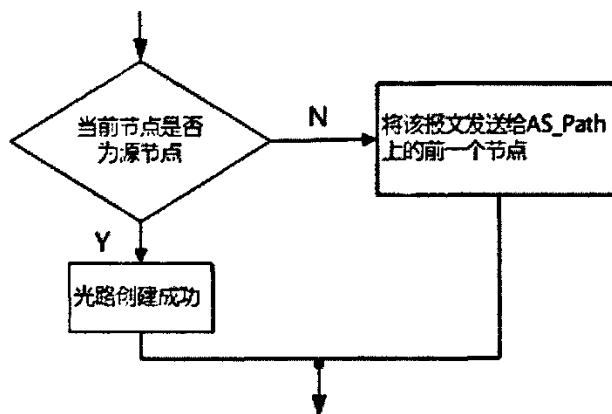
B 模块的具体算法如下：



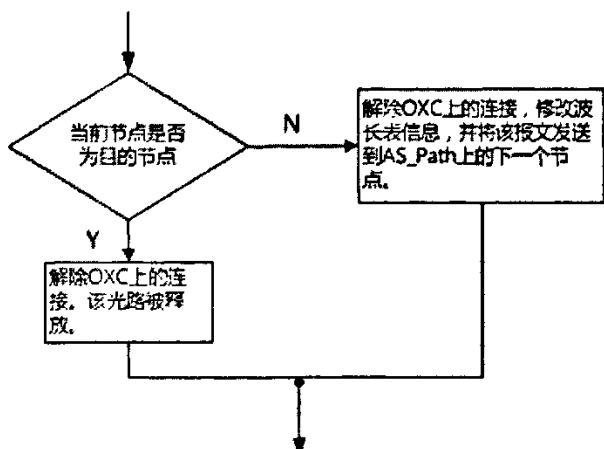
C 模块的具体算法如下：



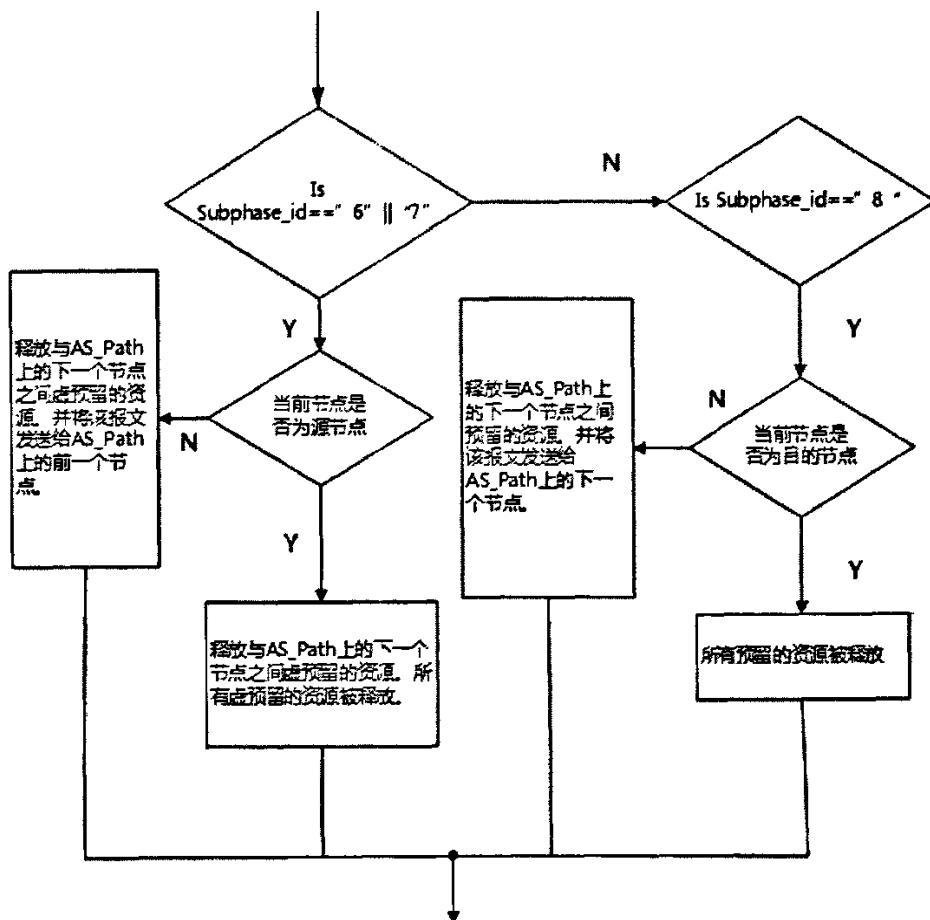
D 模块的具体算法如下：



E 模块的具体算法如下



F 模块的具体算法如下：



3.2.2 两步法工作模式建立 End-to-End Lightpath 算法以及实现过程

DiffServ-aware OBGP 两步法工作模式的创建 Lightpath 的过程主要包含两个步骤：(1)发现资源并且进行虚预留(2)建立连接。如图 3-7 所示。

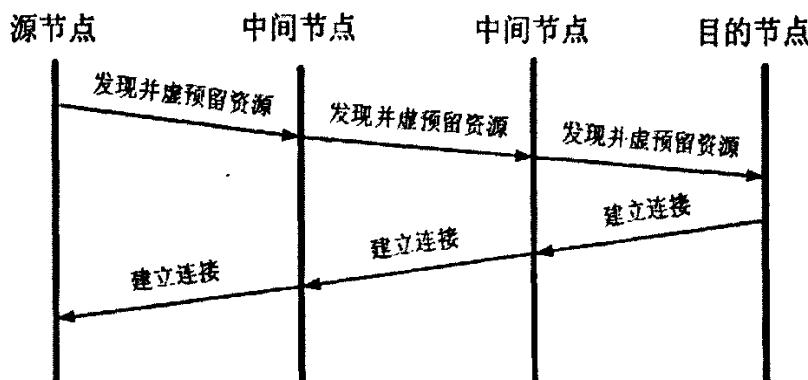


图 3-7 DiffServ-aware OBGP 两步法 Lightpath 创建过程

同四步法一样，首先需要逐一发现并虚预留从源节点到目的节点之间每段链路上的波长资源。与四步法工作模式不同的是，不再对虚预留的波长资源进行逐一地确定预留，而是直接从目的节点开始依次建立连接。由于虚预留的资源没有被确定预留，所以容易在连接建立过程中发现，在第一阶段中被虚预留的波长资源已经被其他优先级别更高的请求占用的情况，而此时在该段链路上没有其它空闲的波长或者更低优先级请求虚预留的资源可被使用。Lightpath 创建失败，需要释放从当前节点到目的节点间 OXC 上的连接，释放资源以提供给其他新到达的请求使用。

在 Lightpath 创建过程中，失败主要出现在两个阶段，即资源发现和虚预留阶段，以及连接建立过程中发现原先虚预留的波长已被其他更高优先级别的客户请求占用，当前也没有其他资源可被使用，从而导致失败。Lightpath 创建失败的原因和相应的处理如图 3-8，3-8 所示。

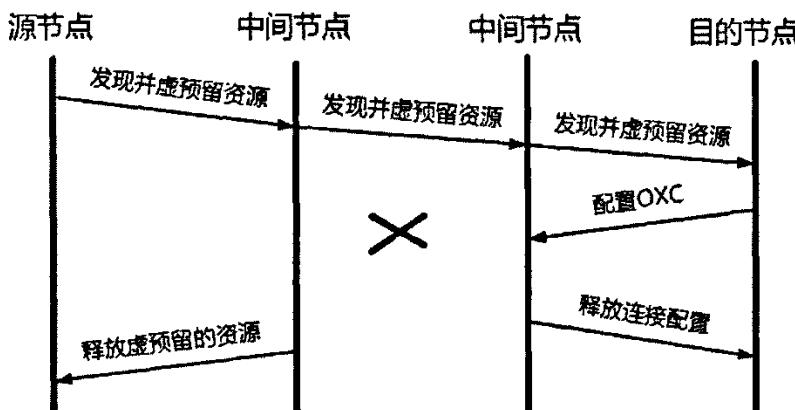
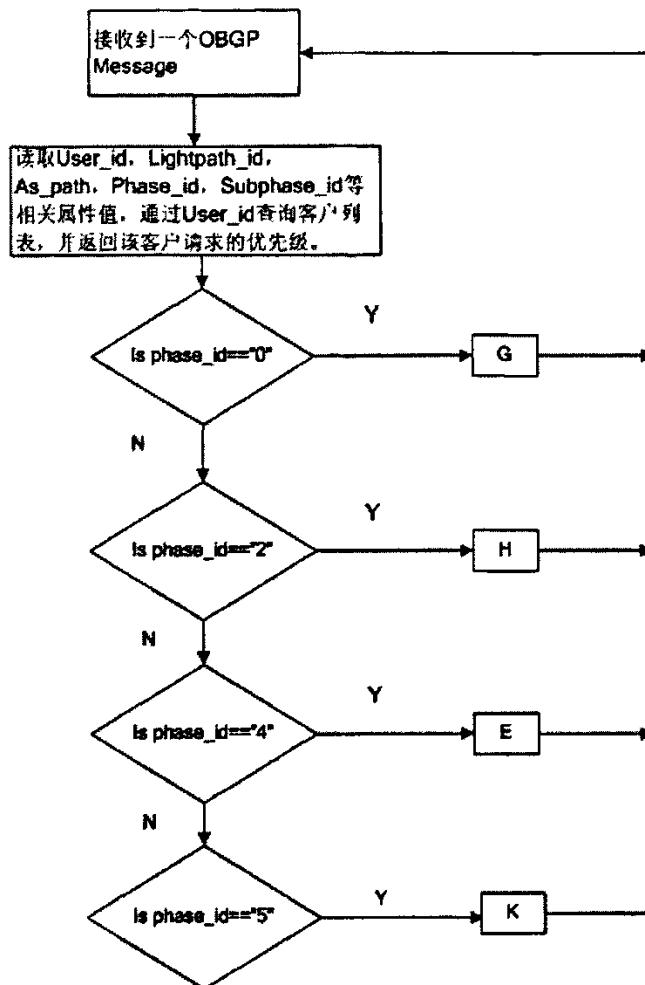


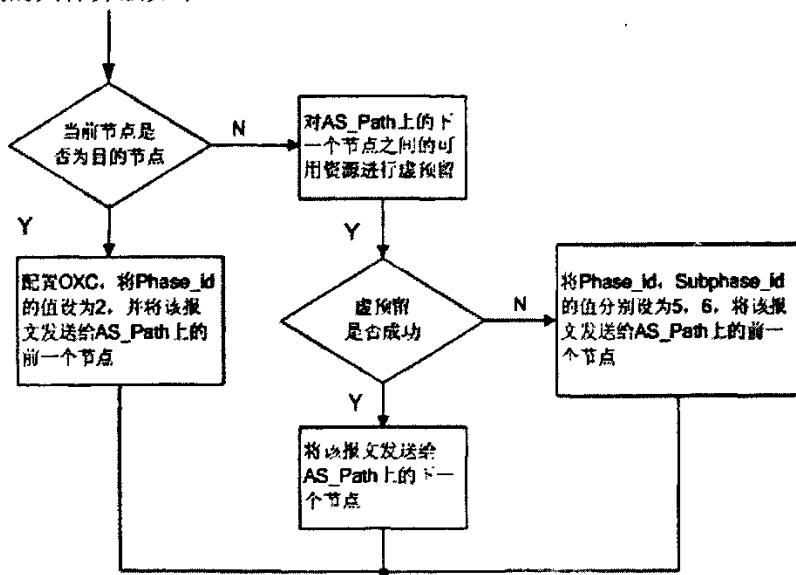
图 3-8 连接建立过程中出错

Diffserv-aware OBGP 两步法的实现算法与 Diffserv-aware OBGP 四步法相似，只是有三点不同，一是在节点间的 OBGP 报文传送过程中，没有 Reservation OBGP 报文和 Confirmation OBGP 报文。二是收到 Setup OBGP 报文后，OBGP 路由器首先检查该请求虚预留的资源当前是否能被该请求使用，如果能，对 OXC 建立连接，并修改波长表中该波长对应的相关属性。如果不能，而且当前链路上也没有空闲资源或者更低优先级请求虚预留的资源，Lightpath 创建失败，需要依次解除从当前节点到目的节点间 OXC 上的连接。三是当源节点收到 Setup OBGP 报文并对预留的资源在 OXC 上建立连接后，客户所请求的 Lightpath 创建成功，新建的 Lightpath 能被立即投入使用。不需要再从目的节点向源节点返回表示 Lightpath 已创建成功的证实报文。

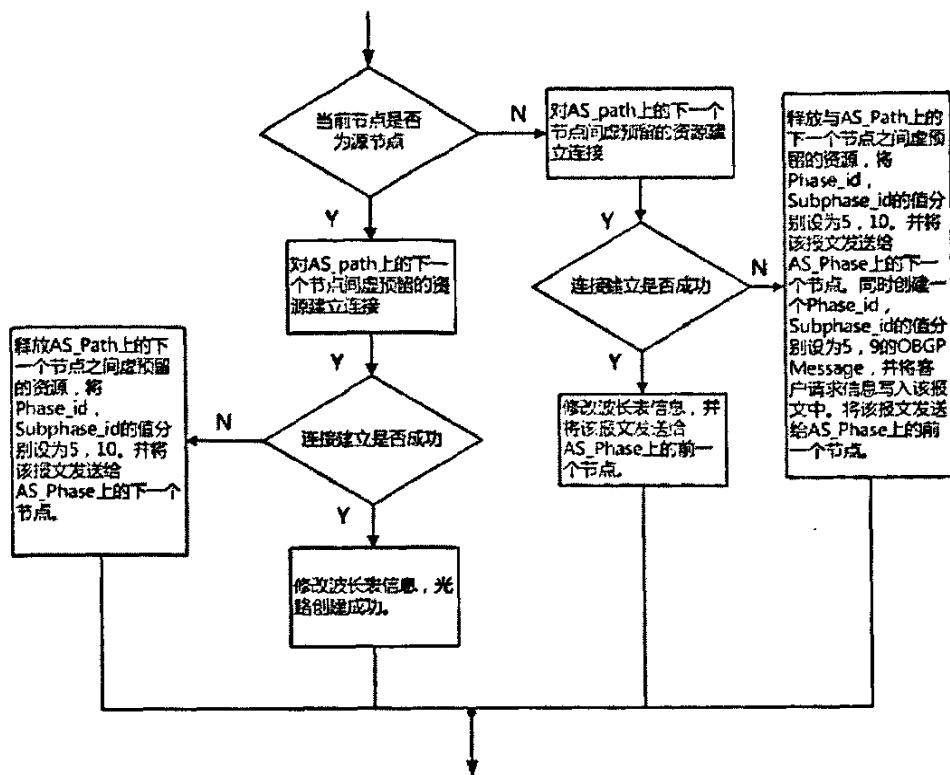
Diffserv-aware OBGP 两步法工作模式的具体算法如下：



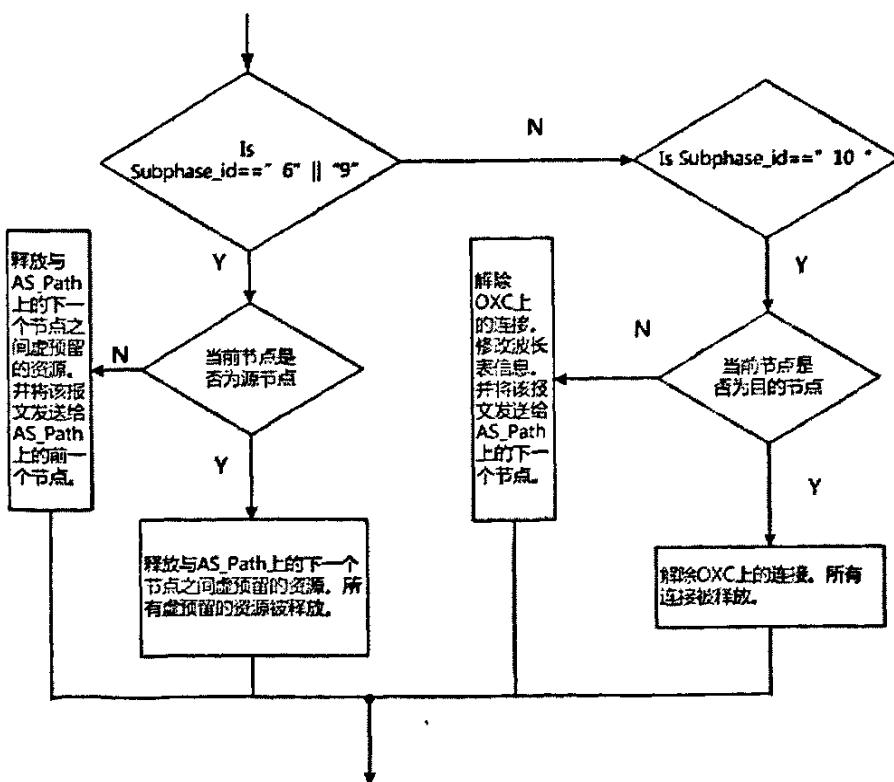
G 模块的具体算法如下：



H 模块的具体算法如下：



K 模块的具体算法如下：



3.3 两种工作模式的时间分析比较

在本小节中，我们将对分别使用两种工作模式创建 End-to-End Lightpath 的时间以及不同阶段出错后两者释放资源的时间进行分析比较。

3.3.1 两种工作模式建立 End-to-End Lightpath 的时间分析比较

我们先来分析使用 Diffserv-aware OBGP 四步法工作模式建立一条 End-to-End 的 Lightpath 所需要的时间，如图 3-9 所示。

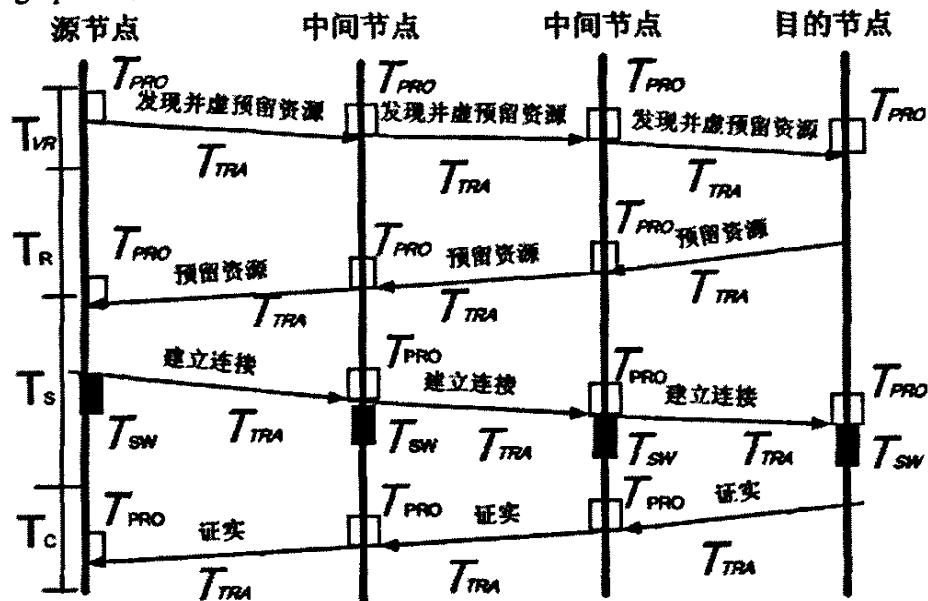


图 3-9 Diffserv-aware OBGP 四步法创建 Lightpath 的时间

Diffserv-aware OBGP 四步法工作模式建立 End-to-End 的 Lightpath 的时间由四个阶段花费的时间构成，分别是虚预留所有链路上的资源的时间 (T_{VR})，预留所有链路上的资源的时间 (T_R)，建立连接的时间 (T_S)，以及从目的节点返回的 Lightpath 建立成功证实的时间 (T_C)。这样，四步法工作模式建立 Lightpath 时间可以写成以下表达式：

$$T_{Four} = T_{VR} + T_R + T_S + T_C \quad (1)$$

另外，报文的传播时延，路由器的时延，以及通过接口对 OXC 的配置时间，分别用 T_{TRA} ， T_{PRO} 和 T_{SW} 来表示。（报文的传输时延在这里被忽略）假设包括源节点和目的节点，AS 路径上所经过的节点共有 N 个。

参考^[31]，每个阶段所花时间的表达式如下。

$$T_{VR} = N \times T_{PRO} + (N-1) \times T_{TRA} \quad (2)$$

$$T_R = (N-1) \times T_{PRO} + (N-1) \times T_{TRA} \quad (3)$$

$$T_s = (N-1) \times (T_{PRO} + T_{TRA}) + N \times T_{SW} \quad (4)$$

$$T_c = (N-1) \times (T_{PRO} + T_{TRA}) \quad (5)$$

将表达式(2), (3), (4), (5)分别代入表达式(1), 可以得到基于 Diffserv-aware OBGP 四步法工作模式建立 End-to-End Lightpath 所需要的时间。

我们再来讨论使用 Diffserv-aware OBGP 两步法的工作模式来建立一条 End-to-End 的 Lightpath 所需要的时间, 如图 3-10 所示。

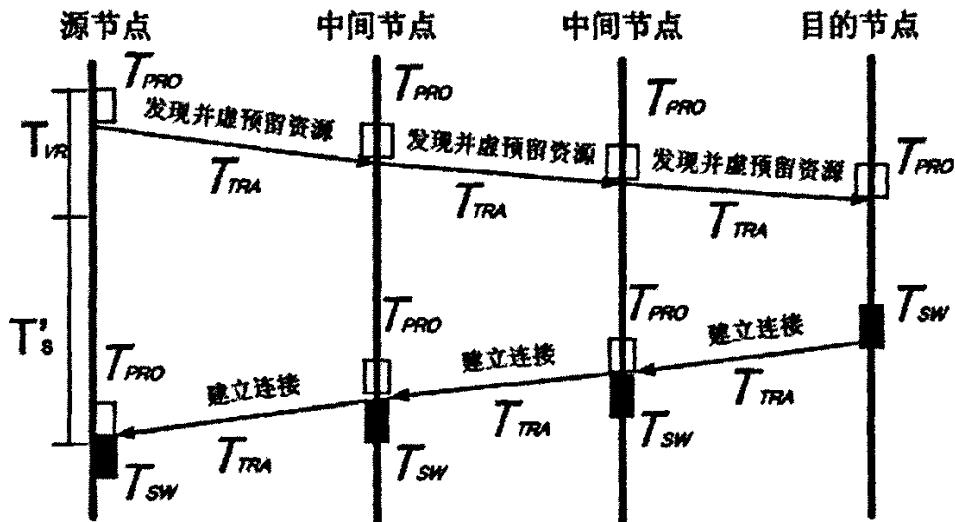


图 3-10 Diffserv-aware OBGP 两步法创建 Lightpath 的时间

Diffserv-aware OBGP 两步法工作模式建立 End-to-End 的 Lightpath 的时间由两个阶段所花的时间构成, 分别是虚预留所有链路上的资源的时间 (T_{VR}), 建立连接的时间 (T'_s)。

这样, 两步法工作模式建立 Lightpath 的时间可以写成以下表达式:

$$T_{two} = T_{VR} + T'_s \quad (6)$$

第一阶段所花时间 T_{VR} 的表达式同 (2), 第二阶段所花时间 T'_s 表达式同 (4), 只是路由器在对 OXC 建立连接之前, 先要检查虚预留的资源是否能够被当前的请求使用。将表达式 (1) 与表达式 (6) 相比较, 相比于四步法工作模式, 两步法创建一条 End-to-End Lightpath 的时间开销要少。

3.3.2 Lightpath 创建失败后两种工作模式释放资源的时间分析比较

接下来, 我们再比较当发生资源请求竞争, 请求失败的情况下, 两种工作模式分别释放资源的时间。

在发现与虚预留资源阶段发生错误的时候, 两种工作模式释放资源的时间相同。如图 3-11 所示。

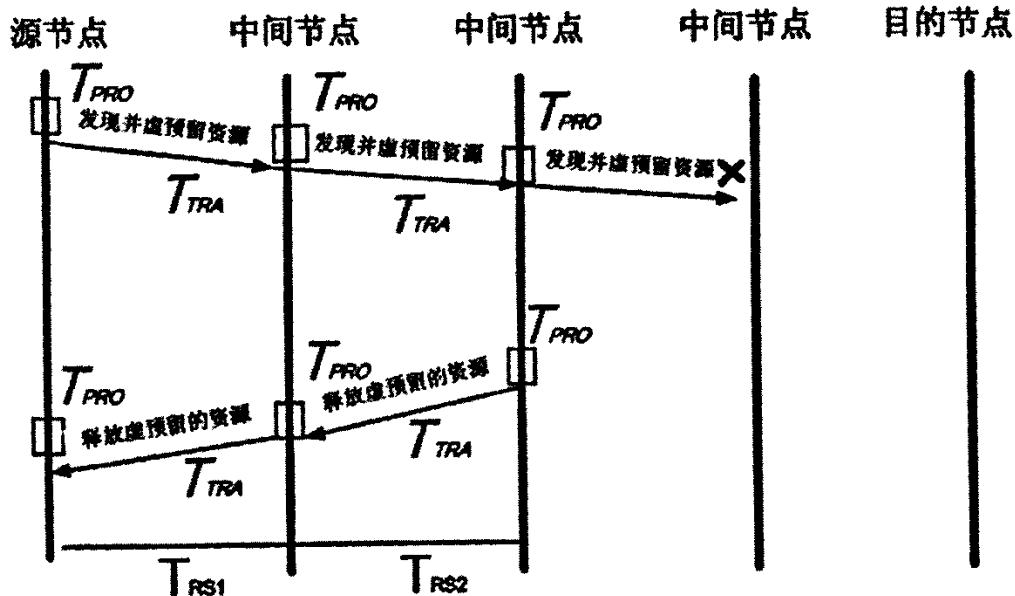


图 3-11 虚预留资源过程中出错释放资源的时间

每段链路上的资源释放时间用 T_{RS_m} 表示, 其中 $m=1, 2, \dots, N$ 。当第 n 个节点在资源发现与虚预留阶段中, 发现它与 AS 路径上的下一个节点之间此时没有可用的资源, 那么 Lightpath 创建失败, 需要释放从第 n 个节点到源节点之间链路上所有虚预留的波长资源。

从 n 节点接收到 OBGP 报文开始, 释放 n 节点与 $n-1$ 节点之间虚预留资源的时间 $T_{RS_{n-1}} = T_{PRO} + T_{TRA} + T_{PRO}$, 释放 $n-1$ 节点与 $n-2$ 节点之间虚预留的资源的时间 $T_{RS_{n-2}} = 3T_{PRO} + 2T_{TRA} \dots \dots$ 释放源与 AS 路径上的下一个节点之间虚预留资源的时间 $T_{RS_1} = (n-1) \times T_{TRA} + nT_{PRO}$ 。

在实际网络中, 执行 BGP 协议的高速路由器在吞吐量, 路由表能力, 时延, 时延抖动等指标方面都有严格要求。所以在资源发现与预留过程中出现错误后, 由于 T_{PRO} , T_{TRA} 值都很小, 能快速释放被虚预留的波长资源。当资源被释放后, 波长表中该波长所对应的该客户请求相关的信息全部被清除。该波长可以被当前最高优先级别的请求或者新到达的请求使用。

我们再来比较四步法和两步法工作模式在第二阶段发生错误时, 分别释放资源的时间。首先分析四步法工作模式在资源预留阶段出错后, 释放每段链路上资源的时间, 如图 3-12 所示。

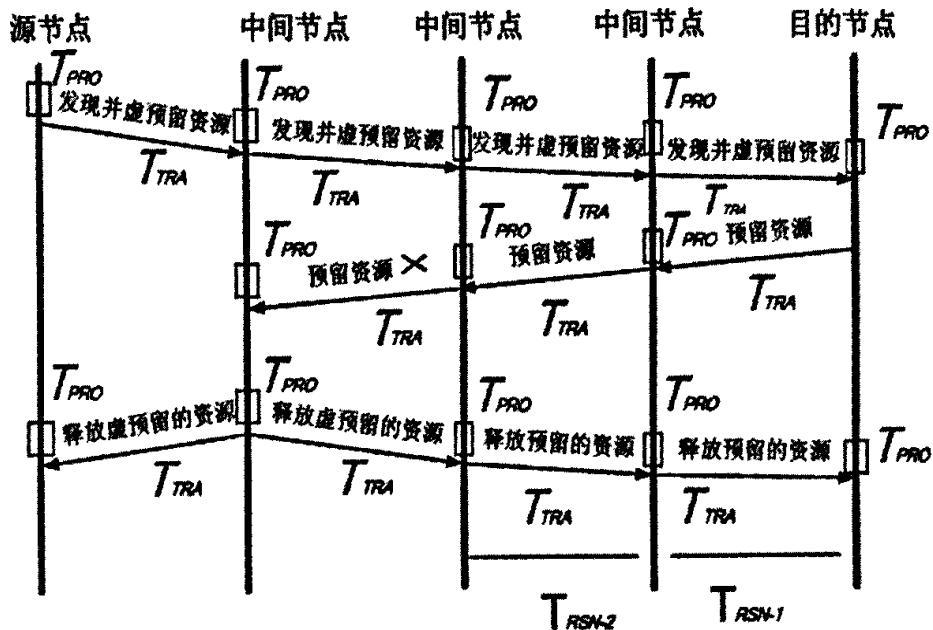


图 3-12 四步法资源预留过程中出错释放资源的时间

当第 n 个节点在资源预留阶段中，发现它与 AS 路径上的下一个节点之间虚预留的资源被抢占，而且当前没有其他空闲的资源和更低优先级请求虚预留的资源，Lightpath 创建失败，需要释放当前节点与 AS 路径上的下一个节点间虚预留的资源以及到目的节点之间链路上所有预留的波长资源，还需要释放从当前节点到源节点之间虚预留的波长资源。

两种工作模式释放从当前出错节点到源节点之间虚预留的资源的时间都相同。我们重点分析释放从当前出错节点到目的节点之间资源的时间。

从 n 节点接收到 OBGp 报文开始，释放节点 n 与 AS 路径上的下一个节点 $n+1$ 之间虚预留的资源的时间 $T_{RSN} = T_{PRO}$ ；释放 $n+1$ 节点与 $n+2$ 节点之间预留的资源的时间 $T_{RSN+1} = T_{PRO} + T_{TRA} + T_{PRO}$ ，释放目的节点与 AS 路径上的前一个节点之间预留的资源的时间 $T_{RSN-1} = (N - n - 1) \times T_{TRA} + (N - n)T_{PRO}$

由于 T_{TRA} ， T_{PRO} 值都很小，所以在资源预留过程中出现错误后，能快速释放波长资源。

我们再来分析两步法工作模式在 OXC 的连接建立过程中出错后，每段链路资源的释放时间，如图 3-13 所示。

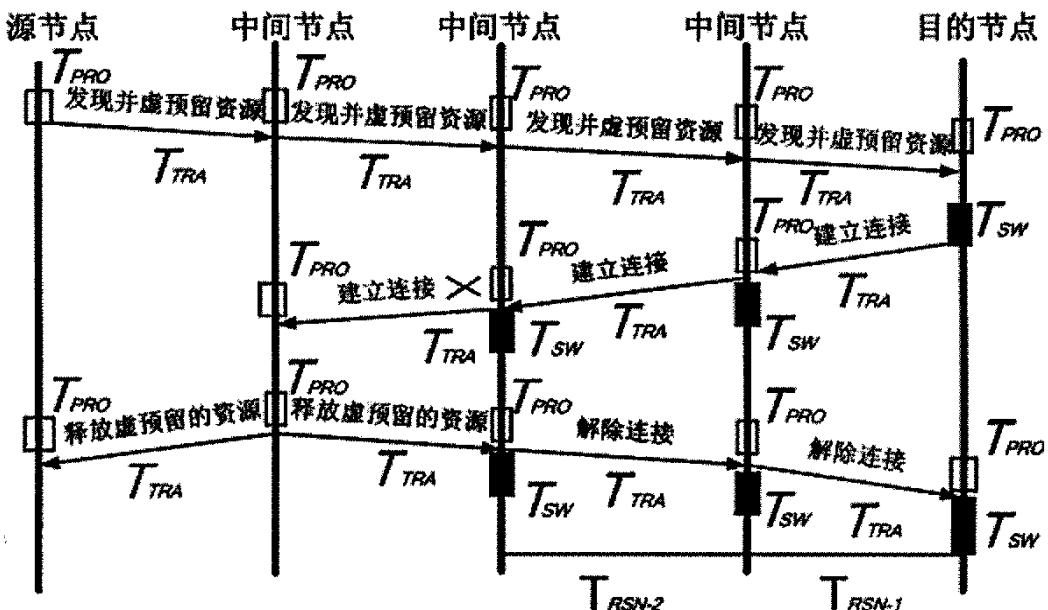


图 3-13 两步法建立连接过程中出错释放资源的时间

两步法在对 OXC 建立连接中，同四步法第二阶段的实质一样，当第 n 个节点发现它与 AS 路径上的下一个节点之间虚预留的资源被抢占，而且当前没有其他空闲的资源和更低优先级请求虚预留的资源，那么 Lightpath 创建失败，需要释放从当前节点到源节点之间虚预留的资源，还需要释放当前节点与 AS 路径上的下一个节点间虚预留的资源并解除到目的节点之间链路上所有 OXC 上的连接，波长状态属性修改为空闲，才能提供给其他请求使用。这里重点讨论后一种情况。解除已建立的连接，最快的处理办法是 Setup Error OBGP 报文一经路由器处理后。立即将该报文传送给 AS 路径上的下一个节点。报文发送后，再释放它所控制的 OXC 上的连接。

从 n 节点接收到 OBGP 报文开始，释放当前节点 n 与 $n+1$ 节点之间虚预留的资源的时间 $T_{RSn} = T_{PRO}$ ；释放节点 $n+1$ 与 AS 路径上的下一个节点 $n+2$ 之间资源的时间 $T_{RSn+1} = 2T_{PRO} + T_{TRA} + T_{SW}$ ；释放目的节点与 AS 路径上的上一个节点之间资源的时间 $T_{RSn-1} = (N - n) \times T_{PRO} + (N - n - 1) \times T_{TRA} + T_{SW}$ 。由于在实际的网络中，通过接口对 OXC 的配置时间 T_{SW} 通常是传播时延 T_{TRA} 的一个数量级，是路由器时延 T_{PRO} 的两个数量级^[31]。所以，两步法工作模式释放资源的时间同四步法相比较要大得多。

两步法工作模式建立连接过程失败的情况下，由于资源不能被迅速释放，所以当有新的请求到来时，如果当前又没有其它可用的资源，请求将被拒绝。在资源请求竞争比较严重的情况下，很多 Lightpath 创建请求因为虚预留的资源被其他请求占用，当前又没有其他可用资源，从而导致 Lightpath 创建失败。同时又不能快速释放

已经在 OXC 上建立的连接，以释放资源提供给其他新到达的请求使用，整体的 Lightpath 创建会受到影响。

对比两种工作模式建立 Lightpath 过程失败后对资源的释放时间，四步法的工作模式在各种阶段失败的情况下，都能快速释放资源，对整体的 Lightpath 创建影响小于两步法。所以，在资源请求竞争激烈的情况下，四步法的工作模式更为可行。

3.4 小结

本章讨论了在光网络环境下，基于 OBGP 为客户提供 End-to-End Lightpath 所面临的关键问题，提出了一种新的多域协同的 End-to-End 的 Lightpath 提供机制 DiffServ-aware OBGP 来加以解决。详细描述了 DiffServ-aware OBGP 四步法和两步法两种工作模式具体的算法和 Lightpath 创建过程。对分别使用这两种工作模式成功建立 End-to-End Lightpath 的时间，以及 Lightpath 创建失败后，对资源的释放时间进行了分析和讨论。

第四章 Diffserv-aware OBGP 仿真及性能评估

我们通过 OPNET10.0 网络仿真工具对提出的新机制 Diffserv-aware OBGP 的有效性进行仿真验证，并且对 Diffserv-aware OBGP 四步法和两步法这两种工作模式的性能进行仿真研究。

4.1 DiffServ-aware OBGP 的有效性

对 Diffserv-aware OBGP 机制的有效性进行仿真验证。搭建的网络仿真模型如图 4-1 所示。

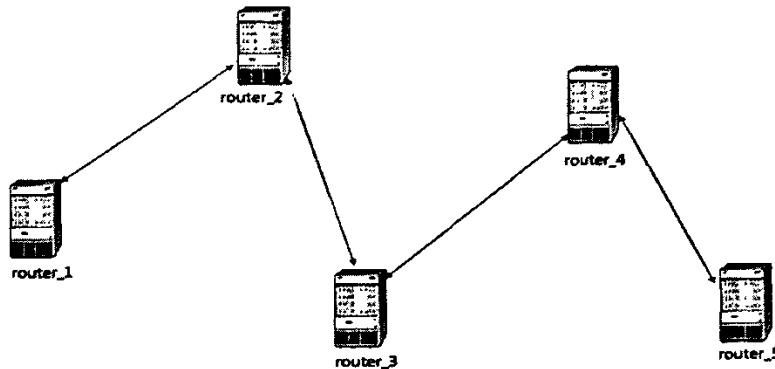


图 4-1 搭建的网络模型

假设网络中有 5 个自治域，每个自治域中有一个 OBGP 路由器，分别用节点 1、节点 2、节点 3、节点 4、节点 5 来表示。两个节点之间相距 200KM，两个节点之间报文的传播时延为 1ms (包括光纤的传输时延以及各段光纤之间中继器处理时延)。通过接口对 OXC 建立连接的时间为 10ms。每段链路中有 10 条可用波长。节点 1 上到达的请求需要通过节点 2，节点 3，节点 4 创建到节点 5 的 Lightpath，并且请求到达的时间服从 3req/sec 的泊松分布。客户请求优先级有三种 (优先级别从 2 到 0 依次降低)，并分别按照 1: 2: 3 的业务强度到达。假设这三种请求都能接入到其他各节点中，并且优先级别在各个客户列表中保持一致。Lightpath 保持时间服从 $1/\mu$ ($\mu=1$) 秒的负指数分布。仿真中假设对 OXC 连接建立不会出错。

分别采用不对客户请求进行区分的传统的 OBGP 四步法的思想，以及本文提出的 Diffserv-aware OBGP 四步法的 Lightpath 创建机制来创建客户请求所需要的 End-to-End 的 Lightpath。传统 OBGP 的仿真网络模型和上面的假设条件一样，由

没有对客户请求进行区分，所以只是请求到达的时间服从 3req/sec 的泊松分布，没有到达业务强度的划分。对两种机制成功创建 End-to-End Lightpath 的平均时延以及 Lightpath 创建成功率进行比较。

一旦源节点接收到关于该客户请求的 OBGP 证实报文，表明该客户创建 End-to-End Lightpath 的请求成功。成功创建 End-to-End Lightpath 的平均时延 (Mean_Delay) 的定义如下：

$$Mean_Delay = \sum_{i=1}^{Success_Traffic_Nums} Delay_i / Success_Traffic_Nums$$

其中 $Delay_i$ 表示某个请求成功创建 Lightpath 所花的时间。它的定义如下：

$$Delay_i = Confirmation_Time_i - Arrival_Time_i$$

其中 $Confirmation_Time_i$ 表示节点 1 接收到标志该请求成功的 OBGP 证实报文的时间，发出该请求的客户可以立即使用这条新创建的 Lightpath。 $Arrival_Time_i$ 表示节点 1 上该客户请求到达的时间。

传统 OBGP 四步法机制成功创建 End-to-End Lightpath 的平均时延以及 Diffserv-aware OBGP 四步法机制成功创建 End-to-End Lightpath 的平均时延分别如图 4-2(a)和图 4-2(b)所示。图中横坐标表示仿真所用的时间，纵坐标表示成功创建 End-to-End Lightpath 的平均时延。

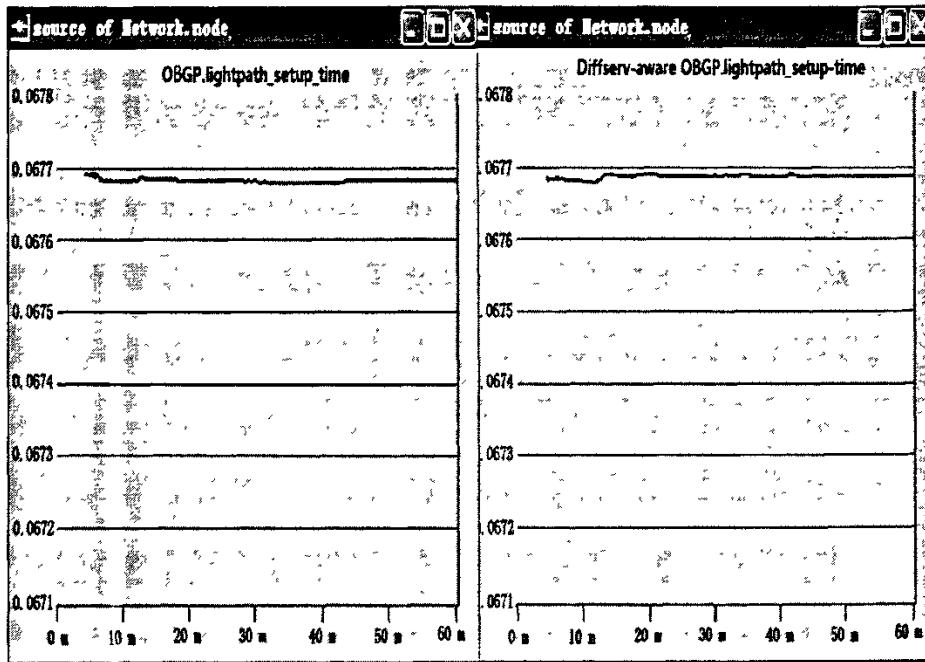


图 4-2(a)传统 OBGP 创建 Lightpath 的时间 图 4-2(b)Diffserv-aware OBGP 创建 Lightpath 的时间
由图 4-2(a)和图 4-2(b)可以看出，两种机制成功创建 End-to-End Lightpath 的平

均时延都接近 67.7ms。Diffserv-aware OBGP 机制同传统的 OBGP 机制相比较，并没有增加建立 Lightpath 的时间开销。分析原因在于，两种机制创建 Lightpath 的算法差异主要体现在第一和第二阶段。使用传统的 OBGP 四步法思想建立 End-to-End 的 Lightpath 时，由于没有对客户请求进行分类，所以在资源发现过程中，每个 OBGP 路由器只是查看波长表，以确定当前是否有可用资源，并不需要将客户的相关请求信息登记到波长表中。在资源发现过程中，两种机制的实质都是对资源进行确定预留。有所区别的是，传统的 OBGP 机制是对空闲资源进行确定预留，而 Diffserv-aware OBGP 机制是对虚预留的或者空闲资源或者抢占的虚预留的资源进行确定预留。由于路由器的处理速度很快，最终这些差异在时间上的体现并不明显。

我们再分别对 End-to-End Lightpath 创建成功率进行考察。

Lightpath 创建成功率 *Success_Probability* 的定义如下：

$$\text{Success_Probability} = \text{Confirmation_Request_Nums} / \text{Total_Request_Nums}$$

其中，*Confirmation_Request_Nums* 表示仿真时间内，接收到的标志 Lightpath 创建成功的 OBGP 证实报文的总数目。*Total_Request_Nums* 表示仿真时间内，发出的 Lightpath 建立请求的总数目。

传统的 OBGP 机制下，发出的建立 End-to-End Lightpath 的请求报文数目和接收到的表示 Lightpath 创建成功的证实报文的数目如图 4-3 所示。该图的上半部分表示在仿真时间内，节点 1 上发出的 Lightpath 建立请求的数目。下半部分表示在仿真时间内，节点 1 上接收到的表明 Lightpath 创建成功的 OBGP 证实报文的数目。

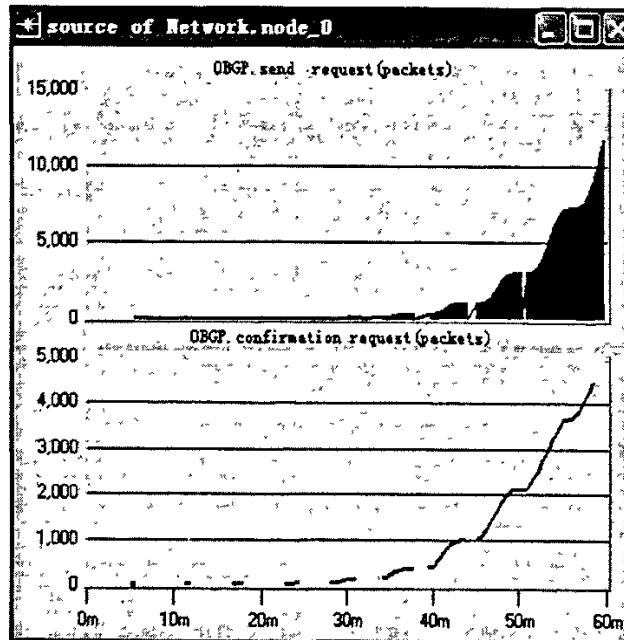


图 4-3 基于传统 OBGP 建立 Lightpath 的情况

从图中可以看出，从第五分钟开始，就有 Lightpath 请求出现，但是请求数目不

多，而且资源当前均处于空闲状态，所以到仿真的前三十分钟时间里，几乎所有请求都能成功创建所需的 Lightpath，从第三十分钟到仿真结束，这段时间请求到达比较集中，对资源的竞争也最为激烈。Lightpath 创建失败的原因主要有两种，一是在资源发现过程中，发现该链路上已经没有可用的空闲资源。二是在资源预留过程中，发现该链路上所有的空闲资源已经被先到达的请求占用。由于没有对客户请求进行区分，当有空闲资源的时候，到达较早的请求对资源的竞争有明显的优势。由于资源有限，在整个仿真时间里，共有 11552 个 Lightpath 创建请求，但最后只有 4525 个请求成功，Lightpath 创建成功率只有 39% 左右。

节点 1 上不同优先级客户请求基于 Diffserv-aware OBGP 发出的建立 End-to-End Lightpath 的请求报文的数目（图的上半部分）和接收到的 Lightpath 创建成功的证实报文的数目（图的下半部分）如图 4-4 所示。

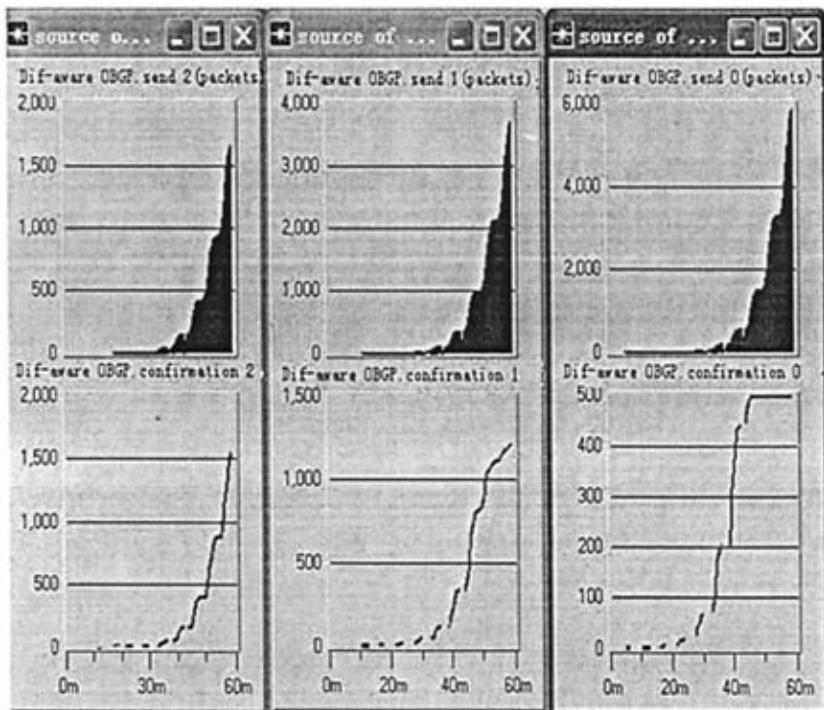


图 4-4 各优先级请求基于 Diffserv-aware OBGP 建立 Lightpath 的情况（从左到右依次为 2, 1, 0）

从图 4-4 可以看出，从仿真的第五分钟开始，优先级为 0 的请求开始试图创建 End-to-End 的 Lightpath，由于请求数目较少，此时每段链路上所有资源都处于空闲状态，而且没有其他优先级别的请求抢占资源，所以，都能在源节点收到 Lightpath 创建成功的 OBGP 证实报文。从第 10 分钟开始，优先级为 1 和 2 的 Lightpath 创建请求也开始出现，但是因为总的请求数目不多，所以相互之间的影响并不大。从三十分钟开始到仿真结束这段时间内，高优先级别的请求抢占资源的趋势比较明显。

在整个仿真时间内，优先级别为 2, 1, 0 的请求数目最后分别达到了 1650, 3540, 5800 个。

由于级别为 2 的请求优先级最高，它可以在最大程度上去抢占其他两个优先级请求虚预留的资源，最后有 1502 个请求成功地创建了所需的 Lightpath，Lightpath 创建成功率到达了 91%。而且从最后的趋势来看，它的斜率依然很陡峭，如果该优先级别的请求数目继续增加，依然能以较高的成功率创建 Lightpath。

优先级为 1 的请求由于优先等级处于中间，它只能在最大程度上去抢占优先级为 0 的请求虚预留的资源，从最后的趋势来看，如果该级别的请求数目继续增加，接收到的证实报文的数目依然会增加，但是增长速度较为缓慢。在整个仿真时间里，最后有 1345 个请求成功，Lightpath 创建成功率在 38%。

级别为 0 的请求处于最低优先级，在资源抢占方面没有优势，虚预留的资源很容易被高优先级的请求抢占。从约 45 分钟开始，由于资源请求竞争激烈，不能创建客户所需的 Lightpath。在整个仿真时间里，只有 500 个请求成功，Lightpath 创建成功率只有 10%。

总体来看，高优先级请求的 End-to-End Lightpath 创建始终都保持在较高成功率（成功率在 90% 以上），中优先级请求的成功率与使用传统的 OBGP 机制创建 Lightpath 的成功率持平（两者只相差一个百分比），低优先级请求的成功率比较低（只有 10%）。三种不同优先级别的 Lightpath 创建成功率之间的差距被显著地拉开。

为了考察在 Lightpath 请求数目不断增大的情况下两种机制的有效性。对请求到达的时间分别服从 $\lambda req / sec$, $\lambda = 3, 15, 30, 45, 60$ 的泊松分布，使用 Diffserv-aware OBGP 机制三种优先级别的 Lightpath 创建成功率和平均 Lightpath 创建成功率，以及使用传统 OBGP 机制创建 End-to-End Lightpath 的成功率进行仿真比较。统计结果如下图所示。

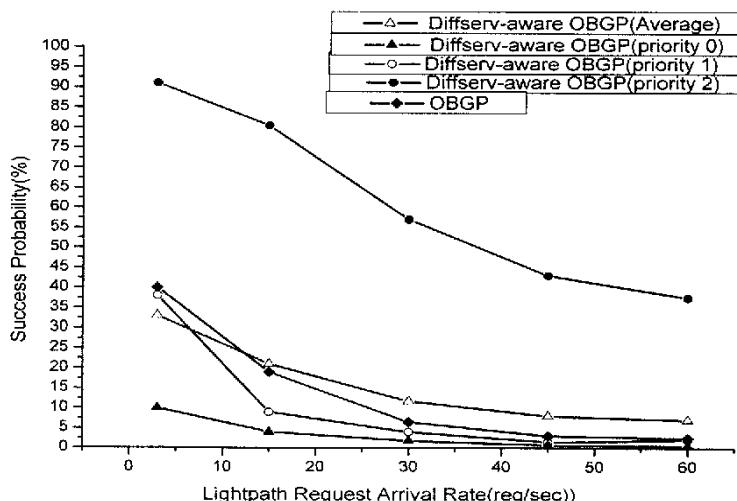


图 4-5 请求数目逐渐增加情况下的两种机制创建 Lightpath 的成功率比较

从图中可以看出，随着单位时间内的 Lightpath 请求数目不断增加，由于资源有限，两种机制创建 Lightpath 的成功率都在逐渐下降。当 $\lambda=3$ 时，DiffServ_aware OBGP 机制下的平均 Lightpath 创建成功率小于传统 BGP 机制创建 Lightpath 的成功率，但是随着资源请求竞争的加剧，DiffServ_aware OBGP 机制下的平均 Lightpath 创建成功率开始逐渐大于传统 BGP 机制创建 Lightpath 的成功率。从总体来看，与传统的 OBGP 相比较，DiffServ_aware OBGP 机制不仅提升了创建 End-to-End Lightpath 时的成功率，而且能够为不同优先级的客户请求提供区分服务，使不同优先级请求的 Lightpath 创建成功率明显地区分开来。DiffServ_aware OBGP 机制下的中优先级请求的成功率始终都比较贴近传统 BGP 机制创建 Lightpath 的成功率。而高优先级的请求成功率一直显著的大于其他两种级别的 Lightpath 创建成功率。这样的趋势表明使用 DiffServ_aware OBGP 机制创建 End-to-End 的 Lightpath，即使在资源紧张的情况下，每段链路上的资源都尽可能的分配给优先级别高的客户请求，提供区分服务来保证较高优先级客户的 Lightpath 创建请求能够保持在较高的成功率上，实现资源的有效分配。

4.2 DiffServ-aware OBGP 解决较远源的资源请求竞争问题

在实际的网络中，一个源节点向一个目的节点请求创建 End-to-End 的 Lightpath 时，请求的资源可能当前不会与其他源发来的请求相冲突，此时的资源竞争仅仅是同一个源的不同客户请求间的竞争；也有可能当前与其它源的 Lightpath 请求相冲突。此时的资源竞争包括不同源之间不同客户请求间的竞争。在这种情形下，传统的 Lightpath 创建机制并不能克服这种由于时延等客观因素造成的，地理位置相对较远的源的请求对资源争用处于劣势的情况。

为了验证 Diffserv-aware OBGP 是否能够解决较远源的资源请求竞争问题，在有多个源向同一节点发送 Lightpath 请求，并且请求需要占用相同波长资源的场景下，使用该机制创建 Lightpath 进行仿真验证。搭建的网络仿真模型如图 4-6 所示。

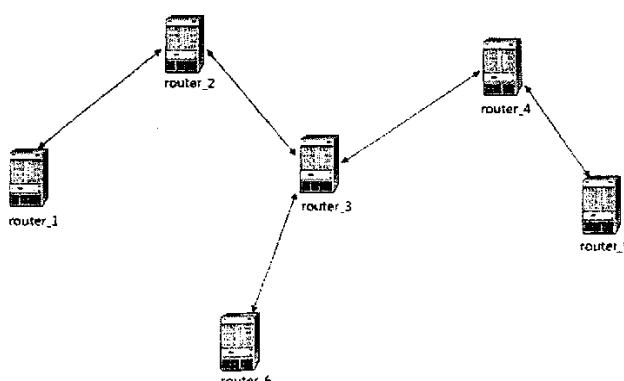


图 4-6 搭建的网络模型

在该场景中, 节点 1 上三种不同优先级别的请求需要通过节点 2, 节点 3, 节点 4 创建到达节点 5 的 Lightpath。同时, 节点 6 上也有三种不同优先级别的请求需要通过节点 3, 节点 4 创建到达节点 5 的 Lightpath。请求的优先级别均从 2 到 0 依次降低, 并都按照 1: 2: 3 的强度到达。请求到达的时间均服从 3req/sec 的泊松分布, 其他假设条件与第一种场景相同。可以看出, 此时节点 3 与节点 4, 节点 4 与节点 5 之间的资源竞争, 变成了两个源之间不同优先级别的请求之间的竞争。

我们分别采用传统的 OBGP 四步法以及 Diffserv-aware OBGP 四步法来创建 End-to-End 的 Lightpath, 并对两者的 Lightpath 创建成功率进行比较。

使用传统的 OBGP 建立 End-to-End Lightpath, 源 1 和源 6 发送的请求报文的数目 (虚线表示) 和接收到的标志 Lightpath 创建成功的证实报文的数目 (实线表示) 分别如图 4-7, 图 4-8 所示。

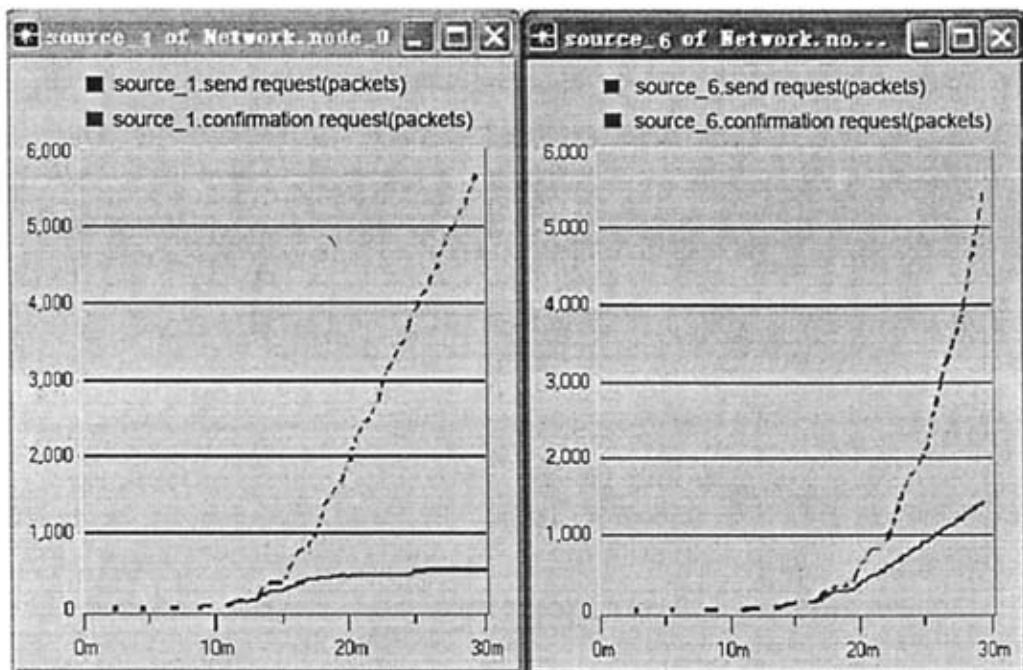


图 4-7 源 1 基于传统 OBGP 建立 Lightpath

图 4-8 源 6 基于传统 OBGP 建立 Lightpath

从仿真第二分钟起, 两个源开始发送建立 Lightpath 的请求。由于源 1 所处的地理位置和源 6 相比, 距所需争用的资源远一些, 所以当有空闲资源时, 源 6 的请求对资源的争用在时间上占有优势。从有请求产生到仿真的第十分钟的时间里, 因为两个源发出的请求数目很少, 而且当前资源都处于空闲状态, 所有请求都能成功地创建所需的 Lightpath。从第十分钟到第十五分钟的时间里, 源 1 发出的请求达到了 350 多个。源 6 发出的请求只有 100 个左右。从图中可以看出, 在这段时间内, 源 6

中实线与虚线几乎重合在一起, 表明接收到的 OBGP 证实报文的数目与发出请求的数目一致, 几乎所有请求都能成功创建 Lightpath。而源 1 中实线与虚线有所分离, 实际上只接收到约 228 个用于证实的 OBGP 报文。从第十五分钟到仿真结束, 对资源争用的情况比较严重。源 1 中实线从十五分钟后开始变得平滑, 表明证实报文数目的增长极为缓慢。到仿真结束为止, 源 1 共发出了 5550 个请求, 最后只有 440 个请求成功, 成功率在 8% 左右。而源 6 中实线从 17 分钟起与虚线有了分离, 随着请求数目的迅速增加, 证实报文的数目虽然与源 1 相比, 增长速度迅速一些, 但因为资源有限, 大多数请求依然不能得到满足。到仿真结束为止, 源 6 共发出了 5500 个请求, 最后只有 1375 个请求成功, 成功率在 25%。源 6 的成功率比源 1 高 17 个百分比左右, 是因为当有空闲资源时, 源 6 中的请求能先于源 1 的请求得到所需的资源。然而, 最终两个源请求的成功率都较低, 原因在于, 当资源数目一定而请求到达又比较集中的情况下, 资源请求竞争激烈, 先到达的请求对空闲资源的争用在时间上存在优势, 但是大多数请求在资源发现阶段和资源预留阶段都不容易成功发现或者预留所需要的资源, 最终导致 Lightpath 创建失败。

源 1 和源 6 的不同优先级客户请求基于 Diffserv-aware OBGP 建立 End-to-End Lightpath 的请求报文以及接收到的表示 Lightpath 创建成功的证实报文的数目分别如图 4-9, 图 4-10 所示。图中虚线表示在仿真时间内, 源发出的不同优先级别的 Lightpath 请求数目。实线表示仿真时间内, 不同优先级别请求成功创建 Lightpath 的数目。

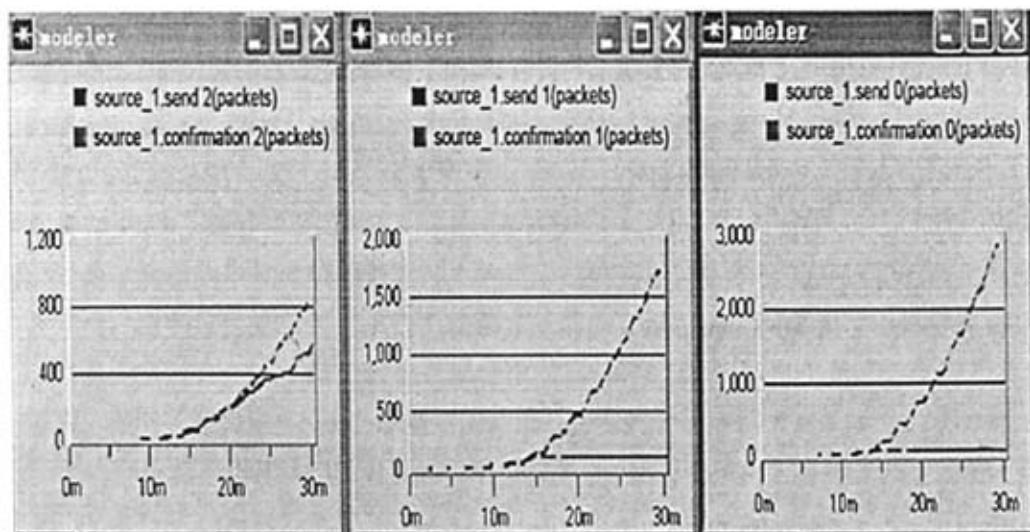


图 4-9 源 1 各优先级请求基于 Diffserv-aware OBGP 建立 Lightpath 的情况(从左到右优先级依次为 2, 1, 0)

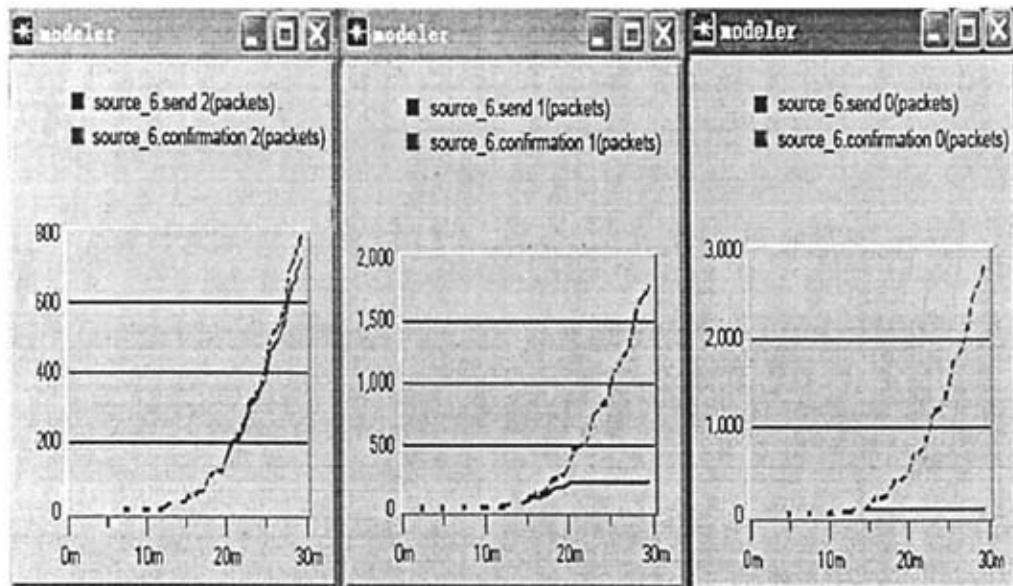


图 4-10 源 6 各优先级请求基于 Diffserv-aware OBGP 建立 Lightpath 的情况 (从左到右优先级依次为 2, 1, 0)

从图中可以看出, 从仿真开始到第十五分钟的时间里, 所有虚线和实线几乎都是重合在一起的。在这段时间里, 两个源都有不同优先级的请求产生, 因为请求数目很少, 而且当前资源又都处于空闲状态, 几乎所有请求都能成功创建所需要的 Lightpath。从 15 分钟开始到仿真结束, 这个时间区域所有级别的请求到达最为集中, 对资源抢占的表现也最为激烈。

在这段时间里, 两个源中最低优先级别的请求即 0 的请求结果显示, 实线都从第 15 分钟开始变得极为平滑, 不再向上延伸, 表明此时已不能建立该级别请求所需要的 Lightpath。最后, 源 1 共发出了 2850 个该级别的请求, 接收到的证实报文只有 65 个, 成功率只有 2.2%。源 6 共发出了 2827 个该级别的请求, 接收到的证实报文只有 59 个, 成功率为 2.1%, 两者相差不大。

源 1 发出的中优先级的请求即 1 的请求结果显示, 从 15 分钟开始实线也变得极为平滑, 表明该优先级的请求已不能创建所需的 Lightpath。而源 6 发出的中优先级的请求中实线在 15 到 20 分钟里依旧缓慢向上延伸, 直到第 20 分钟后才变得平滑。最后, 源 1 共发出了 1750 个该级别的请求, 接收到的证实报文有 134 个, 成功率约 7.7%。与传统 OBGP 建立 Lightpath 的成功率 8% 相差不大。源 6 共发出了 1800 个该级别的请求, 接收到的证实报文有 360 个, 成功率为 20%, 是源 1 该级别请求成功率的 2 倍多。

源 1 发出的高优先级的请求即 2 的请求结果显示, 从 15 分钟开始到仿真结束的时间里, 实线一直都在继续向上延伸, 表示在资源抢占激烈的情况下, 依然有大部份的请求能够得到满足。源 6 发出的该优先级的请求结果显示, 实线在整个仿真时

间里一直都在以较大的斜率向上延伸, 表明绝大多数请求都能建立所需的 Lightpath。最后, 源 1 共发出了 810 个该级别的请求, 接收到的证实报文有 407 个, 成功率达到 51%。与不对客户请求进行区分服务的传统 OBGP 相比, 成功率提高了四十多个百分比。源 6 共发出了 800 个该级别的请求, 接收到的证实报文有 730 个, 成功率达到 91%。

从得到的结果中, 我们首先进行横向的比较, 除了 0 优先级外, 两个源发出的同样优先级别的请求, 源 6 请求的成功率始终都大于源 1, 原因在于当有空闲资源可以被抢占的时候, 源 6 的地理位置相对源 1 来讲, 在时间上占有优势。纵向加以比较, 资源请求竞争不严重的情况下, 两个源发出的各种优先级别的请求都容易得到满足。一旦资源请求竞争激烈, 两个源的较低优先级的请求虚预留的资源, 容易被高优先级的请求抢占。这样, 即使地理位置相对较远的源发出的高优先级的请求, 依然能在一定程度上抢占各个源的其他低优先级请求虚预留的资源, 使成功率有了很大的改善 (源 1 使用传统的 OBGP 机制创建 Lightpath 的成功率只有 8%, 使用 DiffServ-aware OBGP 机制后, 高优先级请求创建 Lightpath 成功率到达了 51%, 增加了四十多个百分比)。可以看出, DiffServ-aware OBGP 在一定程度上克服地理位置相对较远的源的请求对资源争用的劣势。

4.3 DiffServ-aware OBGP 四步法和两步法工作模式的有效性比较

对 DiffServ-aware OBGP 两种工作模式的有效性进行比较。搭建的网络仿真模型如图 4-1 所示。分别使用四步法和两步法两种工作模式来创建客户所需要的 End-to-End 的 Lightpath。通过仿真比较随着 Lightpath 请求数目的增多, 对相同资源的竞争越来越激烈的情况下, 两种工作模式的有效性。仿真中的各种假设条件不变。四步法和两步法两种工作模式建立 End-to-End Lightpath 的平均时延如图 4-11 所示

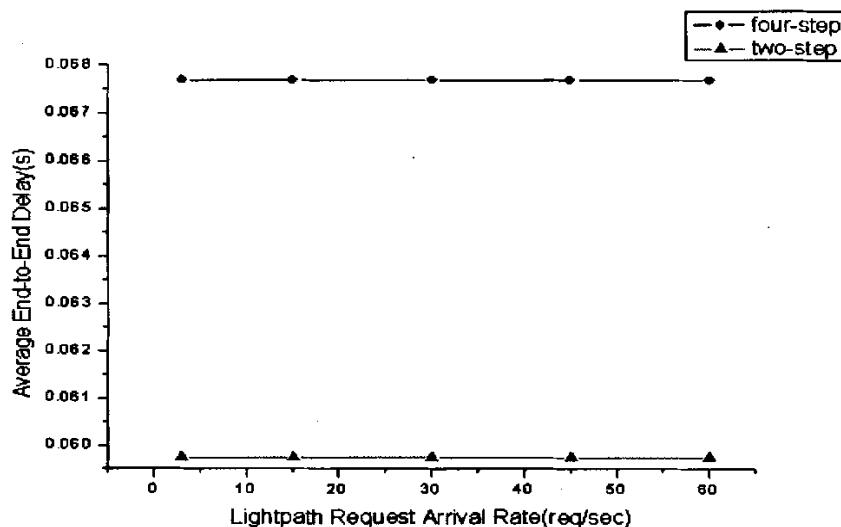


图 4-11 Diffserv_aware OBGP 四步法和两步法建立 Lightpath 的平均时延

建立从节点 1 到节点 5 的 End-to-End 的 Lightpath, 使用两步法工作模式所用的平均时间为 59.73ms, 四步法的平均时间为 67.68ms。两者相比较, 使用两步法工作模式能相对快速地创建 End-to-End 的 Lightpath。

使用四步法工作模式后, 三种优先级别请求建立 Lightpath 的成功率, 以及使用两步法工作模式后的三种优先级别请求建立 Lightpath 的成功率进行统计后, 分别如图 4-12, 4-13 所示。

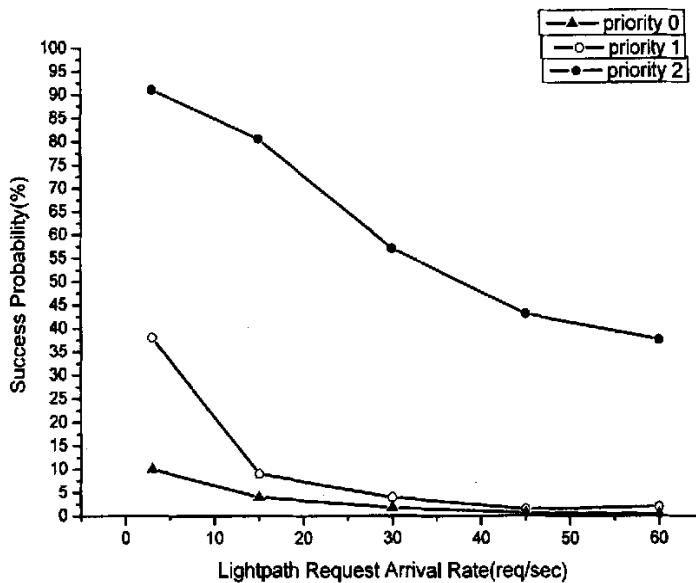


图 4-12 Diffserv_aware OBGP 四步法不同优先级别请求创建 Lightpath 的成功率

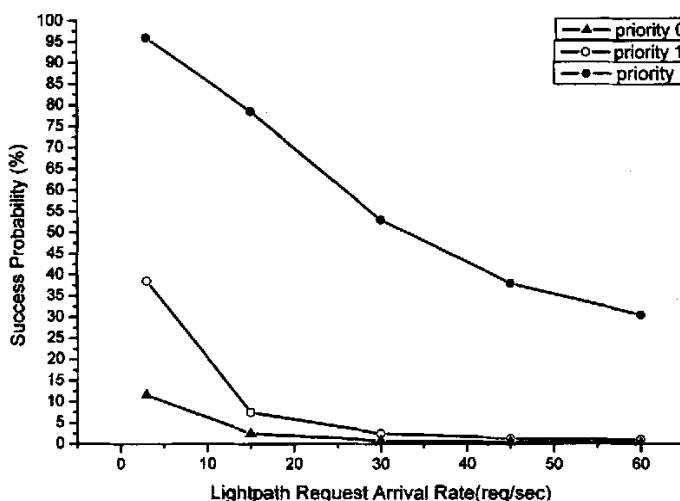


图 4-13 Diffserv_aware OBGP 两步法不同优先级别请求创建 Lightpath 的成功率

当 $\lambda=3$ 时, 两步法工作模式的高, 中, 低优先级请求成功率分别比四步法的高 5%, 0.5%, 1.5%, 原因在于, 两步法工作模式与四步法相比, 能更快速地创建一条 End-to-End 的 Lightpath。一旦 Lightpath 使用完毕后, Lightpath 上每段链路上的资源都能够被提前释放。资源被释放的时间越早, 越有利于更多新请求的使用。在相同的仿真时间里, 能够提高整体 Lightpath 创建请求的成功率。

然而随着 λ 的值不断增大, 资源请求竞争越来越激烈的情况下, 四步法工作模式的各个优先级请求的成功率与两步法相比, 二者之间的差距逐渐拉开 (尤其是高优先级别请求的成功率)。下图显示的是, $\lambda=15, 30, 45, 60$, 四步法工作模式的各优先级请求的成功率比两步法工作模式高出的百分比。

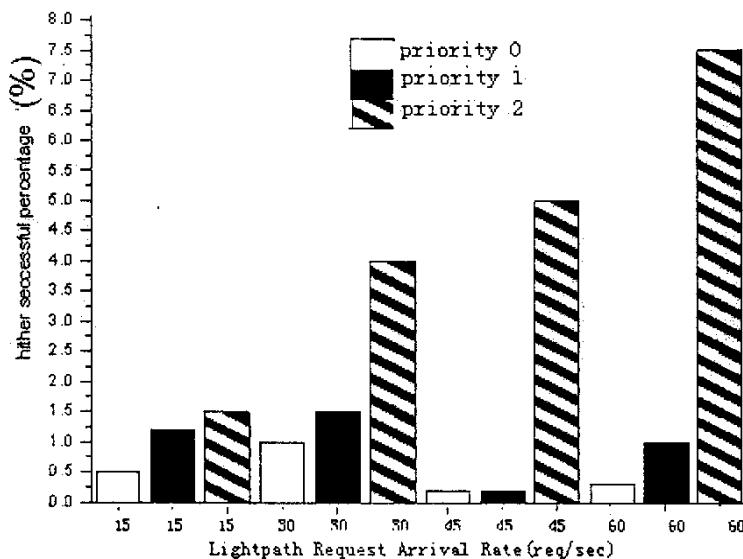


图 4-14 资源竞争逐渐增大情况下, 四步法各优先级请求成功率高出的百分比

随着 λ 的不断增大, 使用四步法工作模式, 中, 低优先级请求成功率比使用两步法高出的百分比的增长趋势不明显, 但高优先级请求高出的成功率的却依次从 1.5, 4, 5 最后增加到了 7 个百分比。

分析差距逐渐拉开的原因在于, 使用两步法的工作模式, 当资源发现与虚预留阶段完成后, 立即从目的节点向源节点依次建立连接, 如果此时资源请求发生冲突, 发现原先虚预留的资源已经被其他更高优先级的请求占用, 而当前该链路上也没有空闲资源或者优先级更低的请求虚预留的资源, Lightpath 创建失败, 需要逐一释放 OXC 上的连接。在相同的出错原因下, 两步法释放某段链路上的资源的时间是四步法所用时间的 10 倍以上。资源被释放得越慢, 越不利于新到达请求的使用。在资源请求竞争变得越来越激烈的情况下, 使用两步法工作模式创建 Lightpath 失败后, 释

放资源时间上的劣势在整体 Lightpath 创建请求成功率影响中所占的比重。将越来越大于使用该工作模式成功创建 Lightpath 后，释放资源时间上的优势。而四步法的工作模式在 Lightpath 创建失败的情况下，能够相对快速的释放该请求在各段链路上占用的资源，有利于新到达的请求对资源的使用，在相同的仿真时间里，有更多的请求能够使用所需要的资源。所以，在出现资源请求竞争激烈，容易发生资源抢占的情况下，四步法的工作模式更为可行。

4.4 小结

本章使用 OPNET 仿真工具对 DiffServ-aware OBGP 的有效性进行验证，仿真结果证明了，同传统的 OBGP 相比，DiffServ-aware OBGP 在 Lightpath 创建过程中能够根据客户请求的不同优先级别提供区分服务。当有资源请求竞争发生时，能更加有效地分配有限的资源。并且当多个源向同一目的节点发送请求而且请求需要占用部分相同波长资源时，DiffServ-aware OBGP 使地理位置相对较远源的高优先级的请求能够在一定程度上去抢占各个源的较低优先级请求虚预留的资源，从而有较高的 Lightpath 创建成功率。仿真还验证了在资源请求竞争越来越激烈的情况下，分别使用四步法工作模式和两步法工作模式创建 End-to-End Lightpath 的有效性，并对仿真结果进行了分析和讨论。

第五章 总结

5.1 本文的主要工作

随着如 GridFTP, SAN 等大容量数据传输业务量的不断增加, 为客户或者应用创建 End-to-End Lightpath 的需求量呈现出了快速增长的趋势。然而, 在目前使用 OBGP 为客户提供 End-to-End Lightpath 的机制中, 并没有对资源分配问题, 安全性问题, Lightpath 的保护与恢复等问题进行进一步探讨。本文针对多优先级请求环境中的资源分配问题, 在传统 OBGP 实现机制的基础上进一步扩展, 提出了一种新的多域协同的 End-to-End 的 Lightpath 提供机制—DiffServ-aware OBGP。

本文的主要工作如下:

介绍了在多域光网络下, 为客户或者应用提供跨域的 End-to-End Lightpath 的研究背景和发展动力。

讨论了使用 OBGP 作为多域光网络中 End-to-End Lightpath 的提供机制所必须具备的条件, 并对目前的 OBGP 实现机制进行了详细描述。

分析了在多域光网络环境下, 使用 OBGP 实现机制来创建跨域的 End-to-End 的 Lightpath 所面临的一些关键问题。定义了对传统 OBGP 协议中 OBGP 报文格式和波长表的基本扩展, 提出了一种新的多域协同的 End-to-End 的 Lightpath 提供机制—DiffServ-aware OBGP。通过接入控制和虚预留资源的方法为不同优先级的客户请求提供区分服务。当有资源请求竞争发生时, 能更加有效地分配有限的资源。详细描述了 DiffServ-aware OBGP 两种工作模式具体的算法和 Lightpath 创建过程。

使用 OPNET 仿真工具对 DiffServ-aware OBGP 的有效性进行验证, 仿真结果证明了, 一同传统的 OBGP 相比, DiffServ-aware OBGP 不仅能够为客户请求创建所需的 End-to-End 的 Lightpath, 而且能有效地分配资源, 在 Lightpath 创建过程中能够根据客户请求的不同优先级别来提供区分服务。二 DiffServ-aware OBGP 能在一定程度上解决地理位置相对较远的源的资源请求竞争问题。使较远的源的高优先级的请求能够在一定程度上去抢占各个源的较低优先级请求虚预留的资源, 从而有较高的 Lightpath 创建成功率。三在资源请求竞争激烈的情况下, 相比于 DiffServ-aware OBGP 两步法工作模式, DiffServ-aware OBGP 四步法工作模式下各优先级请求的 Lightpath 创建成功率更能得到保障。

5.2 未来工作展望

随着网络技术的不断发展以及用户对于网络资源需求的不断提高, 上层的网络服务提供商之间协商的内容将更加丰富, 从而使得每个 OBGP 路由器里保存的客户列表里的内容将越来越丰富。在这样的情况下, DiffServ-aware OBGP 如何使每个自治域根据客户列表的内容更加有效的分配资源, 是需要进一步研究的问题。

本文提出的 DiffServ-aware OBGP 机制是建立在所有 OBGP 路由器都是具有波长转换能力的 OXC 的基础上的。如何将 DiffServ-aware OBGP 用于在有转换能力的 OXC 和没有转换能力的 OXC 同时存在的网络环境下, 以及 Lightpath 创建的安全性^[32] 和对可用波长的最优选择算法问题是我们下一步研究工作的重点内容。

致 谢

首先我要感谢我的导师隆克平教授，三年硕士研究生学习期间，隆教授在学习上和生活上都给予了我极大的关怀和帮助。隆教授学识渊博,治学严谨，对学生的认真负责态度以及对科研事业执着的追求，是未来工作学习中我永远努力的方向。借此向导师致以衷心的感谢和崇高的敬意

我还要特别感谢我们的课题组指导老师阳小龙教授，阳教授敏锐的思维和广博的学识，严谨的治学态度是我一直以来所敬仰的。尤其是刚刚进入课题组时，阳教授给我的鼓励让我至今都铭刻在心，很庆幸自己在研究生学习阶段能够遇到如此优秀并且关心学生的老师。在此谨向尊敬的阳老师致以衷心的感谢。

感谢陈前斌教授，陈老师严谨踏实的治学态度，无私奉献的敬业精神以及对学生的关心都为我树立了良好的学习典范，指引着我今后前进的方向。

感谢黄胜老师对我的论文的精心指导和热忱帮助，黄老师踏实的科研作风，认真的工作态度都是我今后学习的榜样。还要感谢项目组里一起工作学习的同学：感谢已经毕业的程平，张昳等师兄，感谢你们曾经对我的指导和帮助。感谢古峰同学在仿真实验中的支持和帮助。感谢王建设，王飞等同学，遇到难题时和他们的讨论总是能够给予我灵感，感谢刘惠卿，张珂，李培江，余仲寒等，能和你们一起在实验室工作学习是很幸运和愉快的事情，感谢魏征，对仿真方面问题的认真解答。感谢好友许潇潇，你乐观的生活态度让我学会了迎头面对困难和挑战。

此外，我要感谢重庆光互联网及无线信息网络研究中心的所有老师和工作人员，是他们创造了如此优秀的学习科研环境，又在我读研期间给予了我无私的帮助，衷心的感谢他们！

最后，我要感谢我的亲人，感谢我的父母多年来对我的无私的关爱和支持，是我能够全心投入学习，顺利完成学业的动力和保障。

参考文献

- [1] S. Dixit, Editor, "IP over WDM: Building the Next Generation Optical Internet," John Wiley & Sons, Ltd., New Jersey, 2003.
- [2] N.Ghani, et al. "On IP-over-WDM intergration"[J]. IEEE commun. Mag., 2000, 38(3), 72-82.
- [3] Raouf Boutaba, Wojciech M. Golab, Youssef Iraqi, et al. Grid-Controlled Lightpaths for High Performance Grid Applications [J]. Journal of Grid Computing, 2003,1(4):387-394
- [4] G. Bernstein, et al., "Some comments on GMPLS and optical technologies", Network Working Group, November 2000
- [5] 智能光网络-体系结构, 协议和标准, 人民邮电出版社, 2007 年 1 月, pp: 10-20
- [6] DWDM 技术原理与应用, 电子工业出版社, 2004 年 1 月, pp:14-25
- [7] B.St-Arnaud, et.al., "User controlled Lightpath Definition Document", http://www.canarie.ca/canet4/library/c4design/user_controlled_definition.ppt, Dec. 2002
- [8] Y. Rekhter, et al., "A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)", Work in Progress, draft-ietf-idr-bgp4-12.txt, Jan 2001
- [9] B. St.Arnaud, et al., "Optical BGP Networks Discussion Paper", Revised Draft, July, 2000
- [10] T. C. Bressoud et al., "Optimal Configuration for BGP Route Selection," Proc. IEEE INFOCOM 2003
- [11] Bernstein G, Cheng D, Pendarakis D, et al. Domain to Domain routing using GMPLS OSPF Extension V1.1 (Draft). OIF2002.23.06, July 2002
- [12] Ong L, Bernstein G, Cheng D, et al. Hierarchical Routing using GMPLS-OSPF (Draft). OIF2002.023.08, January 2003
- [13] L. Wang, H. Zhang, X. Zheng, et al. "A Novel OBGP-based Mechanism for Lightpath Establishment in WDM Mesh Networks," in Proceedings of European Conference on Optical Communication, Academic, Rimini, Italy, We4.P.136, vol. 3, pp. 828-829,2003
- [14] M. Francisco, et al, "Inter domain routing in optical networks", in Opticomm 2001, J. Bannister, J. Senior and J. Touch, Eds., Proceedings of SPIE Vol.4599, pp. 120-129 August 2001

- [15] Rekhter Y, et al., RFC 4271, A Border Gateway Protocol4(BGP-4)[S].2006. 1 pp;7-8
- [16] Runze. Wu et al, "A peer-to-peer Resource Scheduling Approach for Photonic Grid Network Based on OBGP" Proceedings of SPIE Vol.6022,602231,2005
- [17] Canadian Network for the Advancement of Research, Industry and Education. CA*net 4 Project [EB/OL]. (2002-10-1). [2006-5-20]. <http://www.canarie.ca/canet4/>.
- [18] M. Blanchet, F. Parent, B. St-Arnaud, "optical bgp(OBGP):inter AS Lightpath provisioning",http://www.canarie.ca/canet4/obgp/obgp_ietf.doc., Mar. 2001
- [19] R. Chandra, J. Scudder, "Capabilities Advertisement with BGP-4" RFC 2842, May 2000
- [20] G. Cristallo and C. Jacquet, "The BGP QoS_NLRI Attribute," IETF Internet draft, draft-jacquet-bgp-qos-00.txt, work in progress., Feb. 2004
- [21] Bates, T., et al., "Multiprotocol Extensions for BGP4", RFC 2858, June 2000
- [22] Ramachandra, Tappan, "BGP Extended Communities Attribute", Work in progress, draft-ramachandra-bgp-ext-communities-08.txt, February 2000
- [23] Francisco, M.J et al, "End-to-End signaling and routing for optical IP networks" Volume 5, 28 April-2 Page(s):2870 - 2875 vol.5 , May 2002
- [24] H. Shai, "Understanding Policy-Based Networking", John Wiley & Sons Inc.,2000.
- [25] J. Yates, et.al, "Wavelength converters dynamically-reconfigurable WDM networks", IEEE Communication Surveys, 1999.
- [26] J. Fang, R. Srinivasan, and A.K. Soman, "Performance analysis of WDM optical networks with wavelength usage constraint" in the Sixth WorkingConference on Optical Networks Design and Modelling, February 2002
- [27] Dimitra Simeonidou, et.al. Optical Network Infrastructure for Grid. [EB/OL]. (2003-09-10). [2005-05-20]. Informational Track. Grid High Performance Networking Research Group. <http://forge.gridforum.org/projects/ghpn-rg/>
- [28] 张汉一等, 一种基于 OBGP 协议的光网络域间路由的新型机制, 电子学报, 2004 年第 5 期, Vol 32, No.5
- [29] P. Pongpaibool and H. S. Kim, "Providing End-to-End Service Level Agreements Across Multiple ISP Networks," Comp. Net., vol. 46, pp. 3-18., 2004
- [30] Truong, D.L.; Cherkaoui, O ,et.al,"A Policy-based approach for User controlled Lightpath Provisioning" IEEE/IFIP Volume 1, Page(s):859 - 872 Vol.119-23, April 2004
- [31] Lei Wang , et.al. "Reducing the OBGP Protection Switching Time in WDM Mesh Networks", Optical Fiber Communication .March 2006

Gommans, L Dijkstra, F de Laat, et al. Applications Drive Secure Lightpath Creation across Heterogeneous Domains [J]. IEEE Commun. Mag. 2006, 44(3).100-106.

附录

攻读硕士学位期间从事的科研工作及取得的研究成果

1. 从事的主要科研工作

- 2005.6—2006.9 国家高技术研究发展计划（863 计划）项目“动态灵活光网络体系结构与关键技术研究”（项目编号：2005AA122310）。
- 2004 年 10 月至 2005 年 6 月：国家自然科学基金“网络与信息安全”重大研究计划项目“IP Diffserv over OBS 网络的系统结构及关键算法研究”（项目编号 903040004）

2. 已发表和录用的论文

- Jia Li, Keping Long, Xiaolong Yang, Zheng Gu, DiffServ-awareOBGP :A New Inter-domain End-to-End Lightpath Setup Scheme. Proc. of SPIE APOC 2006. Setp.2006 (EI 检索号：065210332828)
- 李佳, 隆克平, 阳小龙, 古峥, DiffServ-awareOBGP-一种新的域间 End-to-End Lightpath 创建机制。中国电子科学研究院学报 2006.12