

## 分光节点的鲁棒配置算法

李俊艳 王晟 王雄

(电子科技大学宽带光纤传输和通信技术重点实验室 成都 610054)

**摘要:** 该文针对动态变化的业务请求,提出了分光节点的鲁棒配置算法,解决全光网络中光多播时分光节点最优配置问题。文中的测试验证了,利用这种鲁棒算法配置分光节点,与静态算法相比可以使资源的消耗在各种业务请求情况下都相对较优,稳定性好,总的资源消耗少,更符合实际。

**关键词:** 光网络多播; 分光节点; 鲁棒配置

中图分类号: TN915.63

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)12-3005-04

## Robust Strategy for Splitter Nodes Placement

Li Jun-yan Wang Sheng Wang Xiong

(Key Lab of Broad-band Optical Fiber Transmission and Communication Networks University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** In this paper, with uncertain demands, a robust optimization strategy is proposed to optimally solve the splitter placement problem for multicast in all-optical networks. The test in the paper shows that using robust strategy, the resource provisioning of each scenario is closer to the optimal resource consumption, more robust, less resource consumption and more practically than the static solution.

**Key words:** Multicast in all-optical networks; Splitter nodes; Robust strategy for placement

### 1 引言

近年来,随着IP over WDM(Wavelength Division Multiplexing)技术的迅速发展,光放大器、分光器和波长转换器光器件的成熟,在光网络中直接进行多播传输已经成为可能。这种全光的多播方式突破了传统IP多播需要进行光电转换的瓶颈,很大的提升了信息传输的速率,使得用户可以更好的使用类似于视频会议和在线直播这些多播服务。

多播是一点对多点的传输方式,信息从源节点出发经过中间节点被复制多份,然后发往各个目的节点。由于整个多播的传播路径类似于于一棵树,因此多播的路由结构通常称为多播树<sup>[1,2]</sup>。

光层的多播借助分光器,把一束光分成多束,直接在光层上实现光复制<sup>[1,2]</sup>。光网络中被配置了分光器的节点叫做分光节点。由于大功率光放大器的价格昂贵等原因<sup>[3]</sup>,把光网络中的每个节点都配置成分光节点是不现实的。而且在文献[3]中证明了,最多配置一半节点数的分光节点就可以完成多播任务。因此,本文研究的就是在给定分光节点数目的情况下,从全网优化的角度将这些分光节点最优的配置到网络中,使得整个网络的资源消耗量最小<sup>[3,4]</sup>。

目前,分光节点最优配置的研究<sup>[3,4]</sup>,都是在业务请求不变的前提下求解的,但实际网络的业务请求是动态变化的。如果我们只针对一种业务请求状况进行最优配置的话,业务请求发生变化时,会造成很大的浪费。本文的仿真实例也验证了这点。本文所讨论的业务请求变化并不是毫无规律的,而是经过长期的观察可预测的。

对于业务请求动态变化的情况,本文采用线性规划和鲁棒优化理论<sup>[5,6]</sup>来求解分光节点配置问题。面对业务请求的动态变化,分光节点最优配置的目标是得到一个多播时消耗资源少且鲁棒性好的分光节点配置方案。鲁棒的分光节点配置方案不追求特定业务请求下的最佳,而是所有的业务请求下的相对最佳,资源使用的变化稳定。某个配置方案的鲁棒性优劣是通过后悔度来衡量的。利用后悔度来评价鲁棒性的方法有很多,比较常用的是最小最大后悔度<sup>[5]</sup>和最小后悔度<sup>[5]</sup>。本文采用的是最小后悔度的方法,这种方法把由参数变化而引起的目标函数值变化量都表示在一个表达式当中,这个表达式称为后悔度函数,使得这个表达式值最小的方案就是鲁棒性最好的方案。在文献[5]中,类似的鲁棒优化方法被应用到了光网络的路由设计当中。

本文提出的分光节点鲁棒配置算法,是以后悔度最小为目标,多播和分光节点个数限制为约束的数学规划模型。求解这个数学规划模型就可以得到一个在各种情况下都有较少的资源消耗,同时稳定性好的分光节点配置方案。

本文后续内容的安排如下:第2节对分光节点的鲁棒配

2007-06-05 收到, 2008-01-17 改回

国家自然科学基金(90604002, 60472008), 新世纪优秀人才支持计划(05-0807), 国家 973 计划项目(2007CB307104 of 2007CB307100) 和国家 863 计划项目(2007AA01Z242)资助课题

置算法的数学模型进行了描述,第3节利用实例进行了数值计算,并结合数值结果讨论了该算法的优、缺点,最后一节是全文总结。

## 2 分光节点的鲁棒配置算法

### 2.1 问题的描述

本文是在已知了网络的拓扑结构、可预测的业务请求状况和网络中最多可以提供的分光节点个数的情况下,来求解如何配置分光节点可以使得在进行光多播时使用的网络资源少且稳定的问题。本文采用鲁棒算法求解,模型的目标函数是后悔度最小。光多播是在源节点和多个目的节点间建立多播树的方式。

变化的业务请求是用概率不同的几个场景(scenario)来表示的,每个场景表示的是一种业务请求的可能性。同时一种场景中又包含多个业务请求源、目的对,一个源、目的对叫做一个会话(session)。例如一个10节点的网络,有两个场景,分别是场景1和场景2,它们出现的概率分别是0.2,0.8。第1个场景又包含两对源、目的对请求,分别是源节点1发出的到目的节点3,节点4,节点5的一个多播业务请求(会话1)和从源节点5发出的到目的节点2,节点7,节点8的多播业务请求(会话2)。会话1和会话2是同时出现的,它们一起组成了场景1,以0.2概率的可能性出现。

由于分光节点的个数有限,在目的节点处我们采用了tap技术<sup>[3]</sup>。同时由于在光多播时存在波长连续性的要求,我们假设可以无限制地使用波长转换器,不考虑波长不可变的情况。

### 2.2 数学模型

符号的含义:

**参数:**  $C_{m,n}$  为网络中两节点( $m,n$ )之间的代价,若两点之间无连接,该值则为一很大的常数  $M$ 。 $N_{m,n}$  为网络中两节点( $m,n$ )之间的连接关系,如果为1,表示两点之间有链路,如果为0,表示两点之间没有链路, $m=n$ 时, $N_{m,n}=0$ 。 $CO_b$  为表示第  $b$  种场景的权重、优先级,整数。 $PO_b$  为表示第  $b$  种场景出现的可能性。 $W$  为表示每条链路上最大的波分复用数。 $Number\_splitter$  为最多可以提供的分光节点数。 $L_{b,y,k}$  为第  $b$  种场景中的第  $y$  个会话中的源、目的节点的分布情况, $L_{b,y,k}=2$ ,表示在第  $b$  种场景的第  $y$  个会话中  $k$  是源节点; $L_{b,y,k}=1$ ,表示在第  $b$  种场景的第  $y$  个会话中  $k$  是目的节点; $L_{b,y,k}=0$ ,表示在第  $b$  种场景的第  $y$  个会话中  $k$  是中间节点。

**变量:**  $F_{b,y}^{m,n}$  为( $m,n$ )链路在  $b$  种场景的第  $y$  个会话中经过的通路数目,正整数。 $T_{b,y}^{m,n}$  为( $m,n$ )链路在第  $b$  种场景的第  $y$  个会话中是否被占用。占用=1,没有占用=0。 $WC_b^{m,n}$  为( $m,n$ )链路在第  $b$  种场景中使用的波长数目。 $SN_n$  为只考虑中间节点分光的情况时, $n$  这个节点是否为分光节点,布尔变量。 $SD_n$  为只考虑目的节点分光的情况时,

$n$  这个节点是否为分光节点,布尔变量。 $CN_n$  为  $CN_n=1$  表示  $n$  这个节点是分光节点, $CN_n=0$  表示这个节点不是分光节点, $CN_n$  是  $SN_n$  和  $SD_n$  取逻辑“或”后的结果。

数学模型的建立,第1步要建立的是对分光节点个数没有限制和没有鲁棒性要求的基本多播模型,不考虑分光节点个数和场景变化的约束,目标是得到一个资源消耗最少的多播方案。式(1)就是这个线性规划的目标函数,表示的是完成多播请求所使用的资源消耗最少。这里的目标函数表达式是对任意的场景  $b$  而言的。

$$\forall b: \min \sum_{m,n} C_{m,n} \times WC_b^{m,n} \quad (1)$$

式(2)~式(11)是线性规划的约束条件,是对多播的限制。多播限制是以多播树的形式表现出来:式(2)是网络结构对多播的限制,式(3)~式(5)是多播流量守恒的体现,式(6)~式(11)是对每条链路中最多可以复用的波长数的限制。

$$\forall b, m, n: \sum_y (F_{b,y}^{m,n} + T_{b,y}^{m,n}) \leq M \times N_{m,n} \quad (2)$$

$$\forall b, y, s, L_{b,y,s} = 2: \sum_k F_{b,y}^{s,k} = \left( \sum_k L_{b,y,k} \right) - 2 \quad (3)$$

$$\forall b, y, s, L_{b,y,s} = 2: \sum_k F_{b,y}^{k,s} = 0 \quad (4)$$

$$\forall b, y, m, L_{b,y,m} \neq 2: \sum_k F_{b,y}^{k,m} = \left( \sum_k F_{b,y}^{m,k} \right) + L_{b,y,m} \quad (5)$$

$$\forall b, y, m, n: F_{b,y}^{m,n} \geq T_{b,y}^{m,n} \quad (6)$$

$$\forall b, y, m, n: F_{b,y}^{m,n} \leq M \times T_{b,y}^{m,n} \quad (7)$$

$$\forall b, y, m, n: T_{b,y}^{m,n} + T_{b,y}^{n,m} \leq 1 \quad (8)$$

$$\forall b, y, m: \sum_n T_{b,y}^{n,m} \leq 1 \quad (9)$$

$$\forall b, m, n: WC_b^{m,n} = \sum_y (T_{b,y}^{m,n} + T_{b,y}^{n,m}) \quad (10)$$

$$\forall b, m, n: WC_b^{m,n} \leq W \quad (11)$$

第2步要建立的是分光节点个数受限和满足资源消耗鲁棒性要求的鲁棒模型。在上面的基本多播模型上进行添加和修改就可以形成本文提出的鲁棒模型。鲁棒模型同样要满足上面的多播要求,不过要增加分光节点个数的限制和鲁棒性要求。鲁棒模型是以后悔度最小为目标,多播和分光节点个数限制为约束的数学规划。

后悔度  $\rho$ <sup>[5]</sup> 要通过后悔函数来表示,是各种场景下资源消耗变化量的平方和,这里的变化量是相对资源消耗,指的是目前资源消耗量与最优资源消耗量之间的差,见式(12a)。后悔度越小说明每种场景下资源消耗都越接近最优资源消耗,相对资源量变化越小。

$$\rho = \sum_{b=1}^G CO_b \times PO_b \times Cost1_b^2 \quad (12a)$$

其中  $CO_b$  表示的是场景  $b$  的重要性、权重, $PO_b$  表示的是场景  $b$  出现的可能性, $Cost1_b$  是一个变量,表示场景  $b$  下的相对资源消耗。约束条件式(13)是对  $Cost1_b$  含义的解释,其中  $Mi_b$  是在分光节点受限的情况下,每种场景下的最少资源消

耗。

使后悔度最小就形成了鲁棒模型的目标函数(见下式(12b))。后悔度最小不仅可以使得每种业务情况下资源消耗都较小,而且可以使得相对资源消耗量的变化较小:

$$\min \sum_{b=1}^C CO_b \times PO_b \times CostL_b^2 \quad (12b)$$

约束条件式(13)对 CostL<sub>b</sub> 进行限制,式(14)~式(22)是对分光节点个数的约束。

$$\forall b: Mi_b + CostL_b = \sum_{m,n} C_{b,m,n} \times WC_{b,m,n} \quad (13)$$

$$\forall n: MSN_n = \sum_{b,y:L[b,y,n]=1,L[b,y,n]=2} \left( \sum_m T_{b,y}^{n,m} - \sum_m T_{b,y}^{m,n} \right) \quad (14)$$

$$\forall n: SN_n \leq MSN_n \quad (15)$$

$$\forall n: M \times SN_n \geq MSN_n \quad (16)$$

$$\forall b,y,n,L[b,y,n]=1: 2 \times MSD_{b,y,n} \leq \sum_m T_{b,y}^{n,m} \quad (17)$$

$$\forall b,y,n,L[b,y,n]=1: M \times MSD_{b,y,n} \geq \sum_m T_{b,y}^{n,m} - 1 \quad (18)$$

$$\forall n: SD_n = \sum_{b,y:L[b,y,n]=1} MSD_{b,y,n} \quad (19)$$

$$\forall n: CN_n \leq SN_n + SD_n \quad (20)$$

$$\forall n: M \times CN_n \geq SN_n + SD_n \quad (21)$$

$$\sum_n CN_n \leq \text{Number\_splitter} \quad (22)$$

这样以式(12b)为目标函数,式(2)~式(22)为约束条件求解数学规划,就可以得到一个在每种场景下都较优,资源消耗稳定,后悔度低的分光节点鲁棒配置方案。文中的模型没有加入多播保护路的约束,在实际的计算过程中我们也有在线性模型中加入链路保护的约束。

### 3 实例的计算结果

本节中我们使用鲁棒配置算法求解了一个实际光网络的分光节点最优配置问题,利用这个实例的计算结果,对静态配置算法和本文提出的鲁棒配置算法的性能进行了对比。本文使用的网络拓扑是 NSF 的 14 点图<sup>[5]</sup>(图 1)。业务请求是通过计算机生成,随机生成了 3 个场景,场景有各自的权重和出现概率。每个场景中随机生成 4 个会话,每个会话里包含 1 个源节点到 6 个目的节点的多播请求,每条光纤的波分复用数是 5。由于用计算机求解二次目标规划速度较慢,这里采用了折线近似代替曲线的方法求解线性规划<sup>[5,6]</sup>,把式(12b)表示成 4 段折线的形式,然后进行求解。利用 AMPL 语言求解线性规划时有针对这种折线的表达方式。

本文使用 AMPL 语言和 CPLEX10.0 软件在计算机上对

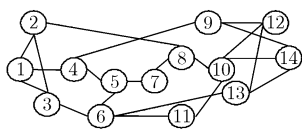


图 1 NSF 14 点图

实例进行求解,计算机的主频是 1.81GHz,内存是 1GB。由于利用线性规划求解分光节点配置耗时较长,在有限的时间内得到准确值比较困难,本文得到的解是在运算时间大于 48h 以后取得的。

表 1,表 2 是分光节点个数限制最多是 4 个时的算法性能比较,表 1 表示的是在各种场景下不考虑其他场景的影响得到的最优分光节点配置,最优资源使用量和各场景出现的可能性和权重;表 2 表示的是多播请求在场景 1 到场景 3 之间变化时,分别使用静态配置方案和鲁棒配置方案后各个场景的相对资源使用量和后悔度大小,方案 1 是只考虑场景 1 得到的最优分光节点分布,方案 2,方案 3 依次是只考虑场景 2,场景 3 得到方案。

这里要说明的是在表 2 中,虽然场景 2 的最优分光节点个数为 3,但为了与其它方案比较时增加公平性,这里又增加了 1 个分光节点给此方案。

表 1 NSF14 点图,各种场景自身性能

	场景 1	场景 2	场景 3
资源使用	56200	55600	57000
分光节点	5,8,9,13	5,9,12	2,6,9,13
场景概率	0.33	0.33	0.33
场景权重	1	1	1

表 2 NSF14 点图,静态及鲁棒方案的性能比较

分光节点的分 配方案	分光节 点分布	场景 1 相对资 源使用	场景 2 相对资 源使用	场景 3 相对资 源使用	后悔度
方案 1	5,8,9,13	0	600	1400	9.24e+05
方案 2	2,5,9,12	1200	0	400	6.6e+05
方案 3	2,6,9,13	1600	2400	0	2.904e+06
使用鲁 棒算法	2,8,9,12	200	200	400	2.64e+05

从表 1,表 2 的性能比较中可以看到如果一直使用一种场景下的最优分光节点配置的话,虽然在一种场景下可以达到最优,但在其他场景下资源使用量就会很大,见表 2 中前 3 个方案的性能。使用鲁棒配置算法计算得到的分光节点配置方案综合考虑了各种场景,使得该方案在各种场景下的资源消耗都接近最优资源消耗,整体的资源消耗较小。

本文还测试了权重和场景出现概率对鲁棒配置算法的影响。通过对结果的分析得出:场景的重要性和概率越小,鲁棒配置算法对该场景的考虑越少,这样的配置方案更加适应实际网络。

更重要的是采用鲁棒配置算法配置分光节点可以在多播请求发生变化时,相对资源的消耗量比较稳定(见图 2)。

与其他3个静态方案相比鲁棒算法的后悔度最小,所以最稳定。图2是表2中各算法稳定性的比较,静态方案1,静态方案2,静态方案3分别对应表2中的3个方案,横坐标表示的是场景的编号,纵坐标表示在场景中使用各种算法时的相对资源消耗量。

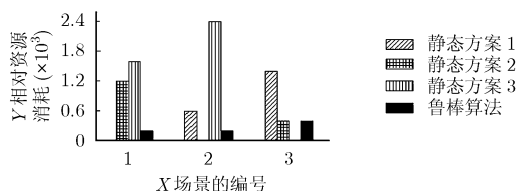


图2 各方案的稳定性比较

此外我们还对10个点,24个点的网络进行了测试都取得了类似的效果。在10个点的网络上计算多播路径时还加入了保护路的约束,也取得了同样的效果。由此可见鲁棒配置算法是可以解决动态网络状况下分光节点的最优配置问题的。

#### 4 结束语

本文提出的分光节点鲁棒配置算法,综合考虑了各种业务请求状况,得到的分光节点配置方案在各种网络请求下都有较少的资源消耗。本算法与静态方案相比稳定性好,综合资源消耗少,符合实际的网络状况。文中的实例也充分地验证了本算法的优势。同时这种鲁棒配置算法同样也适用于波长转换器,光缓存等一些光器件在业务量动态变化情况下的优化配置问题。

不过利用线性规划求解分光节点配置问题的缺点是耗时较长,因此启发式算法将是我们未来的研究方向之一。

#### 参考文献

- [1] Hsieh Cheng-yu and Liao Wan-jiun. All optical multicast routing in sparse-splitting optical networks. *IEEE LCN'03*, 2003, 41(1): 89-113.
- [2] Zhang Xijun, Wei John Y, and Qiao Chunming. Constrained multicast routing in WDM networks with sparse light splitting. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(12): 1917-1927.
- [3] Ali Maher and Deogun Jitender. Allocation of splitting nodes in all-optical wavelength-routed networks. *Photonic Network Communications*, 2000, 2(3): 247-265.
- [4] Yan Shuguang, Ali M, and Deogun Jitender. Route optimization of multicast sessions in sparse light-splitting optical networks. *GLOBECOM '01*, Nov. 2001, 4: 2134-2138.
- [5] Kennington J, Olinick E, Lewis K, Ortynski A, and Spiride G. Robust solutions for the DWDM routing and provisioning problem: models and algorithms. *Optical Networks Magazine*, 2003, 4(2): 74-84.
- [6] Pióro M and Medhi D. *Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2004: 124-140.

李俊艳: 女, 1983年生, 硕士生, 研究方向为光通信网络。

王 晟: 男, 1971年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光通信网络。

王 雄: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为光通信网络。