

多域光网络基于多核点共享树的多点对多点组播

秦攀科 陈 雪 王 磊 王立芊

北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 针对多域光网络环境下传统的多点对多点(MP2MP)组播路由和波长分配(RWA)算法未考虑最优化组播域序列选择的问题,以及所导致的网络资源占用量过高和难以满足实时业务服务质量(QoS)要求的问题,提出了一种面向多域光网络、计算可并行化、基于时延和最小代价约束的多核点共享树RWA启发式算法(MSTDC)。该算法通过构造虚拓扑的方式将多域的问题转化到单域中求解,从而实现了多核点共享树最小化核心点的个数及其所在域的准确计算。在多域间并行地将源和目的节点按照特定的QoS选择策略和算法加入到不同的共享树中。仿真验证了在网络节点数为50个且均匀地分布在9个域内的多域光网络环境下,MSTDC算法与传统组播树算法相比波长资源占用率降低可达51.1%,路由成功率提高可达24.8%,算法执行时间降低可达64.6%。

关键词 光通信;多域光网络;多点对多点;路由和波长分配;多核点共享树;服务质量保证

中图分类号 TN915.63

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0506001

Multi-Core Shared Tree Based Multipoint to Multipoint Multicast in Multi-Domain Optical Networks

Qin Panke Chen Xue Wang Lei Wang Liqian

State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract In order to solve the problems of the optimal domains sequence choice without considering, overhigh resources occupied ratio and the unappeasable requirements of real-time quality of service (QoS), which cannot be settled by the conventional multipoint to multipoint (MP2MP) routing and wavelength assignment (RWA) algorithms in multi-domain optical networks, a kind of multi-core node shared tree RWA heuristic algorithm (MSTDC) is proposed. The calculation can be parallelized. The delay and minimal cost can be constrained for multi-domain optical networks. The multi-domain problem is transformed into single domain by the algorithm from constructing a virtual topology. So it can realize the accurate calculation of number and the hosted domains of the mininlized cores. The source and destination nodes are added in different shared trees with delay constrained algorithms according to specific QoS selection strategy, respectively. The performance of the algorithm is demonstrated in a multi-domain optical networks topology with fifty routing nodes uniformly distributed in nine domains, and the simulation results show that the wavelength occupied ratio descends 51.1%, the success ratio of the route ascends 24.8% and running time of the algorithm descends 64.6%.

Key words optical communications; multi-domain optical networks; multipoint to multipoint; routing and wavelength assignment; multi-core shared tree; quality of service

OCIS codes 060.2330; 060.4251; 060.4256; 060.4510

1 引言

随着云计算和网格计算等此类高带宽消耗业务的发展,以及远程教育、视频会议和网络虚拟社区等涉

收稿日期: 2014-11-25; 收到修改稿日期: 2014-12-23

基金项目: 国家863计划(2012AA011303)、信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学)

作者简介: 秦攀科(1982—),男,博士研究生,主要从事光网络技术等方面的研究。E-mail: qinpanke@bupt.edu.cn

导师简介: 陈雪(1959—),女,教授,主要从事大容量光通信系统与网络和宽带接入等方面的研究。

E-mail: xuechen@bupt.edu.cn

及多方通信的实时应用的普及^[1-2],基于多服务质量保证(QoS)约束的多点对多点(MP2MP)组播问题在高速光网络中日益受到人们的重视^[3-5]。MP2MP组播与传统组播的不同之处在于其源节点和目的节点都有多个。而传统的组播源节点只有一个,目的节点有多个。光网络中基于QoS约束的MP2MP组播问题的核心是为MP2MP组播设计最优化的路由和波长分配(RWA)方案,使得所有源节点可以在满足一定QoS约束的条件下能够准确地将数据发送到所有目的节点,并尽量减少光网络波长和链路等资源的占用^[4]。

光网络中MP2MP组播问题的传统解决方案是将MP2MP组播转化为多个点到点的单播(LP)或点到多点的组播(LF)^[6-9]。然而,这样会导致MP2MP组播存在占用网络资源过多、传输效率低和组播路由计算耗时过长的问题。文献[10-12]提出了基于共享树的MP2MP组播的解决方案,即基于一定的选择策略选择网络中的一个节点为共享树的核心点,并将所有源节点和目的节点按照特定的路由算法加入到以核心点为中心点的组播树中,使得所有的节点共享同一个组播树的资源。所有的源节点首先将数据发送到核心点,然后核心点再转发给所有的目的节点。从而通过降低组播树的构造数量,达到了减少光网络资源占用的目的。然而,构造单核点共享树往往难以满足业务中多种不同的QoS约束。文献[13]提出了建立多核点共享树的策略,每棵共享树覆盖所有的源节点和部分目的节点。为了达到满足业务QoS约束要求的同时最小化网络资源的占用的目的,需要尽量减少共享树构建数量,即要求共享树核心点的数量尽量地最小化^[14-15]。基于QoS和最小代价约束的多核点共享树问题,已经被证明为多项式复杂程度的不确定性(NP)完全问题,无法在多项式时间内得到该问题的最优解。因此,相关研究也对应地提出了一系列的启发式算法用于该问题的近似最优解的求解,例如:Salama等^[15]提出基于时延和最小代价约束的贪婪(GREED)和最大时延最小化(MinMaxD)等算法。

随着光网络向着大规模和广覆盖的方向发展,为了提高光网络控制管理的灵活性和效率,采用分域结构的方法成为实现大规模可扩展光网络的必然趋势^[16]。多域光网络环境下的MP2MP组播需要建立跨越多个域的共享组播树。由于不同域之间网络拓扑信息是未知的,从而使得基于QoS约束的MP2MP组播问题变的更加复杂。在构造组播树时不仅要考虑满足业务QoS和网络资源最小代价的约束,还需要考虑域序列的问题。不仅要考虑核心点的个数,还需要考虑核心点所属域的问题。由此可知,多域光网络中共享树构建问题的研究可以分为四部分:共享树经过的域序列的选择、核心点所在域的定位及选择、路由选择和波长分配。然而,前述的研究背景大都是单域的网络环境,所提的启发式算法均未考虑多域网络环境下MP2MP组播树构建过程的问题。因此,无法实现多域光网络环境下最优共享组播树的建立。

本文与前述研究最主要的区别在于,研究切入点是多域光网络环境下的MP2MP组播问题。针对多域网络环境引入的最优化域序列、最小化核心点的数量和核心点所属域的问题,提出了一种面向实时业务、基于时延和最小代价约束的多核点共享树启发式算法(MSTDC)。该算法通过构造虚拓扑的方式将多域的问题转化到单域中求解,从而实现了多核点共享树的域序列、最小化核心点的个数及其所在的域的准确计算。然后将源节点和目的节点按照特定QoS选择策略分别通过基于时延约束的Dijkstra算法和最小生成树算法加入到不同的共享树中。

2 问题描述

多域光网络通过有向图 $G=(V, E)$ 表示,其中 V 是节点的集合, E 是链路的集合。假设网络中的链路都是双向的,网络被划分为多个域 $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ 。每个域包含若干个节点 $\{\{v_1^1, \dots, v_x^1\}, \{v_1^2, \dots, v_y^2\}, \dots, \{v_1^n, \dots, v_z^n\}\}$,不同的域之间通过网关节点相连。定义 $E_{m,n}$ 为链路标识,若节点 m 和 n 之间存在链路则 $E_{m,n} = 1$; 否则 $E_{m,n} = 0$ 。链路 $e=(v_1, v_2)$ 的代价用 $c(e)$ 表示、传输时延用 $d(e)$ 表示,其可以是链路的成本或链路资源的利用率等。假设每条链路的波长通道含有 W 个波长,定义 $l_{(m,n)}^w$ 为链路上 $E_{m,n}$ 的波长集合。定义 $N(m)$ 为节点 m 的邻居节点集合,则 $N(m) = \{n | E_{m,n} = 1, \forall n \in V_j\}$ 。定义 $d(v_i, v_j)$ 为节点 v_i 和 v_j 之间的传输时延。多域网络中的一条路径可表示为

$$P(v_0^1, v_z^k) = \left\{ \left\{ v_0^1 \rightarrow v_1^1 \rightarrow \dots \rightarrow v_x^1 \right\} \rightarrow \left\{ v_0^2 \rightarrow v_1^2 \rightarrow \dots \rightarrow v_y^2 \right\} \rightarrow \dots \rightarrow \left\{ v_0^k \rightarrow v_1^k \rightarrow \dots \rightarrow v_z^k \right\} \right\}, \quad (1)$$

式中任意两节点之间的链路 $e_i = (v_{i-1}, v_i) \in E$ 。定义 $P^n(v_0, v_i)$ 为路径 $P(v_0^1, v_i^k)$ 在子域 n 内的子路径。则路径 $P(v_0^1, v_i^k)$ 的代价和延迟定义如(2)和(3)式所示：

$$C[P(v_0^1, v_i^k)] = \sum_{n=1}^k \sum_{e \in P^n(v_0, v_i)} c(e), \quad (2)$$

$$D[P(v_0^1, v_i^k)] = \sum_{n=1}^k \sum_{e \in P^n(v_0, v_i)} d(e). \quad (3)$$

假设一个给定的 MP2MP 组播 $X = \{v_1, \dots, v_n\} \subseteq V$ 。 S_{set} 为源节点集合, 包含的节点数量为 $n_{S_{\text{set}}} = |S_{\text{set}}| < |V|$ 。 D_{set} 为目的节点集合, 包含的节点数量为 $n_{D_{\text{set}}} = |D_{\text{set}}| < |V|$ 。如(4)式所示, 组播传输代价为所有组播树代价的总和 C_{forest} 。定义 $P_t^n(v_i, v_j)$ 为组播树 t 在子域 n 内从源节点 v_i 到目的节点 v_j 的路径。如(5)式所示, D_{forest} 为 MP2MP 共享树的延迟, 即所有源节点到所有目的节点延迟的最大值。

$$C_{\text{forest}} = \sum_{i=1}^{n_{S_{\text{set}}}} C[P_t(s_i, D_{\text{set}})] = \sum_{j=1}^k \sum_{e \in P^j(S_{\text{set}}, D_{\text{set}})} c(e), \quad (4)$$

$$D_{\text{forest}} = \max\{[P_t(s_i, D_{\text{set}})]\} = \max_{v_i \in S_{\text{set}}, v_d \in D_{\text{set}}} \left\{ \sum_{e \in P^0(v_i, v_d)} d(e_0) + \sum_{i=2}^{k-1} \sum_{e \in P^i(v_i, v_d)} d(e_i) + \sum_{e \in P^k(v_i, v_d)} d(e_k) \right\}, \quad (5)$$

式中 $P_t(s_i, D_{\text{set}})$ 为组播树 t 从源节点 s_i 到目的节点 D_{set} 集合的路径, 基于时延和最小代价约束的 MP2MP 组播 RWA 问题的核心在于选择一个或多个满足(4)和(5)式约束的组播树, 同时, 还需要考虑组播树跨域的问题。如图 1 所示, 光网络被划分为 4 个域, 其中组播源节点组为 $\{1, 2\}$, 目的节点组为 $\{7, 8\}$ 。MP2MP 组播目标是将源节点组的所有节点的数据按照一定的约束条件传输到目的节点组的所有节点。图 1(a) 为基于 LF 的方法, 即以每个源节点为根节点建立组播树。一共需要构建 2 棵组播树, 这 2 棵组播树在构建过程中分别跨越不同的域 $\{D_1, D_2, D_4\}$ 和 $\{D_1, D_3, D_4\}$ 。由此可见, 构建组播树的过程涉及到域序列的选择问题, 其对所构建组播树的性能也有很大的影响。图 1(b) 为基于共享树的组播, 所有的源节点先将数据统一单播到核心点, 然后通过核心点建立 1 棵从核心点到目的节点的组播树。由此可见, 多域的网络环境下共享树的建立和核心点的定位都引入了域选择的问题。同时, 由图 1 可知, 基于共享树与基于 LF 的 MP2MP 组播相比, 在同时满足 QoS 约束的情况下, 波长占用率下降 50.0% (考虑光网络建立组播树有波长一致性约束), 链路占用量下降 37.5%。

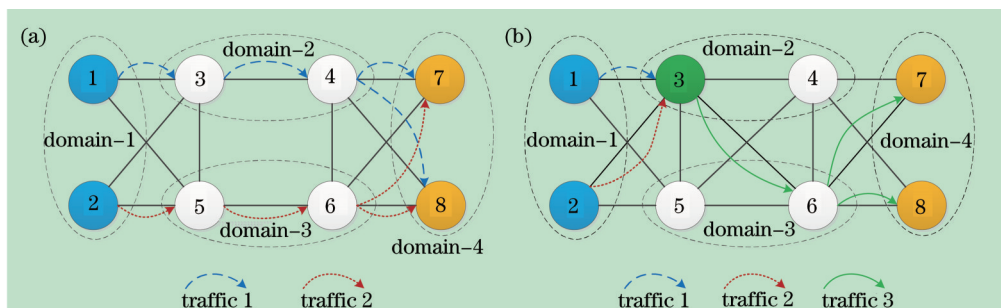


图 1 多域光网络 MP2MP 组播路由。(a) 基于光树的组播; (b) 基于共享树的组播

Fig.1 MP2MP multicast in multi-domain optical networks. (a) LF-based; (b) shared tree-based

3 MP2MP 组播 RWA 问题线性规划

使用整数线性规划 (ILP) 方法构建光网络 MP2MP 组播 RWA 问题的数学模型^[5]。

3.1 变量定义

定义 $L_{(m,n)}^i(w)$ 为组播数据流占用波长通道标识, 如果数据流 $t(s_i)$ 占用波长通道 $l_{(m,n)}^w$, 则 $L_{(m,n)}^i(w) = 1$, 否则 $L_{(m,n)}^i(w) = 0$; 定义 $L_{\text{link}(m,n)}(w)$ 为链路波长通道是否被占用标识, 如果链路 $L_{\text{link}(m,n)}$ 上的波长 w 被占用则 $L_{\text{link}(m,n)}(w) = 1$, 否则 $L_{\text{link}(m,n)}(w) = 0$; 定义 $F_{(m,n)}^i$ 为整数线性规划商品流值, 用于标识数据流 $t(s_i)$ 通过链路 $L_{\text{link}(m,n)}$ 到达的目的节点的数量; 定义 V_m^i 为数据流在节点经过的标识, 如果数据流在节点经过则 $V_m^i = 1$, 否则 $V_m^i = 0$ 。

3.2 目标函数

光网络中 MP2MP 组播代价主要反应在链路波长资源占用情况。因此,基于时延和最小代价约束的 MP2MP 组播 RWA 问题可以划归为寻找一个可行的解决方案,在满足组播业务时延约束的同时降低波长和链路资源占用量。假设光网络有波长一致性的约束,则目标函数可表示为

$$\text{Min} \sum_{n \in V} \left\{ \frac{\beta}{\alpha + \beta} \cdot D_{\text{forest}} + \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \cdot \sum_{m \in N(n)} \sum_w L_{(m,n)}^i(w) \right\}, \quad (6)$$

式中参数 α 为时延约束最大值,参数 $\beta = |E| \cdot W$ 为网络中的链路波长总量。

3.3 约束条件

光网络 MP2MP 组播 RWA 问题的约束条件包括网络容量约束、波长占用约束和流守恒约束。

3.3.1 网络容量约束

$$L_{(m,n)}^i(w) \leq E_{m,n}, \forall i, j, w, m, n, \quad (7)$$

$$\sum_i L_{(m,n)}^i(w) \leq W, \quad (8)$$

(7)式为网络拓扑连通性约束,组播数据流必须是在网络拓扑边的集合中;(8)式为波长容量约束。

3.3.2 波长资源约束

$$V_n^i = 1, \forall n \in S, \forall i, \quad (9)$$

$$\sum_{m,w} L_{(m,n)}^i(w) = 0, \forall n = s_i, \forall i, \quad (10)$$

$$\sum_{m,w} L_{(m,n)}^i(w) \geq V_n^i, \forall n \neq s_i, \forall i, \quad (11)$$

$$\sum_{n,w} L_{(m,n)}^i(w) \geq V_m^i, \forall m \notin S, \forall i, \quad (12)$$

$$\sum_{m,w} L_{(m,n)}^i(w) \leq I \cdot V_m^i, \forall n, \forall i, \quad (13)$$

$$\sum_{n,w} L_{(m,n)}^{i,j}(w) \leq I \cdot V_m^{i,j}, \forall m, \forall i, j, \quad (14)$$

式中 $I = W \cdot \max\{N(m)\} \cdot Z \cdot \max\{M_i\}$ 为整数线性规划中使用的极大整数,用于增强变量的约束。(9)式表示数据流 $t(s_i)$ 会出现在所有 MP2MP 组播的目的节点;(10)式表示数据流 $t(s_i)$ 不会返回其源节点 s_i ,即组播树不会产生回路;(11)式表示组播数据流 $t(s_i)$ 如果到达节点 $n(n \neq s_i)$,则节点 m 和 n 之间必须有至少有一个空闲的波长;(12)式表示如果 $t(s_i)$ 出现在非组播成员节点上则必须至少有一个输出的波长通道;(13)和(14)式表示节点上确实对于任何一个节点 m 如果有输入或输出波长通道用于承载组播流 $t(s_i)$,则其节点的流标识 V_m^i 必须为 1。

3.3.3 流守恒约束

$$\sum_n F_{(m,n)}^i = \sum_n F_{(n,m)}^i - 1, \forall m \in S, m \neq s_i, \forall i, \quad (15)$$

$$\sum_n F_{(m,n)}^i = \sum_n F_{(n,m)}^i, \forall m \notin S, \forall i, \quad (16)$$

$$\sum_n F_{(n,m)}^i = 0, \forall m = s_i, \forall i, \quad (17)$$

$$\sum_n F_{(m,n)}^i = |S| - 1, \forall m = s_i, \forall i, \quad (18)$$

$$\sum_w L_{(m,n)}^i(w) \leq F_{(m,n)}^i, \forall i, \quad (19)$$

$$F_{(m,n)}^i \leq |S| \cdot \sum_w L_{(m,n)}^i(w), \forall i, \quad (20)$$

$$I \cdot L_{(m,n)}^i(w) \geq \sum_{i,j} L_{(m,n)}^{i,j}(w), \forall w, m, n, \quad (21)$$

(15)式确保组播流 $t(s_i)$ 经过一个目的节点时其数量减 1;(16)式确保组播流 $t(s_i)$ 经过一个非目的节点时其数量不发生变化;(17)式表示发往组播源节点的数据流为 0;(18)式表示源节点的输出流的数量与目的节点到达流的数量相同;(19)和(20)式表示流和波长利用的关系:1) 如果任意一个波长承载了流 $t(s_i)$ 则其值在这个通

道中流数量标识 $F_{(m,n)}^i$ 的值至少为 1。2) 如果流 $t(s_i)$ 在任意一个链路上流数量标识的值 $F_{(m,n)}^i$ 不为 0, 则说明该链路必然有至少一个波长用来承载该流; (21) 式表示如果任意一个流占用了波长通道 $l_{(m,n)}^w$ 则波长通道标识 $L_{(m,n)}(w)$ 必须被设置为 1。

4 基于多核点共享树的启发式算法

MP2MP 组播 RWA 问题是已经被证明的 NP 完全问题^[7], 因此前述通过 ILP 方法构建的数学模型无法在多项式时间内进行求解。提出了一种面向多域光网络 MP2MP 组播 RWA 的启发式算法, 该算法可以有效地满足业务 QoS 和网络资源占用最小化的约束, 同时实现了计算并行化并有效地降低了组播路由算路时延。其核心思想是: 将多域网络 G 中所有的子域抽象成节点, 节点之间是否有连线由其各个域的网关节点之间是否相连决定, 从而形成一个虚拓扑 G' 。图 2 为图 1 多域光网络的虚拓扑。虚拓扑中节点之间链路的代价取域间网关节点代价的最小值。若 G' 中的节点包含 G 中 MP2MP 组播的源或目的节点, 则将其标记其为虚拓扑网络 G' 中 MP2MP 组播的源或目的节点, 从而最终形成 G' 中 MP2MP 组播源节点组和目的节点组。此时就将 G 中多域 MP2MP 组播中域序列的确定、核心点的选择等问题转化为单域 G' 中来解决。虚拓扑网络 G' 中 MP2MP 组播核心点的选择和路由算法, 直接决定最终 G 中共享组播树的个数以及核心点所在的域, 因此采用算法复杂度较高但是可以得到最小化核心点树的 MinMaxD 算法^[13], 其算法复杂度为 $O(|G'| |V'|^2 (|G'| + |S'|))$ 。

拓扑虚拟化的过程可以得到多核点组播树的域序列、组播树核心点的个数及其所在的域。而具体的核心点的选择采用域内节点遍历算法, 从网关节点开始遍历直到域内所有的节点遍历结束。此时, 子域内核心点的查找和定位, 可以在所有的已确定的子域内并行进行, 从而实现了算法的可并行化。

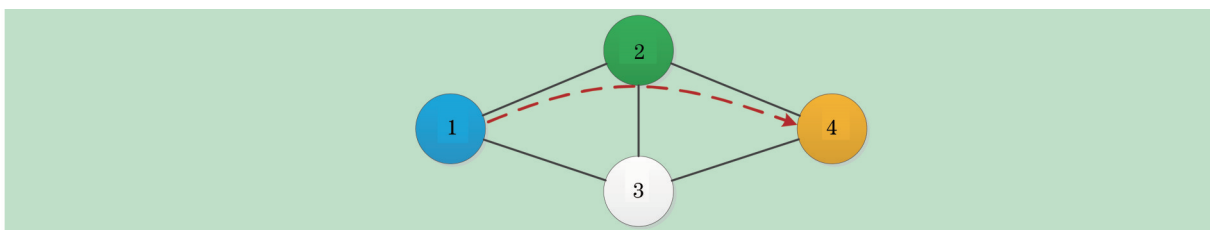


图 2 多域光网络抽象虚拓扑

Fig.2 Abstract virtual topology of multi-domain optical networks

确定核心点的个数及共享树的域序列后, 需要为构建的共享组播树进行路由计算和波长分配。源节点到核心点之间的路由使用基于时延约束的 Dijkstra 算法 (CDKS)^[13], 其算法复杂度为 $O(|V'|^2)$ 。核心点到目的节点之间使用基于时延约束的最小生成树算法 (KPP)^[14], 其算法复杂度为 $O(\Delta |V'|^2)$ 。最后, 使用首次命中算法为每棵共享树分配波长。算法详细步骤如下:

1) 多域光网络 $G=(V, E)$ 被划分为多个域 $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ 。每个子域包含若干个节点 $\{\{v_1^1, \dots, v_s^1\}, \{v_1^2, \dots, v_s^2\}, \dots, \{v_1^n, \dots, v_s^n\}\}$, 域与域之间通过网关节点相连。MP2MP 组播 $M=\{v_1, v_2, \dots, v_t\}$ 包含 t 个节点, 其中源节点集合 $M_s=\{v_1^s, v_2^s, \dots, v_p^s\}$ 节点的个数为 p 且分布在 p' 个子域中, 目的节点 $M_D=\{v_1^D, v_2^D, \dots, v_q^D\}$ 集合的个数为 q 且分布在 q' 个子域中。令 MP2MP 组播时延约束为 Δ , 初始化多对多组播树集合 T_{shared} , 并将所有的源节点加入到集合 T , 核心点集合为 H 。

2) 将网络 G 中的域抽象成节点, 将域间网关节点相连的域连接在一起从而形成虚拓扑 $G'=\{V', E'\}$, 且 $|V'|=\{|D_1, D_2, \dots, D_n\}=n$ 。

3) 虚拓扑网络 $G'=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, MP2MP 组播在虚拓扑网络中的请求为 $M'=\{v_1, v_2, \dots, v_{p+q}\}$, 使用 KPP 算法计算得到核心点所在的域及最小化核心点的个数 c 及核心点所在域的集合 $\{D'_1, D'_2, \dots, D'_c\}$ 。

4) 将集合 $\{D'_1, D'_2, \dots, D'_c\}$ 中域的节点都标记为候选中心节点。顺序选择集合 $\{D'_1, D'_2, \dots, D'_c\}$ 中的域, 使用 CDKS 算法计算所有源节点 $M_s=\{v_1^s, v_2^s, \dots, v_p^s\}$ 与候选中心点的距离, 并将候选中心点按照计算结果升序进行排序候选中心点序列 (List)。

5) 从 List 中选择第 1 个候选核心点 h_j , 使用 CDKS 算法建立 $M_s = \{v_1^s, v_2^s, \dots, v_j^s\}$ 与候选核心点的连接, 若满足最大延迟约束 $\text{Max } D < \Delta$, 则基于 KPP 算法建立一棵以 h_j 为中心点的共享组播树 $T_{\text{shared}-j}$ 。顺序将集合 M_D 中满足条件 $\text{Max } D + De(T) \leq \Delta$ 和 $v \notin T_{\text{shared}}$ 的节点加入到该共享组播树中, 将 h_j 从 List 中删除。

6) 使用首次命中策略为 $T_{\text{shared}-j}$ 分配一个波长 ($\lambda_i, 1 \leq i \leq W$), 如果成功则将 $T_{\text{shared}-j}$ 加入到多对多组播集合 T_{shared} 中, 将加入到 $T_{\text{shared}-j}$ 中的目的节点从集合 M_D 中删除, 转向 7), 否则转向 5)。

7) 判断集合 M_D 是否为空, 若为空则返回集合 T_{shared} ; 不为空则判断集合 T_{shared} 中组播树的数量, 如果 $|T_{\text{shared}}| < p$ 则转向 5), 否则转向 8)。

8) 使用源组播树策略建立与源节点数目相同的多个组播树并返回 T_{shared} 。

5 仿真分析

为了对 MSTDC 算法进行定量的分析, 基于离散事件仿真工具 OMNet++ 开发了多域光网络模拟实验平台。网络拓扑的生成是基于 Salama 所提出的随机网络拓扑生成算法^[15]。仿真假设网络节点随机分布在大小为 $1200 \text{ km} \times 1200 \text{ km}$ 的区域里面, 节点的数量为 50 个且在该区域中服从均匀分布。通过九宫格的方式将该网络分为 9 个等面积的子网, 从而模拟生成拥有 9 个域的多域光网络。若节点正好位于域的分界线上, 选择与其相连度最高的域作为其所属域。任意两个节点 v_1 和 v_2 存在直接相连链路的概率如(22)式所示。

$$P_c(v_1, v_2) = \beta \exp \frac{-r(v_1, v_2)}{R\alpha}, \quad (22)$$

式中 R 为网络中任意两节点间距离的最大值, $r(v_1, v_2)$ 为节点 v_1 和 v_2 之间的欧拉距离。参数 α 控制长链路与短链路数量的比例, 可以调整该参数使得距离近的两个节点产生链路的概率高于距离远的, α 值越大长链路占的比例就越高。参数 β 控制网络节点度的平均值。为使网络拓扑随机生成算法产生的网络拓扑更接近实际网络, 仿真设置 $\alpha = 10\%$ 使得长链路的比率为 10% , $\beta = 4$ 使得节点度的平均值是 4。已知光信号在光纤中的传播时延为 $5 \mu\text{s}/\text{km}$ 。为有效反应算法的性能, 仿真定义链路的时延为光信号在整条光路光纤中的传输时延, 忽略节点处的排队时延和处理时延。假设仿真网络中每条链路上包含 16 个波长。源节点和目的节点的数量分别为 $S = \lfloor N/2 \rfloor$ 和 $D = \lceil N/2 \rceil$, 其中 N 为 MP2MP 组播组成员数量, 时延约束最大值为 30 ms。为验证算法性能, 仿真对比了 LF、GREED 和 MSTDC 在不同网络应用场景下波长和链路资源占用率、组播成功率和算法平均执行时间。

5.1 验证 MSTDC 最小代价性能

在相同的网络资源和时延约束条件下, 对比不同算法情况下 MP2MP 组播波长和链路资源占用情况。图 3 是随 MP2MP 组播组成员数量的增加, 基于三种不同的算法 MP2MP 组播波长和链路资源占用情况的对比。由图 3(a)可知, 光网络波长占用随着 MP2MP 组播组成员的增加而增加, 由于 LF 算法按照源节点的数量建立组播树, 因此其占用波长数量与源节点的个数相同。基于多核点共享树的 GREED 和 MSTDC 算法建立的组播树数量小于 LF 算法, 因此占用的波长数量也小于 LF 算法。同时 MSTDC 算法可以准确地计算多域网络环境下核心点的数量及其所在的域, 因此基于 MSTDC 算法构建的共享树的数量小于 GREED 算法, 且随着组播组成员

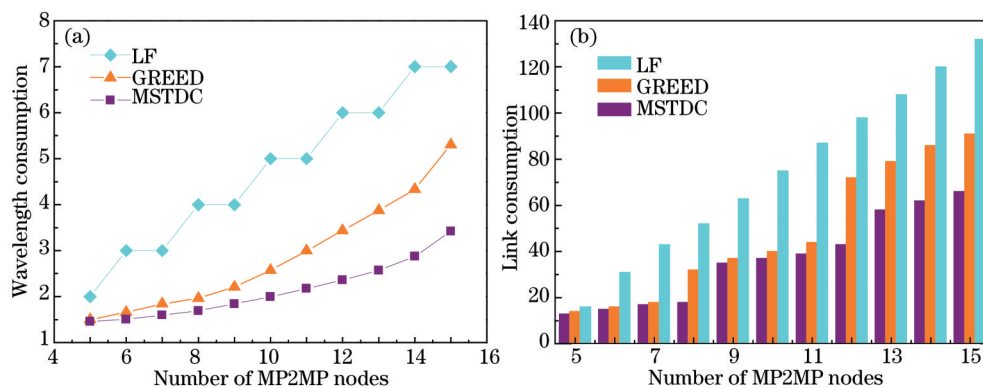


图 3 组播路由算法网络资源占用情况对比。(a) 波长资源; (b) 链路资源

Fig.3 Network resources occupied ratio comparison by using different algorithms. (a) Wavelength; (b) link

数量的增加优势越明显。当组播组成员数量达到15个时, MSTDC与LF相比波长资源占用率下降51.1%, 与GREED相比下降35.5%。同理, 由图3(b)可知, 组播算法构建的组播树直接关系到网络链路资源占用量。MSTDC算法构建的MP2MP组播树链路占用量小于LF算法和GREED算法。

5.2 验证MSTDC算法RWA的成功率

如图4所示, 假设MP2MP组播组节点的数量为 $N=[5, 7]$, 随着MP2MP组播组数量的增加, 由于波长和链路资源限制, 组播成功率开始下降。但是, MSTDC算法路由和波长分配成功率要明显高于LF和GREED算法, 这是因为MSTDC算法可以实现最优化的资源配置, 从而可以使得有效的资源容纳更多的MP2MP组播。由图4可知, MSTDC算法与LF算法相比, 路由平均成功率提高达24.8%。与GREED算法相比, 路由平均成功率提高达14.8%。

5.3 验证MCSMT算法执行效率性能

算法运行环境为Intel Xeon, 2.40 GHz、8GB RAM、Windows Server 2008和OMNet++4.2.2。由于MSTDC算法是可并行化的, 因此该算法使用10个线程进行并行计算(1个线程用于负责虚拓扑MP2MP共享树的构建及核心点的选择, 9个线程分别负责一个子域内核心点的选择或组播树的构建工作), LF和GREED算法则使用1个线程。仿真验证随着MP2MP组播组成员数量的增加, 三种算法的执行时间规律由图5所示, 随着组播组成员数量的增加LF和GREED算法执行时间都呈线性增长, 而MSTDC算法执行时间受组播组成员数量的变化影响不大。这是由于MSTDC算法进行组播树构建是多个域内使用多个线性并行进行计算。当MP2MP组播组成员数量达到22个时, MSTDC算法执行时间与LF算法相比减少可达64.6%, 与GREED算法相比减少可达56.9%。

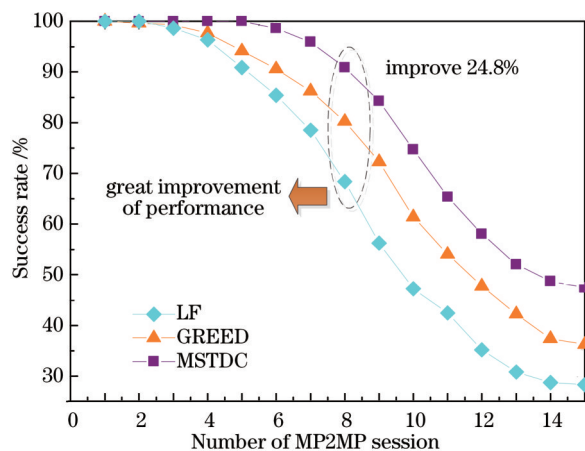


图4 组播成功率对比

Fig.4 Routing success ratio comparison

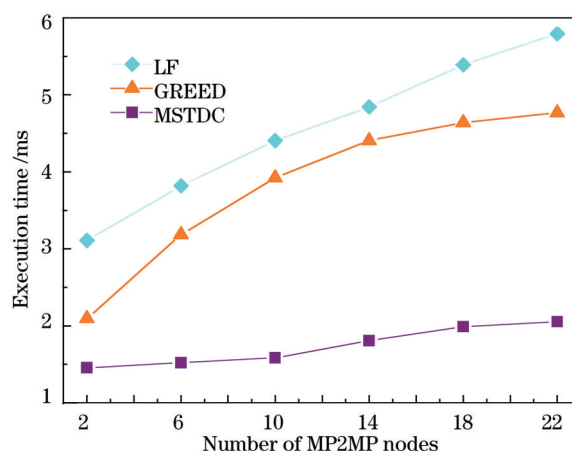


图5 算法执行时间对比

Fig.5 Algorithms execution time comparison

6 结 论

分析了多域光网络环境下基于多核点共享树MP2MP组播存在最优化域序列选择和核心点所在域的定位及选择的问题, 从而使得传统单域网络所提出的多核点共享树算法出现了网络资源占用量高和难以满足业务QoS等的情况。使用整数线性规划的方法对多域光网络的MP2MP组播RWA问题进行数学建模。提出了一种面向多域光网络、计算可并行化、基于时延和最小代价约束的多核点共享树启发式算法。该算法将域抽象成节点, 通过构造虚拓扑的方式将多域的问题转化到单域中进行求解。在虚拓扑中确定多核点共享树最小化核心点的个数及其所在的域, 达到最优化域间路径计算的目的。然后, 多域中并行地将源节点和目的节点分别通过基于时延约束的Dijkstra算法和最小生成树算法选择性地加入到不同的共享树中。从而达到满足时延约束的同时实现网络资源代价最小化的目的。仿真验证在网络节点数为50且均匀地分布在9个域内的多域光网络环境下, 与LF算法相比MSTDC算法波长资源占用率降低可达51.1%, 路由成功率提高可达24.8%, 算法执行时间降低最高可达64.6%。由此可知, 在大规模多域网络环境下, MSTDC算法在满足时延约束的条件下, 可有效地减少组播波长资源消耗, 提高组播成功率和降低算法执行时间。

- 1 Develder C, D Leenheer M, Dhoedt B, *et al.*. Optical networks for grid and cloud computing applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(5): 1149–1167.
- 2 Pedersen J M, Tahir Riaz M, Dubalski B, *et al.*. Using latency as a QoS indicator for global cloud computing services[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2013, 25(18): 2488–2500.
- 3 Ye Lingyun, Wang Ju, Hu Hao, *et al.*. All-optical broadcast and multicast technologies based on PPLN waveguide[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(11): 110604.
- 4 Yang Fan, Xu Zhanqi, Qiu Zhiliang, *et al.*. A multi-granularity static waveband grooming algorithm based on multicast tree[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0906004.
杨帆, 徐展琦, 邱智亮, 等. 基于组播树的多粒度波带静态疏导算法[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0906004.
- 5 Cao Y, Yu O. Groupcast in wavelength-routed WDM networks[J]. J Lightwave Technol, 2006, 24(11): 4286–4295.
- 6 Rahman T, Ellinas G, Ali M. Lightpath- and light-tree-based group cast routing and wavelength assignment in mesh optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2009, 1(2): A44–A55.
- 7 Chen Y R, Radhakrishnan S, Dhall S K, *et al.*. On multi-stream multi-source multicast routing[J]. Computer Networks, 2013, 57(15): 2916–2930.
- 8 Tyan H Y, Hou J C, Wang B. Many-to-many multicast routing with temporal quality of service guarantees[J]. IEEE Transactions on Computers, 2003, 52(6): 826–832.
- 9 Moh W M, Nguyen B. QoS-guaranteed one-to-many and many-to-many multicast routing[J]. Computer Communications, 2003, 26(7): 652–669.
- 10 A Ballardie. Core Based Trees (CBT) Multicast Routing Architecture[Z]. Technical Memo, IETF RFC 2201, 1999. <https://wiki.tools.ietf.org/html/rfc2201>.
- 11 D Estrin, D Farinacci, A Helmy, *et al.*. Protocol Independent Multicast-Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification[Z]. Technical Memo, RFC 2362, 1998. <https://wiki.tools.ietf.org/html/rfc2362>.
- 12 Jeong M, Qiao C, Xiong X Y, *et al.*. Tree-shared multicast in optical burst-switched WDM networks[J]. J Lightwave Technol, 2003, 21(1): 13–24.
- 13 Zappala D, Fabbri A, Lo V. An evaluation of shared multicast trees with multiple cores[J]. Telecommunication Systems, 2002, 19(3–4): 461–479.
- 14 Liu Huanlin, Sui Meng, Deng Lang. A method of multi-source optical multicast routing based on multi-core node shared trees[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(2): 0206002.
刘焕淋, 岁蒙, 邓朗. 基于多核点共享树的多源光组播路由方法[J]. 光子学报, 2013, 43(2): 0206002.
- 15 Salama H F, Reeves D S, Viniotis Y. Evaluation of multicast routing algorithms for real-time communication on high-speed networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(3): 332–345.
- 16 Zhao Yongli, Zhang Jie, Zhang Min, *et al.*. DREAM: Dual routing engine architecture in multilayer and multi-domain optical networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(5): 118–127

栏目编辑: 王晓琰