

doi: 10.3788/gzxb20144302.0206002

基于多核点共享树的多源光组播路由方法

刘焕淋, 岁蒙, 邓朗

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要:通过网络编码方法优化多核点选择和组播信息传输,本文提出一种基于多核点共享树和网络编码的光组播路由构造和波长分配方法、减少波长资源消耗和提高网络的负载平衡性能.首先,删除产生源点迂回回路的网络编码备选核点集合,采用启发式矩阵运算方法确定多源共享树的网络编码核点,实现多源共享树以最少的核点覆盖最多的源节点;然后,为减少波长信道消耗数目,在确定的核点到目的节点间加入网络编码方法传输信息;最后,讨论了多核点共享树的波长分配方法和目的节点成功解码的边分离路径方法.仿真结果表明:与单核共享树、基于网络编码的单核共享树相比,基于网络编码的多核点共享树组播路由方法需求最少的波长数目和获得最好的网络负载平衡性能.

关键词:WDM 光网络;光组播;共享树;多核点;网络编码;波长消耗;负载平衡度

中图分类号:TP30;TN91

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)02-0206002-5

A Method of Multi-source Optical Multicast Routing Based on Multi-core Node Shared Trees

LIU Huan-lin, SUI Meng, DENG Lang

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing 400065, China)

Abstract: Network coding was introduced to optimize the selection of multi-core nodes and transmission of multicast information. A method was proposed to construct optical multicast routing based on multi-core node shared tree and network coding to decrease the wavelength consumption and to improve the performance of network load balance. The network coding candidate core node set was produced by deleting the nodes which lead to the source node bypass loop. The network coding core nodes of multi-source shared trees were determined by utilizing the heuristic matrix operation to achieve the minimal core nodes covering the maximal source nodes. Then, the network coding was applied to transmit the information between the core nodes and destination nodes to reduce the wavelength consumption. And, the wavelength assignment and edge disjoint path were discussed for the multi-core node shared tree. Comparing with the multicast routing with single-core shared trees and single-core shared trees based on the network coding, the simulation results show that the multicast routing with multi-core node shared trees based on network coding can get the least required wavelength and achieve the best performance of network load balance.

Key words: Wavelength Division Multiplex (WDM) network; Optical multicast; Shared trees; Multi-core node; Network coding; Wavelength consumption; Load balance degree

OCIS Codes: 060.4510; 060.4255; 060.4265

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61275077,61371096)、国家重点基础研究发展计划资助项目(No. 2012CB315803)和重庆市科委自然科学基金(No. CSTC 2013jcyjA40052)资助

第一作者:刘焕淋(1970-),女,教授,博士,主要研究方向为光通信技术和网络. Email:liuhl2@sina.com

收稿日期:2013-07-04;录用日期:2013-09-02

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着虚拟空间会议、远程医疗等多点对多点的组播应用发展,光网络的带宽资源面临新的挑战,大量的组播请求因为光网络的波长数目有限而不能成功传输到网络目的端^[1-2]. Ali 和 Deogun 等人提出了一种具有分光续传(Tap and Continue, TaC)功能的光交换节点结构实现光组播^[3]. Jeong 等人提出尽可能地让所有的组播成员共用一棵转发树的共享树方法解决多点到多组播路由问题^[4]. 在共享树结构中,同一组播组的源节点将所需要组播的数据单播到一个核点,再由核点向其它组播成员转发. 因此,组播共享树以核点为组播树根节点,建立一棵能够到达所有组成员的组播树,这样在核心节点到所有目的节点间就只需要建立一次一棵组播树便完成所有数据的转发,这棵共享树可以看成是根到所有组成员的最短路径合并而成的,可以解决多源组播有源树波长资源消耗巨大的问题^[5].

目前,比较成熟的组播共享树方法有基于树的核点(Core Based Tree, CBT)^[6]和协议独立的组播稀疏模式(Protocol Independent Multicast-Sparse Mode, PIM-SM)协议^[7]. 虽然组播单核共享树可以节约网络带宽和降低路由器转发速度,但是面临在核心点处信息瓶颈效应和信息传输时延较大问题. 在组播多核共享树中,组播成员可以根据与核点的位置、时延约束等条件选择其中一个核节点加入,有效地利用多核共享树的转发能力. 因此,基于多核点的组播树能有效减少网络带宽消耗,降低链路负载;同时,多核共享树的一棵树转发失败只影响单棵共享树信息传输和转发,使多核共享树的容错性更好.

核点的选择和波长资源分配是影响多核共享树性能的关键因素. 本文针对这两个问题提出了一种基于多核点共享树的核点选择、组播路由、网络编码和波长分配方法,降低多源组播中网络波长资源消耗和提高网络负载平衡度,使核点信息瓶颈效应减轻.

1 多源光组播路由优化模型

波分多路复用(Wavelength Division Multiplex, WDM)光网络用无向图 $G(V, E, W)$ 表示, V 为节点集合, E 为边(光纤链路)集合, W 是光纤链路的波长集合. 波长是 WDM 光网络中重要的参量,在缺少波长转换器的光层组播中,波长的分配受到波长独立性和波长连续性的约束,所以在进行路由和波长分配时要考虑光层这些约束^[8], 这些约束表示为

$$\sum_{m, \text{for } P_m=1} F_{m}^{ij, \lambda} = \sum_{n, \text{for } P_n=1} F_{n}^{ij, \lambda} = 0, m, n, i, j \in V \quad (1)$$

$$\sum_{m, \text{for } P_m=1} F_{m}^{ij, \lambda} = \sum_{n, \text{for } P_n=1} F_{n}^{ij, \lambda} = L_{ij}^{\lambda}, \lambda \in W \quad (2)$$

$$\sum_{m, \text{for } P_m=1} F_{m}^{ij, \lambda} = \sum_{n, \text{for } P_n=1} F_{n}^{ij, \lambda}, x \in V, x \neq i, j \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_{j, \text{for } P_m=1} F_{m}^{ij, \lambda} \leq 1, i, j \in V \quad (4)$$

式(1)~(4)中, $F_{m}^{ij, \lambda}$ 表示在 λ 波长平面上节点 i, j 之间通过光纤链路 (m, n) 进行路由的光路数目; L_{ij}^{λ} 代表在波长 λ 平面上, 节点 i, j 之间存在的光通路数目; P_m 表示物理光纤链路是否存在, 取值为 1 或 0, 分别代表节点对 m 和 n 之间有无链路连接.

WDM 光网络共享树构造必然考虑波长分配算法, 构造花费大量波长数的光树会导致高阻塞率, 因此, 波长转换受限组播路由共享树的波长优化是光纤链路波长数量有限和网络阻塞性能所要求^[9]. 在多点到多点(Multi-Point to Multi-Point to, MP2MP)共享光树中, 一棵光树所消耗波长数是该光树中各光纤链路消耗波长数最多波长数, 称为共享树消耗波长数, 而波长数优化就是最小化所有共享树消耗波长数, 即

$$\text{Min}_{ST \in \text{MP2MP}(S, D)} \text{Max}_{e \in ST} \{\alpha_e\} \quad (5)$$

式(5)中, 参量 α_e 表示在光树 ST 中光纤链路 e 上使用的波长数目, ST 代表多源组播请求构造的一棵共享光树.

通过直接求解式(1)~(5)是一个 NP 完全(Nondeterministic Polynomial Complete)问题. 因此, 本文设计了一种有效的多核心点共享树组播路由方法.

2 基于多核点共享树组播路由方法

基于多核点共享树组播路由方法(Multicast Routing based on Multi-core node Shared Tree, MR-MCST)包括 4 部分: 产生网络编码的核点备选集, 网络编码核点确定、构造共享树和波长分配方法.

2.1 产生网络编码的核点备选集合

除目的节点外, 选择网络中其它所有节点作为备选核点, 并构造各备选核点到目的节点的共享树, 判断共享树中是否存在源节点, 若存在, 从核点备选集中删去使共享树中存在的源节点的备选核点. 共享树的传输机制是核点从源节点收集信息, 然后转发给所有的目的节点, 如图 1(a)所示, 正常的传输过程 s-core-d. 但是, 如果源节点存在于核点到目的节点路径之间, 这样就形成迂回的传输路径, 信息会从源节点单播到核点, 又经核点转发给源节点, 最后才转发给目的节点, 如图 1(b)所示的迂回路径: s-core-s-core-d, 这样的传输机制

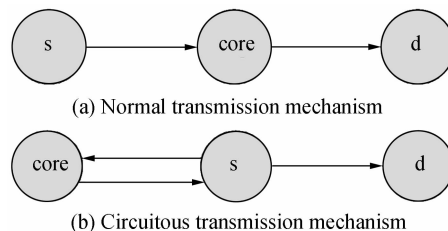


图 1 共享树传输机制
Fig. 1 Transmission scheme of shared tree

会浪费大量的链路资源.算法中不允许这样的迂回的传输机制存在,这也是算法增加一个步骤的目的,在这个步骤中会在核点备选集中删去会导致迂回的核点.

2.2 基于矩阵的核点选择方法

在构造多核共享树覆盖所有的源和目的节点过程中,核点的选择直接影响组播路由性能,核点负责将各源节点输入信息进行网络编码,核点到目的节点路径传输编码压缩以后的比特信息,采用网络编码方法在网络层传输信息可大大节约波长通道的需求数量^[10].由于一棵共享树在波长分配中采用网络编码传输信息,一棵共享树只占用一个波长,所以优化波长使用数的目标可转化为求解以最少核点覆盖所有源节点方法.基于矩阵的核点选择过程为:首先从产生的备选核点集合中,从距离源点最近的备选核点 v_i 开始,寻找该备选核点到各源节点是否存在链路分离路径,若存在,用式(5)计算该备选核点覆盖矩阵 M_v 中第 i 行所有元素值,依此类推,直到所有备选核点计算完,得到矩阵 M_v 各元素值.若矩阵 M_v 非空且非零矩阵,则计算 M_v 覆盖矩阵中各行数字“1”个数,选择“1”最多行对应的行节点作为确定的一个核点,并删除矩阵中“1”数目最多且最前面的行及该行中包括元素“1”的列,判断矩阵 M_v 是否为空或零矩阵,若否,在 M_v 剩余子矩阵中按上述过程寻找覆盖最多源节点的第 2 个核点;依此类推,直到所有源节点都被选择的核点覆盖,或覆盖矩阵 M_v 为空或全零为止.

在上面核点确定过程中,计算覆盖矩阵是为了确定备选核点是否能确定为共享树核点的关键步骤,对于每个备选核点 $v_i \in \text{core node_candidate}$,按下式计算覆盖矩阵 M_v .

$$\text{Matrix}(M_v) = [m_{i,j}]_{|\text{core node_candidate set}| \times |S|} \quad (6)$$

式(6)中, $|\text{core node_candidate set}|$ 表示备选核点数目, $|S|$ 表示光网络源节点数目,矩阵元素 $m_{i,j} = 1$, 表示以节点 v_i 为核点的共享树能链路分离地覆盖网络源节点 v_j , 否则元素 $m_{i,j} = 0$.

2.3 组播共享树的构造

在核点确定过程中,若覆盖矩阵 M_v 为全零矩阵,表示还有源节点没有被核点覆盖,则将没有被核点覆盖的源节点路由到离它最近的核点.因此,多源共享树由确定的核点到各源节点链路分离路径、各核点到目的节点最短路径及没有被核点覆盖的源节点连接到最近核点边组成.然后,在核点处对多源节点到达的信息进行网络编码以节约波长使用数;同时,为了在目的节点端能正确解码,需要寻找从核点到目的节点间的与最短路径分离的且不通过源节点的第 2 条次短路径^[11].

2.4 波长分配方法

在 WDM 光网络中,路由问题与波长分配密切相关,波长分配目标是最小化波长数使用量.由于目前波

长转换器比较昂贵,在 MR-MCST 组播共享树的波长分配中,设节点都具有分光能力但不具有波长变换能力,波长分配采用首先即中 (First-fit, FF) 方法分配一棵光树的波长通道.由于在核点处对信息进行网络编码且需要存在核点到目的节点的链路分离路径,因此一棵单核点光树只消耗一个波长通道.由于多源共享树一般由多核点多棵光树组成,根据波长连续性和独立性约束,需要分配多个波长通道.

3 仿真及分析

仿真采用 Salama 模型^[12] 产生与实际网络拓扑相似的随机网络拓扑,通过修改 Salama 模型中的参量确定拓扑的节点数目和平均节点度数.仿真中假定光网络中节点都具有分光能力和网络编码能力,但不具有波长转换能力,每根光纤链路中的波长数目不限,能够满足随机产生的组播连接请求,网络的源节点随机产生,目的节点随机产生 2 个.对比方法为:单核共享树 (Single Core Shared Tree, SCST) 和单核编码共享树 (Single Core Shared Tree based Network Coding, SCST-NC)^[13].评价 MR-MCST 方法性能的 2 个参量是:多源多宿共享树波长消耗数和负载平衡度 (PBD).其中,负载平衡度是衡量网络中各链路负载平衡情况的,负载不平衡会使重负载链路丢包率很高,轻负载链路闲置资源太多,负载平衡度定义为

$$\text{PBD} = |H| \max_{e \in \text{ST}} \{\alpha_e\} / \sum_{e \in \text{ST}} \alpha_e \quad (7)$$

式(7)中, $|H|$ 表示多源共享树的共享光树棵数,负载平衡度表示整个网络各个链路负载的平衡程度,负载平衡度越趋近于 1,表示全网负载越趋近于平衡.

图 2 和图 3 表示共享树波长消耗数、负载平衡度与源节点数关系,其中,网络节点数为 30 个,控制 Salama 模型中网络的平均节点度数为 4,通过改变源节点数目,观察不同方法对共享树波长消耗数和负载平衡度的影响.

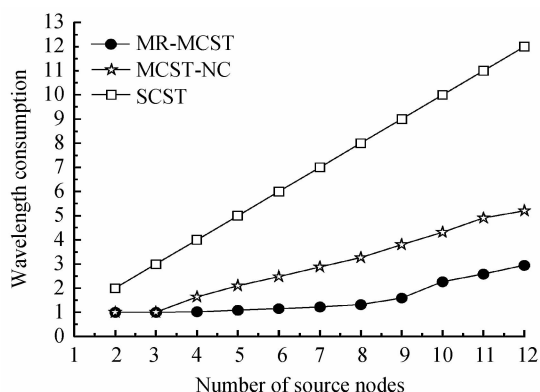


图 2 波长消耗数与源节点数关系
Fig. 2 Wavelength consumption vs. number of source nodes

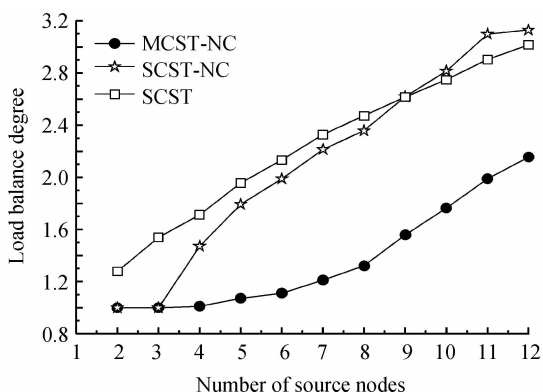


图3 负载平衡度与源节点数关系

Fig. 3 Load balance degree vs. number of source nodes

图2表示构造满足组播请求的多源共享树所需要消耗的波长数与源节点关系,当源节点数目增加时,单核共享树、采用网络编码的单核共享树和多源共享树消耗的波长数都会增加,这是由于源节点数越多需要传输的数据越多,消耗的波长数也就越多.在相同源节点情况下,SCST所需分配波长数最多,原因是按SCST方法建立的单核共享树,由于不采用网络编码,在靠近核点的链路上有大量的数据要转发,又由于波长的独立性,这样的链路上会消耗大量的波长信道;在核点处采用网络编码源点信息的SCST-NC方法消耗的波长数明显降低,而采用多核点和网络编码方法构造多核共享树的MR-MCST方法消耗的波长数最少,原因是MCST-NC在源到核点间采用了链路分离路径,在共享树核点加入网络编码节约波长信道数,所以MCST-NC算法较其他三种算法消耗的波长数最少.

图3给出了不同多源共享树方法的负载平衡度与源节点数关系.当网络的源节点数增加时,SCST、SCST-NC和MR-MCST方法的负载平衡度都增加且数值都大于1,负载平衡度的值越大表示共享树的负载越不平衡,存在更多的链路负载过大或过小问题,网络负载平衡性能越差,即组播共享树源节点比较少时网络的负载比较平衡.这是因为当源节点增加时,需要共享树转发的信息业务量增大,在树干上需要传输的业务增加,这使得负载越不平衡.从图3还可以发现,由于MR-MCST方法采用多核点转发策略和网络编码方法,负载平衡度值比SCST和SCST-NC都小很多,说明MR-MCST方法在相同源节点数目情况下可以获得更好的共享树负载平衡度.

为验证不同的共享树方法的性能是否与网络规模有关,通过调节Salama拓扑模型中的网络节点数从10到70变换,控制拓扑平均节点度数为4,源节点数为网络总节点数的30%,目的节点2个.在图4中,随着网络节点总数的增加,源点数随之增大,构造的光树也更粗壮需要消耗更多的波长信道资源,因此三种共享树方法需要消耗的波长数都随着网络节点数增加而增

加,其中没有采用网络编码的SCST共享树所消耗的波长数随节点数增加快速增大,而MR-MCST方法在相同网络节点数情况下所需消耗的波长数最少,且随着网络节点数增加,MR-MCST方法增加消耗的波长数比较少,这说明MR-MCST方法解决大规模网络波长资源受限问题的能力更好.

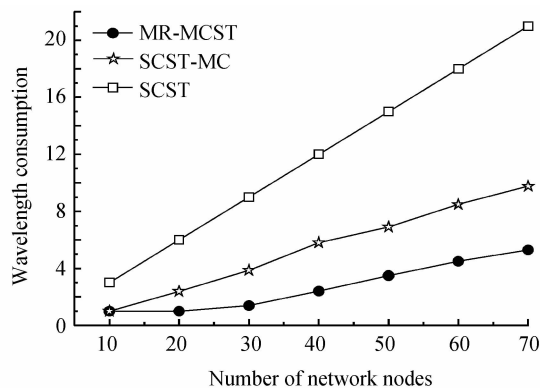


图4 波长消耗数与网络节点数关系

Fig. 4 Wavelength consumption vs. number of total network nodes

在图5中,随着网络规模增大,源节点相应数增大,构造的共享光树需要传输更多的源节点业务.因此在共享树干处需要消耗更多的波长信道数,这使得负载越不平衡,因此,负载平衡度随着网络节点数的增加而增大.但是,MR-MCST方法在相同网络节点条件下比其他2种共享树方法的负载更平衡性更好.

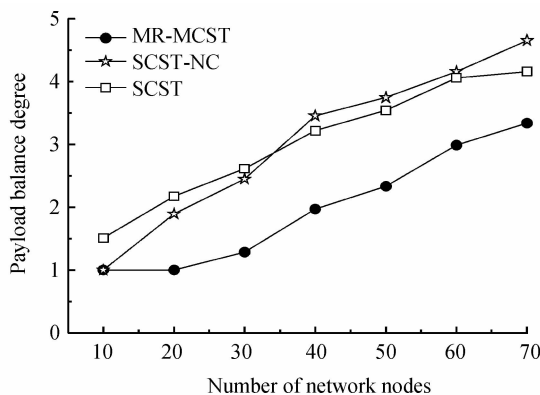


图5 负载平衡度与网络节点数关系

Fig. 5 Load balance degree vs. number of network nodes

4 结论

多源多宿组播路由和波长分配是在WDM光网络非常重要的问题.本文提出了一种基于多核点共享树转发策略和网络编码结合的多核点共享树组播路由(MR-MCST)方法,该方法在源点到核点之间采用链路分离路径和覆盖最多源节点方法确定核点,在核点到目的节点间采用网络编码源点信息路由传输和波长分配.仿真结果表明该方法相比其他的单核共享树及单核共享树网络编码方法,消耗更少的波长资源和获

得更好的网络负载平衡性能,特别是在大规模网络情况下,MR-MCST方法在减少波长消耗数和负载平衡性方面优势更明显,这对提高组播网络的有限波长资源的利用率和减少组播请求阻塞率都有好处.

参考文献

- [1] CUDA D, INDRE R M, LE ROUZIC E, *et al.* Building a low-energy transparent optical wide area network with "multipaths" [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, **5**(1): 56-67.
- [2] CAI Ting, HUANG Shan-guo, LI Xin, *et al.* Dynamic survivable mapping algorithm based on ant colony optimization in IP over WDM networks[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1400-1404.
蔡庭, 黄善国, 李新, 等. 基于蚁群优化的 IP over WDM 光网络动态生存性映射算法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12): 1400-1404.
- [3] ALI M, DEOGUN J S. Cost-effective implementation of multicasting in wavelength-routed networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, **18**(12): 1628-1638.
- [4] JEONG M, QIAO C, XIONG Y, *et al.* Tree-shared multicast in optical burst-switched WDM networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(1): 13-24.
- [5] CHEN Y R, Radhakrishnan S, DHALL S K, *et al.* On multi-stream multi-source multicast routing [C]. Global Communications Conference (GLOBECOM), 3-7 December, 2012: 1926-1931.
- [6] DE RANGO F, TROPEA M, SANTAMARIA A F, *et al.* Multicast QoS core-based tree routing protocol and genetic algorithm over a hap_satellite architecture [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, **58**(8): 4447-4461.
- [7] SULAIMAN A M, ALI B M, KHATUN S, *et al.* An enhanced IPv6 anycast routing protocol using protocol independent multicast-sparse mode (PIM-SM)[C]. *IEEE ICT-MICC*, 14-17 May, 2007: 588-593.
- [8] MAO M, YEUNG K L. Two-step routing for dynamic traffic protection in WDM networks with wavelength continuity constraint[C]. *IEEE High performance switching and routing (HPSR)*, 4-6 July, 2011: 178-182.
- [9] QIN Hao, ZHANG S, LIU Zeng-ji, *et al.* Optical multicast wavelength assignment algorithm for limited-range wavelength conversion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 856-860.
秦浩, 张爽, 刘增基, 等. 波长转换受限条件下的最优组播波长分配算法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 856-860.
- [10] LIU Huan-lin, XIE Yun-hui, LI Zhen, *et al.* Study on minimize network coding links based on immune algorithm for optical multicast network [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2011, **23**(4): 384-388.
刘焕淋, 谢芸徽, 李祯, 等. 基于免疫算法的光组播最少网络编码链路研究[J]. *重庆邮电大学学报*, 2011, **23**(4): 384-388.
- [11] SUN Y, QU Z, XING H, *et al.* Optical-layer multicast based on network coding[C]. *IET Advanced Intelligence and Awareness Internet (AIAD)*, 23-25 October, 2010, 13.
- [12] 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.
- [13] ZHOU Y F, YANG X L. Optimized RWA based on network coding for optical multicast trees [J]. *Journal of Application Research of Computers*, 2009, **26**(11): 4260-4262.