

光树分割和共享光路合并优化任多播阻塞率

刘焕淋¹, 杜君丹¹, 陈 勇², 杨玉明¹

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学自动化学院, 重庆 400065)

摘 要: 针对弹性光互联数据中心网络中任多播业务的频谱利用率低和带宽阻塞率高等问题, 论文提出了一种基于光树分割和共享光路合并算法. 该算法选择对光树最大长度和调制等级影响较小的树枝加入光树, 使生成光树频谱代价最小. 当光树传输所需频谱资源不足时, 该算法将光树分割为可选较高调制等级的多子光树传输, 提高频谱利用率. 当网络中有足够资源时, 设计一种基于链路共享度的将满足条件的子光树合并到光树上传输的机制以降低频谱消耗. 仿真结果表明: 论文所提算法具有较低的带宽阻塞率和较高的频谱利用率.

关键词: 弹性光网络; 任多播; 光树分割; 带宽阻塞率; 频谱利用率

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)07-1658-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.07.017

Tree-Split and Shared Lightpath-Merged for Optimization Bandwidth Blocking Probability of Multicast

LIU Huan-lin¹, DU Jun-dan¹, CHEN Yong², YANG Yu-ming¹

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;
2. School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In elastic optical inter-datacenter networks, for addressing the problems of lower spectrum utilization and high bandwidth blocking probability, an algorithm based on tree-splitting and shared lightpath-merged for multicast is proposed. The new branches having minimum influence on light-tree's maximal length and modulation level are selected to insert into the spanning light tree, making the cost of spectrum consumption minimal. For reducing bandwidth blocking probability, the light tree is split into several sub-light trees with higher modulation when bandwidth is insufficient for the multicast. When the adequate spectrum bandwidth is found, the scheme based on link-sharing degree is designed to merge the split sub-light trees on a light tree for reducing spectrum consumption. The simulation results show the proposed algorithm can get the lowest bandwidth blocking probability and highest spectrum utilization.

Key words: elastic optical networks; multicast; tree-splitting; bandwidth blocking probability; spectrum utilization

1 引言

近年来,随着云计算、大规模科学计算、以数据为中心的计算、交互式TV和3D游戏等的崛起和不断发展,数据中心间带宽需求不断增加,数据中心每年以32%的速度增长^[1]. 规模增长的数据中心间业务呈现高带宽和高动态等特性^[2,3]. 基于波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)的光网络带宽分配粒度为50GHz或者100GHz^[4,5],不适应数据中心网络中灵活多粒度业务需求,造成带宽阻塞和大量资源浪费. 基于光正交频分复用的带宽分配更加灵活的弹性光网络(Elastic Optical Networks, EONs)以超大容量、12.5或6.25GHz粒度、高能效等优势成为数据中心互联技术^[6,7].

在弹性光互联数据中心网络中,一个业务往往需要多数数据中心协同处理. 任多播(Multicast)可以从多个候选目的节点中选择资源有服务资源的多个数据中心服务^[8]. 文献[9,10]研究了WDM网络环境中静态任多播路由波长分配问题. 文献[11~13]研究了WDM网络环境中动态任多播的路由波长分配和能耗问题. 在EONs中,需要研究路由和调制等级分配问题,并根据调制等级和业务大小分配恰当的频谱资源^[14]. 文献[15]研究了EONs中多播(Multicast)光树生成和频谱有效性问题,提出频谱有效多播覆盖算法(Spectrum-Efficient Overlay Multicast, SEOM). SEOM算法选择距离离子光树最短树枝加入,使生成光树总长度最短. 文献[8]

收稿日期:2017-03-27;修回日期:2017-09-27;责任编辑:李勇锋

基金项目:国家自然科学基金(No. NSFC61275077, No. 61571072);重庆市基础与前沿研究计划(No. CSTC2015jcyjA40024)

研究了在弹性光互联数据中心网络中任多播业务的节能路由频谱分配问题,将文献[15]中光树生成方法应用到任多播中,提出能效任多播光树生成算法(Energy Efficient Multicast, EEM).与 SEOM 算法相比,EEM 算法生成光树时,选择能耗最小树枝加入光树,使生成光树能耗最小.文献[8,15]的光树生成方法能减少共享光路上频谱使用,但仅考虑新加入树枝距离光树的最短或能耗,没有考虑新树枝加入光树后对整棵树最大长度、信号调制等级和频谱消耗总数的影响,导致消耗较多频谱资源.同时,任多播业务动态到达与离开使光树不断建立与拆除,导致路径的频谱资源呈现频谱碎片化^[15,16],这些较小、孤立不连续的频谱碎片,难以满足后续业务带宽需求,增加网络带宽阻塞率.

为此,针对动态业务环境,论文提出了基于光树分割和共享光路合并的任多播阻塞率优化算法(Algorithm of Optimization Blocking probability for Multicast based on Splitting-tree and Merging Shared-Lightpath, AOB-M-SM)以降低任多播的带宽阻塞率和提高频谱资源利用率.

2 问题描述

弹性光互联数据中心网络拓扑为 $G(V, E)$, V 为节点集,网络中每个节点都具有 BV-WXC(Bandwidth-Variable Wavelength-Cross-Connect),实现信号上下路和对信号进行交叉连接, E 为链路集,链路的频谱资源容量为 B 频隙(Frequency Slot, FS).网络中有固定的多个数据中心能为业务提供服务,每数据目中心至少与网络中一个交换节点连接,连接数据中心的交换节点记为 V_{DC} .

任多播请求 $R(s, D_c, k, b)$ 中,源节点 $s, D_c = \{d_1, d_2, \dots, d_c\}$ 为一系列候选的数据中心,数据中心数目 c ,即 $c = |V_{DC}|$, k 为业务所需的数据中心数目,且 $k \leq c$,业务带宽请求为 b ,以频隙 FS 为单位.当 $k = 1$ 时, R 为任播;与多播相比,目的节点是根据网络中的资源情况动态选择;当 $k = c$ 时, R 为多播^[16].

任多播根据网络中的资源情况构建以源节点为根、各目的节点为树叶的光树 $T(V', E')$ 来实现.因此,当一个任多播业务 $R(s, D_c, k, b)$ 产生时,根据业务所需目的节点数目 k 将 D_c 中的候选目的节点进行分组并编号,每组 k 个目的节点,并将每组目的节点保存在集合 D 中;然后再分别建立从源节点到 D 中每组目的节点的候选光树.从 c 个候选目的数据中心选出 k 个为业务服务,在光树生成过程中,不同目的节点加入到光树的顺序不同,生成的光树也不同,因此进行目的节点的排列组合得到候选光树的数目一共 $m_1 = A_c^k$ 棵,然后再从候选光树中选择最优的光树传输业务.

为了从 $m_1 = A_c^k$ 棵候选光树中选出代价最小的最优光树,需要对光树代价进行精确度量,论文设计了光树

频谱消耗代价值 F ,如式(1)所示:

$$F = \left(\frac{b}{M \times r} + g \right) \times H \quad (1)$$

式中, M 为由光树最大传输距离确定的信号最高调制等级; r 为调制等级对应的单位频隙传输速率; g 为保护带宽,取 1FS; H 为光树的跳数. F 表示业务通过光树传输时需要消耗总频隙数, F 值越小,业务通过该光树传输消耗频谱资源就越少.

当网络负载较重,业务通过光树 $T(V', E')$ 传输难以找到合适频谱资源时,则将 $T(V', E')$ 分割为多棵较短子光树构成的光森林独立传输,可选较高调制等级,降低业务带宽阻塞率和提高频谱利用率^[17].光森林表示为 $T_{i,j}^n(V_{i,j}^n, E_{i,j}^n)$,其中 n ($n \leq k$) 为光森林中子光树数目, i ($i = 1, 2, \dots, C_k^n$) 为光森林编号, j ($j = 1, 2, \dots, n$) 为光森林中子光树编号.在光树分割为光森林过程中,首先根据光森林中子光树数目 n ,将光树目的节点 k 进行分组;然后再根据每组目的节点和光树的链路,将光树中相应链路添加到光森林中,生成候选光森林,共生成 $m_2 = C_k^n$ 棵候选光森林,再从 $m_2 = C_k^n$ 棵候选光森林中选出最优的光森林 $T_j^n(V_j^n, E_j^n)$ 传输任多播请求.

当光森林中子光树间有共同链路时,在共享光路上不同子光树需要占用不同的频谱资源,使共享光路上消耗的频谱资源增加,而共享光路也成为光森林成功传输的信息瓶颈.为此,论文提出了基于链路共享度的光森林合并光树传输机制.当网络中发现光树传输业务 $R'(s', SD_c', k', b')$ 服务结束释放足够带宽资源时,将具有相同源节点和可由相同数据中心提供服务的光森林 T_j^n 传输的业务 $R_j^n(s_j^n, SD_j^n, k_j^n, b_j^n)$ 合并后重配置到 R' 释放的光树上传输,进而减少光森林传输时子光树间共享光路上频谱消耗和保护间隔频谱消耗.为了选择共享链路上消耗频谱资源最多的光森林重配置,论文设计了如式(2)的链路共享度(Link-sharing Spectrum Consumption, LSC),表示共享光路上消耗频谱资源数占光森林消耗频谱资源总数的比值.

$$LSC = \frac{\sum_{m=1}^l \left(h_m \cdot \sum_{j=1}^n LF_{T_j} \right)}{\sum_{j=1}^n F_{T_j}} \quad (2)$$

式中, $\sum_{m=1}^l \left(h_m \cdot \sum_{j=1}^n LF_{T_j} \right)$ 为共享光路上消耗的频谱资源数, h_m 为第 m 段共享光路的链路数目,共有 l 段共享光路, $\sum_{j=1}^n LF_{T_j}$ 为子光树 T_j^n 在共享光路上消耗频谱数, $\sum_{j=1}^n F_{T_j}$ 为光森林中所有子光树消耗总频谱数. LSC 值越大,表明光森林中共享链路上消耗频谱资源越多,将 LSC 较大的光森林业务合并重配置到光树上传输,

减少频谱消耗就越多。

论文优化目标是在提高任多播频谱利用率的同时最小化网络带宽阻塞率(Bandwidth Blocking Probability, BBP)。

3 光树分割和共享光路合并的任多播阻塞率优化算法(AOB-M-SM)

3.1 AOB-M-SM 算法过程

AOB-S-SM 算法在路由阶段,根据 3.2 节最小频谱代价光树生成算法为任多播请求计算 $m_1 = A_c^k$ 棵候选光树后,根据式(1)计算各棵光树的 F 值,选出 F 值最小的最优光树进行频谱分配。如果业务通过光树传输没有合适的频谱资源,将光树优先分割为子光树传输;当发现网络有足够带宽资源时,根据 3.3 节将基于链路共享度的子光树合并到光树传输。AOB-M-SM 算法具体步骤如下所示:

输入:网络拓扑 $G(V, E)$, 请求 $R(s, D_c, k, b)$;

输出:带宽阻塞率 BBP。

步骤 1 如果任多播请求 R 到达,转步骤 2;如果任多播 R' 服务结束释放资源,则转步骤 13;

步骤 2 为 R 执行 3.2 节最小频谱代价光树生成算法,生成 $m_1 = A_c^k$ 棵候选光树,存入 $Tree$ 集合;

步骤 3 根据式(1)计算 $Tree$ 中每棵候选光树 F 值,候选光树根据 F 值由小到大进行排序,令 $x = 1$;

步骤 4 采用 FF(First Fit)频谱分配方法选择 F 值最小的候选光树进行频谱分配;

步骤 5 若分配成功,转步骤 1;否则, $x + 1$;

步骤 6 若 $x < m_1$,转步骤 4;否则,令 $n = 2$;

步骤 7 从 $m_1 = A_c^k$ 棵候选光树中选择 F 值最小光树分割为 $m_2 = C_n^k$ 棵包含 n 棵子光树的候选子光树 $T_{i,j}^n$,根据式(1)计算 $m_2 = C_n^k$ 棵候选子光树 F 值,各候选子光树按 F 值从小到大排序,令 $i = 1$;

步骤 8 选择 F 值最小的候选子光树分配频谱;

步骤 9 若子光树频谱分配成功,将子光树传输业务保存到集合 ST 中,转步骤 1;否则, $i + 1$;

步骤 10 若 $i < m_2$,转步骤 8,否则, $n + 1$;

步骤 11 若 $n < k$,转步骤 7;否则,阻塞请求;

步骤 12 若网络中所有业务传输全部结束,算法结束;否则,转步骤 1;

步骤 13 执行 3.3 节基于链路共享度的子光树合并光树传输机制。

3.2 最小频谱代价的光树生成算法

步骤 1 根据业务 R 所需目的节点数目 k 将 D_c 中候选目的节点分成 $m_1 = A_c^k$ 组并编号,存入集合 D 中;

步骤 2 依次从 D 中取出一组目的节点放入集合 G 中,并将该组目的节点从 D 中删除;

步骤 3 用 Dijkstra 算法计算源节点 s 到 G 中第一个目的节点 d_i 最短路径 p_i ,并将 p_i 加入子光树 T_s 中,将 p_i 上各节点加入 G' 集合,将 d_i 从 G 中删除 p_i ;

步骤 4 从 G 中剩余目的节点选择一个节点,计算该节点到 G' 中各节点最短路径 p'_i ,将 p'_i 依次加入子光树 T_s 中,生成多棵候选子

光树 T'_s ,令 $G' = \emptyset$;

步骤 5 根据式(1)计算各候选子光树 T'_s 的 F 值,并按 F 值从小到大进行子光树排序;

步骤 6 选择 F 值最小候选子光树 T'_s ,设 $T_s = T'_s$,将 T_s 上各节点加入 G' 集合,从集合 G 中删除 d'_i ;

步骤 7 若集合 $G = \emptyset$,转步骤 4;否则,转步骤 8;

步骤 8 将生成光树 T_s 加入光树 $Tree$ 中,令 $T_s = \emptyset$;

步骤 9 集合 $D = \emptyset$? 如果是,转步骤 2;否则,转至 AOB-M-SM 总算法的步骤 3。

3.3 基于链路共享度的子光树合并光树机制

步骤 1 判断服务结束业务 R' 是否通过光树传输? 如果不是,将 R' 从集合 ST 中删除,释放带宽资源,并转至 AOB-M-SM 总算法的步骤 1;

步骤 2 集合 $ST = \emptyset$? 如果是,则转步骤 3;否则,转至 AOB-M-SM 总算法的步骤 1;

步骤 3 根据式(2)计算集合 ST 中各子光树传输业务 R_j^n 的 LSC 值,并按 LSC 从大到小排序子光树;

步骤 4 优选 LSC 较大子光树传输业务 R_j^n ,如果 $s_j^n = s_{R'}$, $\sum_{j=1}^n k_j^n = k'$,且 $b_j^n \leq b_{R'}$,将 R_j^n 合并后重配置到同源节点和同数据中心的 R' 释放带宽光树上传,并转 AOB-M-SM 总算法步骤 1;若没有合适子光树传输业务 R_j^n ,转 AOB-M-SM 步骤 1。

4 算法仿真结果分析

为了验证论文所提算法带宽阻塞率和频谱利用率性能,仿真网络为 NFSNET 拓扑,如图 1 所示^[17],节点 2、4、7、9、11 与数据中心有本地连接,即 $D_c = \{2, 4, 7, 9, 11\}$, $c = 5$ ^[8]。光网络每条链路带宽 $B = 320FS$, $1FS = 12.5GHz$, $g = 1FS$,业务速率 $\{25, 50, 100, 200\} Gb/s$,按 1: 1: 1: 1 产生,业务数 10000 个,业务到达率服从 λ 指数泊松分布,服务时间服从 $1/\mu$ 负指数分布,负载 λ/μ (Erlangs)。对比算法为:最短路径-任多播光树算法(STP-Manycast)和频谱有效-任多播光树算法(SEO-Manycast)^[8,15]。

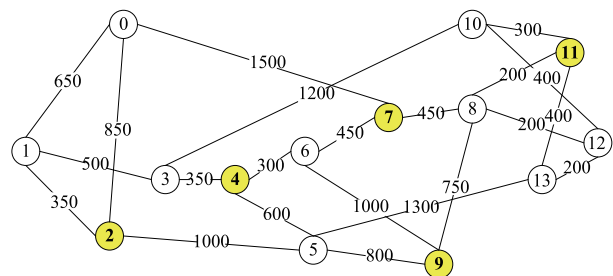


图1 NFSNET仿真网络

图 2 和图 3 表示论文所提 AOB-M-SM 算法的带宽阻塞率和频谱利用率与 k 值和负载关系。

从图 2 和图 3 可以看出:在低负载情况下 k 取不同值时带宽阻塞率和频谱利用率差别不大,随着负载逐

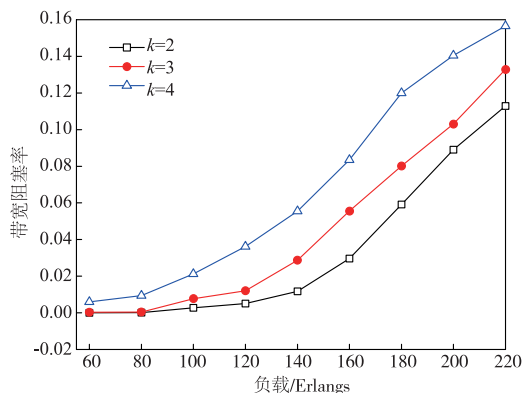


图2 带宽阻塞率与k值关系(AOB-M-SM算法)

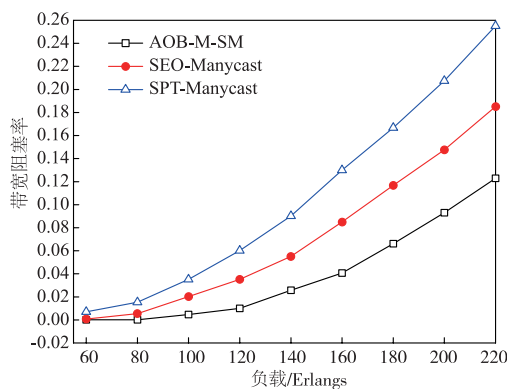


图4 带宽阻塞率与负载关系(k=3)

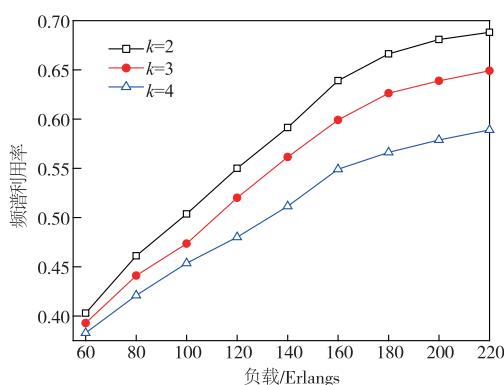


图3 频谱利用率与k值关系(AOB-M-SM算法)

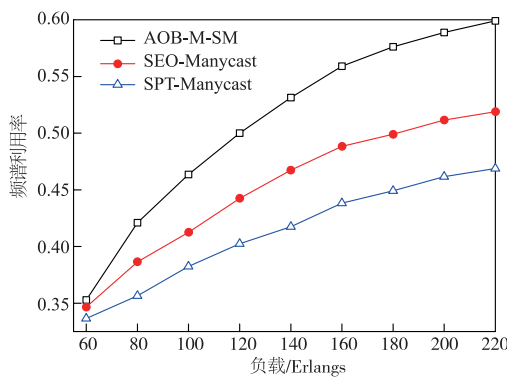


图5 频谱利用率与负载关系(k=3)

渐增加,带宽阻塞率和频谱利用率逐渐增加,而且差别逐渐增大.在相同负载下, k 越大,带宽阻塞率越高,频谱利用率越低.这是由于,随着业务所需目的节点数目 k 增加,传输业务所需光树就越大,长光树能选择的调制等级就越低,需要消耗的频谱资源就越多.而且,随着光树增大,不容易找到满足光路频谱连续性和一致性带宽资源,带宽阻塞率越大.因此,综合折中考虑业务阻塞率和频谱利用率,在下面仿真中,我们取 $k=3$.

在图4中,当负载较低时,3种算法获得的带宽阻塞率差别不大.随着负载逐渐增加,3种算法带宽阻塞率逐渐增加,阻塞率差别逐渐增大,论文所提 AOB-M-SM 算法始终具有最低带宽阻塞率.

在图5中,随着负载增加,三种算法的频谱利用率逐渐增加,而且频谱利用率差别逐渐增大,论文所提 AOB-M-SM 算法始终具有最高频谱利用率.

从图4和图5可知,论文所提 AOB-M-SM 算法与对比算法相比具有较低带宽阻塞率和较高频谱利用率,这是因为 AOB-M-SM 算法在路由阶段,通过使用最小频谱代价光树生成算法产生光树,业务在光树上传输时消耗频谱资源较少.在频谱分配阶段,当没有足够的频谱资源光树传输时,将光树分割为多棵较短的子光树,选择较高调制等级节约频谱消耗,子光树传输增加业务成功传输概率;此外,当有光树传输结束释放足够带宽时,将满足

链路共享的子光树合并后重新配置到已释放带宽的光树传输,可减少子光树间共享光路上频谱资源消耗. SEO-Manycast 算法比 SPT-Manycast 算法具有较低带宽阻塞率和较高频谱利用率,这是因为 SEO-Manycast 能够减少共同链路上的频谱资源消耗,节约了频谱资源,同时也避免了共同链路成为业务带宽阻塞的瓶颈.

5 总结

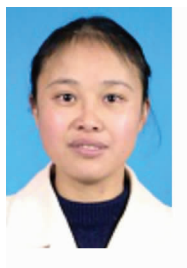
论文提出一种基于光树分割和共享光路合并的任多播阻塞率优化路由算法,通过频谱紧缺时分割任多播为多子光树和资源充足时合并共享光路的子光树传输,有效提高任多播传输的频谱利用率和降低带宽阻塞率.本文算法通过灵活的路由和频谱自适应分配能提高多数据中心协同处理任多播性能,有利于促进多数据中心协同多播应用发展.

参考文献

- [1] Fang W, Zeng M, Liu X, et al. Joint spectrum and IT resource allocation for efficient VNF service chaining in interdatacenter elastic optical networks[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(8): 1539-1542.
- [2] Bharti SK, et al. Sarcastic sentiment detection in tweets streamed in real time: a big data approach[J]. Digital

- Communications and Networks, 2016, 2(3): 97 – 107.
- [3] Lu P, Zhang L, et al. Highly efficient data migration and backup for big data applications in elastic optical inter-data-center networks[J]. IEEE Network, 2015, 29(5): 36 – 42.
- [4] 鲍宁海, 苏国庆, 陈静波. 恢复时间敏感的光网络混合通路保护算法[J]. 重庆邮电大学学报, 2017, 29(3): 313 – 319.
Bao NH, Su GQ, Chen JB. Recovery-time aware hybrid path protection algorithm in optical networks[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2017, 29(3): 313 – 319. (in Chinese)
- [5] Zhou H, Mao S, Agrawal P. Optical power allocation for adaptive transmissions in wavelength-division multiplexing free space optical networks[J]. Digital Communications and Networks, 2015, 1(3): 171 – 180.
- [6] Nogbou GA, Michel B, Ahmed D, et al. An efficient hybrid protection scheme with shared/dedicated backup paths on elastic optical networks[J]. Digital Communications and Networks, 2017, 3(1): 11 – 18.
- [7] Liu HL, Yin YR, Chen Y. Energy-efficient multicast traffic grooming strategy based on light-tree splitting for elastic optical networks[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 36: 374 – 381.
- [8] Fallahpour A, Beyranvand H, Salehi J A. Energy-efficient manycast routing and spectrum assignment in elastic optical networks for cloud computing environment[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(19): 4008 – 4018.
- [9] Zakouni A, Luo J, Kharroubi F. Random optimization algorithm for solving the static manycast RWA problem in optical WDM networks[A]. 2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)[C]. IEEE, 2016. 640 – 645.
- [10] 田相轩, 杨君刚, 车雅良, 等. 多域光网络中基于优先级的波长路由分配算法[J]. 电子学报, 2014, 42(4): 625 – 632.
- Tian XX, Yang JG, Che YL, et al. Priority based routing and wavelength assignment in multi-domain optical networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(4): 625 – 632. (in Chinese)
- [11] Schöndienst T, Plante J M, Davis D A P, et al. Energy source-aware manycast overlay in WDM networks[A]. Proceedings of 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)[C]. IEEE, 2013. 2400 – 2406.
- [12] Plante J M, Gadkar A, Vokkarane V M. Manycast overlay in split-incapable networks for supporting bandwidth-intensive applications[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(1): 342 – 354.
- [13] Plante J, Gadkar A, Vokkarane V. Dynamic manycasting in optical split-incapable WDM networks for supporting high-bandwidth applications[A]. Proceedings of 2012 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)[C]. IEEE, 2012. 856 – 860.
- [14] Christodoulopoulos K, Tomkos I, Varvarigos E A. Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(9): 1354 – 1366.
- [15] Liu X, Gong L, Zhu Z. On the spectrum-efficient overlay multicast in elastic optical networks built with multicast-incapable switches[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(9): 1860 – 1863.
- [16] Xuegong T. Low-cost routing for Manycast communication[A]. Proceedings of IEEE 11th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC)[C]. IEEE, 2013. 600 – 605.
- [17] Zheyu Fan, Yongcheng Li, Gangxiang Shen, Chun-Kit Chan. Distance-adaptive spectrum resource allocation using subtree scheme for all-optical multicasting in elastic optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(9): 1460 – 1468.

作者简介



刘焕淋 女, 1970 年生于重庆市. 重庆邮电大学通信与信息工程学院教授, 硕士和博士生导师, 研究方向为光通信网络和信号处理.
E-mail: liuhl2@sina.com



杜君丹 女, 1993 年生于湖北仙桃市, 硕士, 研究方向为数据中心光网络及路由算法.