

基于无色无向无冲突可重构光分插复用器节点的全光IP组播能效调度

刘焕淋^{*①} 方菲^① 陈勇^② 向敏^② 马跃^③

^①(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^②(重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室 重庆 400065)

^③(国网冀北电力有限公司信息通信分公司 北京 100053)

摘要: 为了提高无色无向无冲突灵活的可重构光分插复用器(CDC-F ROADM)节点的弹性光网络IP组播频谱-能耗效率, 该文提出一种全光组播能效调度算法(AMEESA)。在算法路由阶段, 考虑能耗和链路频谱资源使用情况设计链路代价函数, 构建最小代价光树算法组播光树。在频谱分配阶段, 设计基于高效光谱分辨率(HSR)光树中间节点频谱转换方法, 选择节能频谱转换方案为组播光树分配频谱块资源。仿真分析表明, 所提算法能有效提升网络能效, 降低IP组播带宽阻塞率。

关键词: 光组播; 无色无向无冲突灵活的可重构光分插复用器; 能效调度; 能耗; 带宽阻塞率

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)11-2571-07

DOI: [10.11999/JEIT180937](https://doi.org/10.11999/JEIT180937)

Energy-efficient Scheduling Algorithm for All Optical IP Multicast Based on Colorless, Directionless and Contentionless-Flexible Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer Node

LIU Huanlin^① FANG Fei^① CHEN Yong^② XIANG Min^② MA Yue^③

^①(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control, Ministry of Education, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^③(Information & Telecommunication Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100053, China)

Abstract: In order to improve multicast's spectrum energy-efficient of elastic optical network configured with Colorless, Directionless and Contentionless-Flexible Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer (CDC-F ROADM) nodes, an All-optical Multicast Energy Efficiency Scheduling Algorithm (AMEESA) is proposed. In the routing phase, considering both energy consumption and link spectrum resource utilization, the link cost function is designed to establish the multicast tree with the least cost. In the spectrum allocation phase, a spectrum conversion method based on High Spectral Resolution (HSR) is designed by changing the spectrum slot index of adjacent links according to links availability of spectrum blocks. And an energy-saving spectrum conversion scheme is selected to allocate spectrum block resources for the multicast tree. Simulation analysis shows that the proposed algorithm can effectively improve the network energy efficiency and reduce the bandwidth blocking probability of IP multicast.

Key words: Optical multicast; Colorless, Directionless and Contentionless Flexible Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer (CDC-F ROADM); Energy efficiency scheduling; Energy consumption; Bandwidth blocking probability

收稿日期: 2018-10-08; 改回日期: 2019-03-12; 网络出版: 2019-05-20

*通信作者: 刘焕淋 liuhl2@sina.com

基金项目: 国家电网总公司科技项目(52010118000Q)

Foundation Item: The Project of Science and Technology of State Grid Corporation of China (52010118000Q)

1 引言

面对智能电网调度配置、互联网直播平台、云计算、分布式大数据应用和视频流等IP数据组播业务的飞速增长,具有更小频谱粒度和调制格式可变的弹性光网络(Elastic Optical Networks, EONs)代替波长带宽固定的波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)光网络为IP组播等数据应用提供频谱灵活传输通道,满足IP组播高速率和高带宽需求^[1,2]。同时,为了满足不断增长的IP组播等数据应用需求,网络运营商不得不部署更多大容量网络设备和组播设备,规模化发展的网络硬件和带宽需求使网络能耗急剧增大,快速增加的网络能耗已成为制约光网络发展的主要因素。面对资源减少和全球气候变化压力,降低能源需求的IP组播类数据应用的能耗,成为实现信息通信技术产业可持续发展刻不容缓的问题^[3]。

在全光组播的弹性光网络中,网络中间交换节点需要具备支持IP组播复制-转发功能,配置如分光器、频谱转换器、交叉连接器等硬件设备,光组播节点结构对组播数据高效处理能力和网络能耗具有很大影响。文献[4]提出一种新型支持组播的光交叉连接(Multicast Capable-Optical Cross Connect, MC-OXC)结构,该结构能实现信号的并行多路分光处理和光信号的交叉连接。但是,该结构的成本较高,组播业务交换不灵活。文献[5]提出一种支持WDM单播的严格无阻塞的基于无色无向无冲突灵活的可重构光分插复用器(Colorless, Directionless and Contentionless-Flexible Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer, CDC-F ROADM)灵活多波长选择节点结构,但是该结构复杂和实现困难。文献[6]改进上述CDC-F ROADM为准无阻塞WDM节点结构并增加了多端口处理能力,降低节点的实现代价和复杂度,支持WDM单播数据处理。在支持单播的CDC-F ROADM结构中加入分光器就能实现组播功能,由于弹性光交换组网和调度方式对信号速率不敏感,可以支持高数据速率、灵活交换和多业务类型,还能消除电设备的带宽瓶颈和快速实现任意频谱的灵活、动态上下路。文献[7]提出一种基于广播选择型的CDC-F ROADM组播疏导灵活光网络节点架构,IP组播灵活上下路是通过灵活栅格波长选择开关(Wavelength-Selective Switch, WSS)、分光器和 $N \times N$ 的交换矩阵与转发器相连接而实现。但是该结构的分光器度数较大,信号损伤比较严重^[7]。文献[8]提出一种支持全光组播业务交换的CDC-F ROADM的EONs节点结构,引入多维

路由和带宽可变收发器(Bandwidth Variable-Transponder, BVT),优化节点转发器端口主用和备用共享池配置,节点结构能耗小,容量升级方便。文献[9]提出一种实现的高效光谱分辨率(High Spectral Resolution, HSR)的光电型干涉结构,通过对子载波的相干相消和叠加实现正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)信号的子波长级交换,但是该结构不支持波长转换的冲突解决机制。

同时,全光组播需要设计支持光组播路由建立、资源分配调度、冲突避免等功能的控制算法。随着全光组播网络业务量的增长以及光层设备的大量使用,网络能耗也随之增加,不同的资源分配策略带来的能耗也不同,全光组播网络资源的能效调度问题成为研究热点。为了达到节约网络能耗的目的,文献[7]在提出CDC-F ROADM节点结构基础上,设计一种采用辅助图疏导的基于序列元启发式贪婪汇聚(Greedy Clustering over Sequential Meta-Heuristics, GCSMH)算法,该疏导算法分别使用遗传算法和贪婪汇聚启发式算法处理组播路由和疏导问题,提高了频谱利用率,减小能耗及节点代价。但是,该算法受到转发器数目限制,导致光路中一些可能满足业务传输的频谱资源不能被充分利用,使组播阻塞率增加,且算法复杂度较高。文献[9]提出一种避免CDC-F ROADM节点内波长争用的静态IP组播启发式调度算法,可以降低节点转发器需求数目和静态组播的阻塞率,但是节点间资源争用和光路频谱不一致性的数据阻塞问题没有解决。文献[10]提出一种基于辅助图改进的动态组播点到多点光迹流量疏导方法,提高光路资源利用率,减少了组播请求阻塞率,但是增加了通道监控和服务的开销和通道开关能耗,增加了算法复杂度。文献[11]研究基于最小组播树的多播业务流量疏导、路由选择和频谱分配的启发式方法,业务疏导节约保护频谱消耗,可以提高EONs的频谱利用率和减少分光器的消耗,但同源同宿的组播疏导概率较低。文献[12]基于CDC-F ROADM灵活光网络架构,提出一种能量感知路由频谱分配(Energy Aware Routing Spectrum Assignment, EARSA)算法,在路由选择阶段,将能耗作为链路代价构建光树,但是该算法未考虑网络中链路的频谱资源对路径和资源分配的影响,导致网络中产生大量频谱碎片,业务阻塞率较高。

本文在基于高效光谱分辨率(HSR)的CDC-F ROADM全光组播交换节点结构基础上,为了提高组播能效和降低带宽阻塞率,提出一种全光组播能

效调度算法(All-optical Multicast Energy Efficiency Scheduling Algorithm, AMEESA)。

2 基于HSR的CDC-F ROADM全光节点结构及组播传输能耗模型

2.1 基于HSR的CDC-F ROADM节点结构

文献[8]提出支持全光组播交换的基于HSR的CDC-F ROADM节点结构,如图1所示,由1个 N 维路由选择型CDC-F ROADM和 $2N$ 个 $1 \times N$ 的灵活栅格WSS组成,包括控制模块、直通模块和上下路交换模块。直通模块直接通过输入和输出端的WSS实现,实现信号的并行快速直通传输;上下路交换模块是由基于硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCoS)的HSR处理器和带宽可变收发器(BVT)共同组成。图1所示的节点结构以较小成本能够实现按需升级扩容而不影响已存在的业务传输。当组播业务经过节点时,无冲突的直通业务通过WSS对即可实现传输,能耗值相对较小;而冲突的组播业务在HSR调度处理时通过BVT上、下路疏导需要消耗额外的能耗。

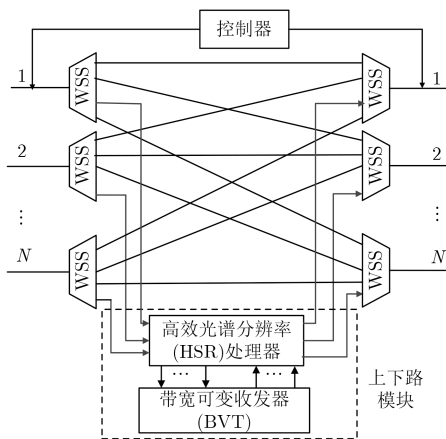


图1 CDC-F ROADM光交换组播节点结构

2.2 基于HSR的全光上下路和频谱转换模块

文献[9]研究一种新型基于HSR拓展的干涉结构,该结构基于LCoS的全光干涉和HSR处理器实现OFDM信号的全光上下路和频谱转换。如图2所示,选取其中一对输入、输出端口为例,组播请求进入节点结构时,经输入端WSS可选择直通和分光器处理,经过分光器复制为多个光组播业务,如4个分枝(A, B, C, D)干涉结构完成组播交换。当组播通过分枝A后,缓存等待与分枝C和分枝D干涉后的信号再次进行干涉,形成新的信号输出。另一份组播业务进入分枝B和分枝C进行处理,进入分枝B的一部分信号经时钟校准同步后形成D分枝信号,另外一部分信号经放大后首先通过快速傅里叶

变换(Fast Fourier Transform, FFT)处理器,实现精细滤波,滤除无需处理子载波,选择需要下路的信号输出。分枝C子载波信号经过同步处理后,再通过快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)处理器进行波形整形,经掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)进行再放大输出,与分枝D中上路的信号干涉形成一个新的子载波信号,再与过分枝A的信号干涉形成一个新的信号输入WSS合波输出。HSR不仅能实现组播在节点的灵活上下路,还可通过分枝C实现业务在节点的频谱转换功能。为了提高组播资源分配成功概率,在网络节点配置HSR能对组播进行频谱转换,降低组播阻塞率。与基于配置BVT的弹性光交换节点结构相比,基于HSR的节点结构容易实现,成本低且能耗较小[13]。

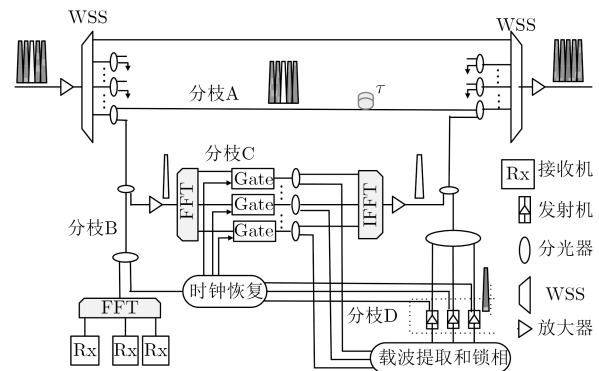


图2 基于HSR的全光上下路和频谱转换模块

2.3 组播传输能耗模型

在基于CDC-F ROADM节点结构的全光组播网络中,网络传输能耗主要是光层设备,包括节点能耗,以及光路传输相关的光放大器能耗,节点能耗包括CDC-F ROADM能耗和BVT能耗。本文采用文献[14]的能耗模型,由于弹性光网络技术还未成熟,其使用的相应器件的能耗只能与现有的器件进行对比评估。设光网络拓扑由 $G(V, E)$ 表示, V 表示网络中的节点集合, E 表示链路集合,则业务传输的总能耗为

$$P_T = \sum_{n \in V} P_n + \sum_{(i,j) \in E} P_M^{i,j} \quad (1)$$

$$P_n = P_R + P_V \quad (2)$$

$$P_R = N \times 20 + \beta \times 100 - 1.2(N + \beta - 1) \quad (3)$$

$$P_V = N_0 \times P_S = \left\lceil \frac{b}{C_S} \right\rceil P_S \quad (4)$$

$$P_M^{i,j} = m \times P_{OA} = \left(\left\lceil \frac{L_{i,j}}{80} \right\rceil + 2 \right) \times P_{OA} \quad (5)$$

其中, P_T 为业务传输的总能耗, 包括每个节点能耗 P_n 和所有链路 (i, j) 上放大器能耗 $P_M^{i,j}$ 。节点能耗包括CDC-F ROADM的能耗 P_R 和BVT能耗 P_V 。 N_0 为所需子载波数目。 P_S 为对应调制格式下单个子载波的能耗。 b 为子载波数目, C_S 为单个子载波传输容量。 m 表示第 (i, j) 条链路上放大器个数。 $L_{i,j}$ 为链路 (i, j) 长度。 P_{OA} 为单个放大器能耗, N 为网络拓扑中节点度数, β 为该节点的业务数。光纤路径上每隔80 km放置1个放大器, 每个放大器能耗额外开销为140 W。文献[15]对OFDM转发器的能耗与传输速率之间的关系进行评估, 如式(5)所示, 从而可以得到不同调制格式下单子载波的能耗, 如表1所示。

表 1 不同调制格式下单频隙的传输速率、能耗和最大距离

调制格式	传输速率(Gb/s)	能耗(W)	最大距离(km)
BPSK	12.5	112.374	4000
QPSK	25.0	133.416	2000
8QAM	37.5	154.457	1000
16QAM	50.0	175.498	500
32QAM	62.5	196.539	250

在弹性光网络中, 组播业务选择不同的路径路由时, 由于路径的长度不同, 选择调制格式也不相同, 使发射机的能耗不同。通常情况下, 业务调制格式越高, 单位频隙资源传输的数据量也越大, 传输单位数据的能耗相应越少。然而, 在高调制格式的星座图中, 节点间的欧式距离较短, 相应的抗干扰能力较差, 为了保证业务的传输质量, 较高等级的调制格式对应的传输距离会变短。因此, 路由、节点调制格式都影响转发器的能耗和光路资源消耗, 有效的路由资源调度策略有利于节约能耗和提高频谱利用率。

3 基于HSR的CDC-F ROADM节点的全光组播网络节能调度策略

3.1 全光组播网络节能调度

基于HSR的CDC-F ROADM节点能实现组播的频谱转换和灵活上下路传输, 但是组播路由、调制格式、频谱分配对网络能耗和性能影响需要进一步优化。

对于组播请求 $R_k=(s_k, D_k, w_k)$, s_k 为第 k 个业务源节点, D_k 为第 k 个业务目的节点集合, w_k 代表第 k 个业务所需带宽资源, 含 n 个组播目的节点集合 $D_k=\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, 组播不分割传输的约束条件为

$$\sum_{j \in V} W_{i,j}^{s,d} - \sum_{j \in V} W_{j,i}^{s,d} = \begin{cases} 1, & i = s \\ -1, & i = d, \forall i, s, d \\ 0, & i \neq s, d \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{k=1} \sum_{s \in V} \sum_{d \in V} W_{i,j}^{s,d} \cdot w_k \leq \sum_{k=1} Y_{i,j} \cdot B_k \leq C_{i,j}, \forall i, j \quad (7)$$

其中, $W_{i,j}^{s,d}$ 和 $W_{j,i}^{s,d}$ 都是布尔变量, $W_{i,j}^{s,d} = 1$ 或 $W_{j,i}^{s,d} = 1$ 分别表示组播从源点 s 到目的节点 d 需经过链路 (i, j) 或链路 (j, i) 传输, 否则他们取0。 $Y_{i,j}$ 代表链路 (i, j) 上光路数目, B_k 表示组播 $R_k=(s_k, D_k, w_k)$ 在链路 (i, j) 上需要分配的带宽, $C_{i,j}$ 表示链路 (i, j) 容量。式(6)是流守恒约束, 式(7)是流量有限性约束。

在组播请求路由阶段使用最小代价光树算法确定组播路由, 综合考虑网络能耗和链路带宽资源使用情况设计链路代价函数 $C_{i,j}$, 利用代价函数 $C_{i,j}$ 为源节点到某一目的节点计算一条最小代价的路径, 将该路径加入组播光树中, 并删除该目的节点。然后依次为剩下的目的节点计算该目的节点到光树的最小代价路径, 并将该路径增枝到光树中, 最终得到代价最小的光树就是该组播路由。其中, 链路代价 $C_{i,j}$ 定义为

$$C_{i,j} = (P_A^{i,j} + P_R^*) \left(1 - \frac{FS_{\text{Max}}^{i,j}}{FS_T^{i,j}} \right) (1 - \delta) \quad (8)$$

其中, P_R^* 表示新加入光树中的CDC-F ROADM节点能耗。 $FS_{\text{Max}}^{i,j}$ 是链路 (i, j) 上最大空闲频隙数, $FS_T^{i,j}$ 是链路 (i, j) 的总频隙数, $\delta=1$ 表示现有光树中已存在链路 (i, j) , $\delta=0$ 表示现有光树中不存在链路 (i, j) 。

3.2 基于HSR的CDC-F ROADM节点的全光组播节能调度策略

基于HSR的CDC-F ROADM节点结构, 本文提出一种AMEESA。AMEESA在为组播构建光树时, 联合考虑网络能耗和链路上可用的频谱资源, 使用最小代价光树算法生成代价最小的光树作为组播路由; 在资源调度阶段, 使用首次命中(First Fit, FF)方法为业务分配频谱资源; 如果失败, 则根据光树中链路的频谱资源使用情况, 如果通过节点的频谱转换能成功传输组播, 则选择节点进行频谱转换, 并为组播分配频谱资源; 否则, 阻塞组播请求。AMEESA算法的步骤详见表2。

4 仿真性能与分析

4.1 仿真环境及评价指标

为验证算法性能, 设组播请求的源-目的节点随机产生, 组播请求服从泊松分布, 到达率为 λ , 服务持续时间服从均值为1的负指数分布。每条光纤有358个频隙, 频谱间隔12.5 GHz, 业务保护带宽12.5 GHz, 业务请求大小从10~200 Gb/s均匀分

表2 AMEESA算法

输入：光网络拓扑$G(V, E, S)$，节点集$V = \{v_i i = 1, 2, \dots, V \}$，节点端口数$N$，链路集$E = \{e_{ij} i, j \in V, i \neq j\}$，链路频隙集$S = \{s_i i = 1, 2, \dots, S \}$，组播集$R = \{R_k k = 1, 2, \dots, R \}$，其中组播请求$R_k = (s_k, D_k, w_k)$，$s_k$为第$k$个业务源节点，$D_k$为第$k$个业务目的节点集合，$w_k$代表第$k$个业务所需频谱带宽，设变量$k=1$； 输出：各组播的传输光树和路径上频隙索引起止编号，网络能耗P_T； (1) 判断集合R是否空？如果是，则转到步骤(12)，如果不是，处理第k个组播请求$R_k = (s_k, D_k, w_k)$； (2) 初始化组播R_k光树集合$T_k = \emptyset$，使用式(8)更新网络拓扑中每条链路的代价； (3) 在D_k中任取一个目的节点d_j，使用Dijkstra算法为组播计算一条从源节点s_k到d_j的最小代价路径$P_{k,j}$；并将$P_{k,j}$加入组播光树T_k中，更新业务R_k目的节点集合$D_k = D_k - d_j$； (4) 判断目的节点集合D_k是否为$\emptyset$，如果是，转步骤(5)；否则，返回至步骤(3)； (5) 根据组播光树T_k大小，在距离物理损伤约束下基于HSR为组播选择最佳的调制等级，并计算组播R_k所需频隙数n，确定频隙索引起止编号； (6) 统计光树T_k中所有链路的空闲频谱资源，判断是否有频隙块满足组播的带宽需求，若有，转步骤(7)；否则，跳至步骤(8)； (7) 为组播R_k建立光树连接，使用FF方法为组播R_k分配频谱，计算网络总能耗P_T，转步骤(11)； (8) 根据光树中所有链路的空闲频谱情况，判断组播是否可通过HSR在光树中间节点频谱转换满足带宽分配需求，若可以，则转步骤(9)；否则，阻塞该组播请求，$k = k + 1$，返回步骤(1)，处理下一个组播； (9) 将链路上满足组播请求的频谱资源从小到大排序，如果频隙块大小相同，再按照频隙块的起始索引值大小由小到大排序；确定频谱不一致的光树中间节点进行频谱转换，选择频谱起始索引值小的频隙块分配给组播光树，并计算网络能耗P_T，选择使得网络能耗最小的中间节点频谱转换方案； (10) 若经中间节点频谱转换的组播频谱分配成功，转步骤(11)；否则，阻塞组播，$k = k + 1$，转步骤(1)； (11) 组播R_k路由和频谱分配成功，记录光树T_k和各链路上频隙分配的起止频隙编号，网络能耗P_T； (12) AMEESA算法结束，输出各成功传输组播的路由光树、频谱分配和网络能耗。

布，组播分光复制数为2，放大器间距离为80 km^[14]。信号调制格式根据路由长度的最大距离由表1确定。仿真拓扑为24个节点43条链路的USNET网络和14个节点21条链路的NSFNET网络^[12]，其中NSFNET网络的平均目的节点数目为3，USNET的为5，节点结构如图1所示^[8]。本文在上述2种网络拓扑下，为了验证本文所提AMEESA的带宽阻塞率和能效性能，对比采用相同节点结构的GCSMH^[7]和EARSA^[12]算法。其中，网络能效为网络中成功传输的数据量与总能耗的比值，网络传输总的数据量为每个组播传输数据量之和。

4.2 仿真结果分析

图3和图4分别表示3种算法在基于HSR的CDC-F ROADM节点结构的不同网络场景下带宽阻塞率性能。从图3和图4可以看出，随着网络负载增加，

网络中可用资源更加紧缺，组播带宽阻塞率随之增加。在相同负载下，AMEESA算法的带宽阻塞率相比其它算法更低。这是因为AMEESA算法在为组播构建光树时，综合考虑网络中能耗和链路资源使用情况，而不是直接考虑能耗最小的光树，避免了由于能耗最小光树不满足业务传输所需频谱带宽，从而使光路不可用带来的业务阻塞。同时，AMEESA算法还考虑了光树所有链路中可用的频谱资源，当链路上有空闲的频谱资源满足业务传输需求，但是不满足路径上频谱一致性约束时，可通过HSR在中间节点进行频谱转换，使业务成功传输概率大大提高。对比2种拓扑的阻塞性能发现，当负载相同时，业务在NSFNET网络中的阻塞率比USNET网络中的低。这是因为虽然USNET网络节点度数较大，但是其平均目的节点数目较大，且业

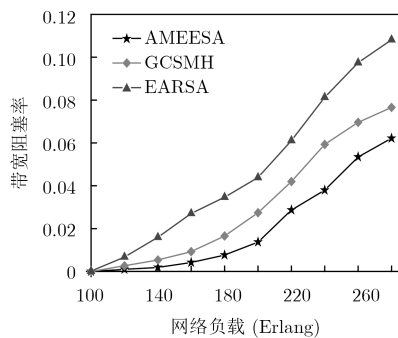


图3 不同负载条件下NSFNET网络中的带宽阻塞率

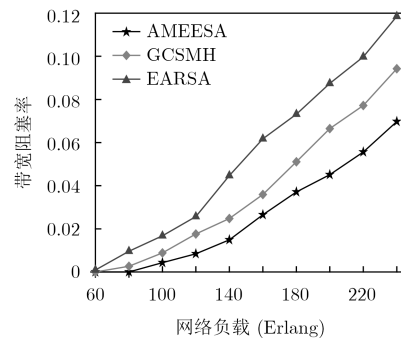


图4 不同负载条件下USNET网络中的带宽阻塞率

务的源-目的节点之间路径平均跳数较大,故组播在USNET网络中更容易被阻塞。

图5和图6分别表示3种算法在基于HSR的CDC-F ROADM节点结构不同网络场景下网络能效随负载的变化情况。从图5和图6可以看出,相同负载下AMEESA算法网络能效最好。这是因为AMEESA算法相比对比算法,联合考虑网络能耗和链路上可用的频谱资源,并通过HSR在节点的频谱转换降低阻塞,从而提高了网络的能效。当网络负载较低时,网络的能效都随负载的增加而上升;随着负载的继续增加,在相对较高负载的情况下,网络的能效随负载增加而逐渐降低。这是因为,低负载情况下,网络中大部分组播都能找到光树和可用频谱块成功传输,而且3种算法均对网络能耗进行了优化,网络中链路和节点的能耗都有所降低,从而提升了能效。但是,随着负载的持续增加,一方面网络节点和链路可用资源越来越少,成功传输的组播越来越少;另一方面,数据量的增加消耗了节点更多的转发器能耗,导致网络的能耗增加,从而使得能效随着负载增加反而逐渐降低。对比2种拓扑下的能效性能发现,当负载相同时,组播在NSFNET网络中的能效比USNET网络中的高。这是因为组播在NSFNET网络中成功率高于在USNET网络,且由于组播在NSFNET网络中建立路由比USNET路由的平均跳数少,节点的转发器能耗占比就比较小,因此组播在NSFNET网络中传输的能效较高。

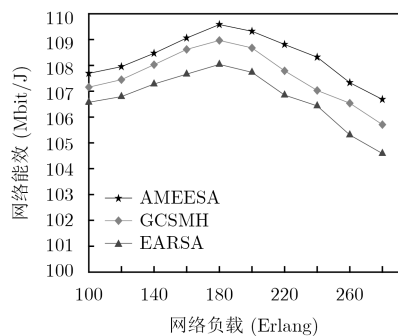


图5 不同负载条件下NSFNET网络中的能效

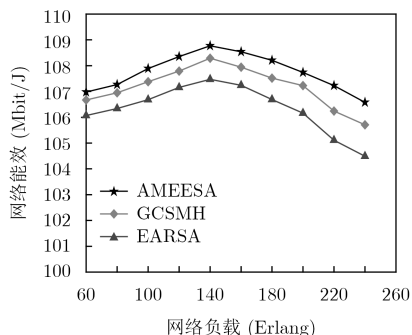


图6 不同负载条件下USNET网络中的能效

5 结束语

基于HSR的CDC-F ROADM弹性光组播节点结构,本文提出一种全光组播能效组播调度算法(AMEESA)。AMEESA算法考虑组播传输中的能耗和链路频谱消耗,为组播请求构建光树,并结合HSR特点对光树频谱分配不满足频谱一致性约束时,选择光树中间节点进行频谱的调制格式转换,灵活地为组播分配频谱资源,降低组播请求的阻塞率。随着互联网应用的发展,在灵活的光交换节点进行信号处理提高数据成功传输概率和节约业务传输能耗,对推动互联网节能高效传输意义重大。

参考文献

- [1] 鲍宁海, 刘翔, 张治中, 等. WDM节能光网络中的抗毁保护算法研究[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2012, 24(3): 278-282. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.03.002.
BAO Ninghai, LIU Xiang, ZHANG Zhizhong, et al. Survivable protection algorithm in WDM energy-efficient optical network[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2012, 24(3): 278-282. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.03.002.
- [2] 刘焕淋, 熊翠连, 陈勇. 频谱效率优先的任播路由冲突感知的弹性光网络资源重配置[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(7): 1697-1703. doi: 10.11999/JEIT161093.
LIU Huanlin, XIONG Cuilian, and CHEN Yong. Collision-aware reconfiguration resource based on spectrum efficiency first for anycast routing in elastic optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(7): 1697-1703. doi: 10.11999/JEIT161093.
- [3] 熊余, 刘川波, 孙鹏. 考虑业务服务质量的光线路终端节能算法[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2017, 29(2): 208-215. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2017.02.011.
XIONG Yu, LIU Chuanbo, and SUN Peng. Energy saving algorithm for optical line terminal considering quality of service[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2017, 29(2): 208-215. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2017.02.011.
- [4] HAMZA H S. Convert-and-deliver: Convert-and-Deliver: A scalable multicast optical cross-connect with reduced power splitting fan-out[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2012, 62(3): 1189-1212. doi: 10.1007/s11227-011-0565-9.
- [5] PASCAR L, KARUBI R, FRENKEL B, et al. Port-reconfigurable, wavelength-selective switch array for colorless/directionless/contentionless optical add/drop multiplexing[C]. The International Conference on Photonics in Switching, Florence, Italy, 2015: 16-18, doi: 10.1109/PS.2015.7328938.
- [6] ZONG Liangjia, ZHAO Han, YAN Yunfei, et al. Demonstration of quasi-contentionless flexible ROADM

- based on a multiport WXC[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2016, 8(7): A141–A151. doi: 10.1364/JOCN.8.00A141.
- [7] PATEL A N, JI P N, JUE J P, *et al.* Multicast traffic grooming in flexible optical WDM networks[C]. SPIE Conference on Optical Metro Networks and Short-Haul Systems V, San Francisco, USA, 2013: 864605. doi: 10.1117/12.2004327.
- [8] YANG Haining, ROBERTSON B, WILKINSON P, *et al.* Low-cost CDC ROADM architecture based on stacked wavelength selective switches[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(5): 375–384. doi: 10.1364/JOCN.9.000375.
- [9] SYGLETOS S, FABBRI S, FERREIRA F, *et al.* All-optical add-drop multiplexer for OFDM signals[C]. The International Conference on Transparent Optical Networks, Budapest, Hungary, 2015: 1–4. doi: 10.1109/ICTON.2015.7193525.
- [10] LIN H and ZHUANG Yuanxi. An algorithm for dynamic multicast traffic grooming in light-trail optical WDM mesh networks[C]. The International Conference on Computing, Networking and Communications, Maui, USA, 2018: 134–138. doi: 10.1109/ICCNC.2018.8390292.
- [11] LIU Huanlin, YIN Yarui, and CHEN Yong. Energy-efficient multicast traffic grooming strategy based on light-tree splitting for elastic optical networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 36: 374–381. doi: 10.1016/j.yofte.2017.05.014.
- [12] PAPANIKOLAOU P, SOUMPLIS P, MANOUSAKIS K, *et al.* Minimizing energy and cost in fixed-grid and flex-grid networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(4): 337–351. doi: 10.1364/JOCN.7.000337.
- [13] RUDNICK R, TOLMACHEV A, SINEFELD D, *et al.* Sub-GHz resolution photonic spectral processor and its system applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(11): 2218–2226. doi: 10.1109/JLT.2016.2647710.
- [14] TANAKA T, INUI T, KADOHATA A, *et al.* Multiperiod IP-over-elastic network reconfiguration with adaptive bandwidth resizing and modulation[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2016, 8(7): A180–A190. doi: 10.1364/JOCN.8.00A180.
- [15] VIZCAÍNO J L, SOTO P, YE Y B, *et al.* Differentiated quality of protection: an energy-and spectral-efficient resilience scheme for survivable static and dynamic optical transport networks with fixed-and flexible-grid[J]. *Optical Switching and Networking*, 2015, 19: 78–96. doi: 10.1016/j.osn.2015.03.006.
- 刘焕淋：女，1970年生，教授，研究方向为光通信及网络。
- 方 菲：女，1995年生，硕士生，研究方向为光网络能效调度。
- 陈 勇：男，1963年生，教授，研究方向为光传感检测。
- 向 敏：男，1974年生，教授，研究方向为智能电网。
- 马 跃：男，1977年生，高级工程师，研究方向为电力通信。