

光传送网中路由与子载波调制方式分配联合优化方法

许世纳,施展

(广东电网有限责任公司 电力调度控制中心,广州 510000)

摘要: 为了进一步降低光传送网所有通信链路所消耗的总功率,将路由选择问题和子载波调制方式分配问题进行联合优化。建立了以降低网络总功耗为目标的路由选择与子载波调制方式分配联合优化问题的整数线性规划模型,设计了求解该路由选择和子载波分配联合优化问题的算法及程序。以南方某省电网通信网为例,验证了算法所给出结果的最优性。

关键词: 光传送网;弹性光网络;子载波分配;整数线性规划

中图分类号: TN929.11;TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)05-0054-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.05.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Joint optimization method of routing and subcarrier modulation scheme allocation in optical transport networks

XU Shina, SHI Zhan

(Power Dispatch and Control Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to make further decrease in the total power consumed by all the communication links in an optical transport network, the problems of route selection and modulation schemes allocation for subcarriers are jointly considered. With the objective to minimize the total power consumed by the whole communication network, an integer linear programming model is set up for joint optimization of routing and subcarrier modulation scheme allocation. An algorithm with corresponding program have been designed to solve the problem. Take the communication network of a southern province's power grid as an example, the optimal nature of the results given by the method is shown by experiments.

Key words: optical transport network; elastic optical network; subcarrier allocation; integer linear programming

0 引言

目前,在满足各端到端节点间通信需求的条件下尽量降低全部链路的总功耗是对弹性光网络(EON)进行规划、设计与管理时面临的一个重要课题。文献[1]对 EON 中的路由、调制阶数和载波分配问题进行了研究,限于计算复杂性考虑,对每个端到端通信仅提供一条路由,并以节约频谱作为主要目标。文献[2]针对 EON 面临的子载波数及调制方式分配问题进行了研究;陈振辉等人针对该文采用的算法存在的不足之处,提出了一种基于整数线性规划(ILP)的子载

收稿日期:2018-11-19。

作者简介: 许世纳(1988-),男,硕士,2017年毕业于北京邮电大学信息与通信工程专业,研究方向为光通信技术及其在电力通信传送网领域的应用研究,现从事于电力通信网光传输层系统相关工作,主要参与ASON及OTN网在电力通信领域的业务应用研究及系统架构设计。



波数及调制方式分配算法^[3]。由于文献[3]是基于先选定路由后再为每个端到端流量对进行子载波数及调制方式分配的,使得子载波数及调制方式分配的结果受路由选择的限制。这种将路由选择和子载波数及其调制方式选择进行割裂的方法,限制了全网子载波数及其调制方式分配的可行解的范围,难以保证分配结果的最优性。鉴于此,本文在文献[3]的基础上,对路由选择和子载波及其调制方式分配联合优化的问题进行研究,以期降低 EON 通信链路的总功耗。

1 联合优化问题建模

文献[3]研究的 EON 子载波数及调制方式分配问题,是基于每个端到端的信息流沿着一条优选的固定路由这一前提条件的,这样就将路由选择与子载波数及其调制方式分配问题互相隔离,限制了子载波数量及其调制方式分配的可行解的范围,难以保证所得解的最优性。为了打破这一限制,以实现路由与子载波

数及其调制方式分配的联合优化,本文对文献[3]所建立的子载波数及其调制方式分配优化模型进行拓展,具体如下:

①拓展决策变量。用 M 表示 EON 中可采用的调制阶数,文献[3]中的决策变量是为每个端到端流量对指定一个 M 元组 $(n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{iM})$, 其中,每个元素代表为第 i 个流量对的各调制方式分配的子载波数。为了进行路由与子载波数量及其调制方式的联合优化,我们先按第3节所述的穷举法找出该流量对的所有可能路由,并需要为每个可能路由分配子载波及调制阶数。记该流量对的可能路由数为 N_i , 则该第 i 个端到端流量对进行子载波数及调制阶数分配的向量扩展为一个含 $N_i \times M$ 个元素的向量。即 $X_i = (n_{i11}, n_{i12}, \dots, n_{i1M}, n_{i21}, n_{i22}, \dots, n_{i2M}, \dots, n_{iN_i1}, n_{iN_i2}, \dots, n_{iN_iM})$ 。其中, n_{ijk} 表示第 i 通信对的第 j 路由使用第 k 类调制方式的载波数量, $i \in \{1, 2, \dots, N_t\}$, $j \in \{1, 2, \dots, N_{ri}\}$, $k \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。类似于文献[3],仍将有流量需求的节点对数目用 N_t 表示,网络中的链路数用 N_l 表示。

②拓展用于体现每条链路所承载的每个流量对所含的每个路由及每种子载波调制方式所消耗的功率的矩阵。该矩阵含 N_l 行、 $M \times \sum_{i=1}^{N_t} N_{ri}$ 列,将其记为 A_l 。矩阵 A_l 的每一行对应一条链路 l , 它记录了每个流量对 j ($j=1, 2, \dots, N_t$) 的每个可能路由 p ($p=1, 2, \dots, N_{ri}$) 的每个子载波 k 的信号是否经过链路 l 以及该子载波消耗的功率。 A_l 可分为 N_l 个列块,每个列块对应一个流量对,并且该列块还可根据该流量对的可选路由数划分为相应数量的子列块,每个子列块含 M 列。如果第 j 流量对的第 p 路由经过链路 l , 则 A_l 的第 i 行与其第 j 个列块的第 p 个子列块交叉线上的 M 个元素,就是每个相应子载波消耗的功率,否则,该相邻 M 个元素都为 0。这样,若将矩阵的第 i 行与由各源-目的对子载波分配向量 X_n ($n=1, 2, \dots, N_t$) 构成的 $M \times \sum_{i=1}^{N_t} N_{ri}$ 元列向量 $X = (X_1, X_2, \dots, X_{N_t})'$ 相乘,所得即为链路 l 所消耗的电功率。类似于文献[3],将扩展所得的 A_l 逐行相加,得到一个 $M \times \sum_{i=1}^{N_t} N_{ri}$ 元行向量 h_s , 而将 h_s 与列向量 X 相乘即得所有链路的总功率:

$$P_{EON} = h_s \times X \quad (1)$$

式 (1) 表明, EON 中所有链路消耗的总功率 P_{EON} 是所有决策变量的线性函数。

下面再分析联合优化问题的约束条件。

与文献[3]不同,因为端到端容量需求约束是根据各流量对间的业务需求提出的,在联合优化的情况下,该类约束条件可表示为:

$$n_{i11}c_1 + n_{i12}c_2 + \dots + n_{i1M}c_M + \dots + n_{iN_i1}c_1 + n_{iN_i2}c_2 + \dots + n_{iN_iM}c_M \geq D_l, \quad l=1, 2, \dots, N_l \quad (2)$$

其中, $c_1, c_2, \dots, c_M$ 表示各种调制方式相应的传输速率, D_l 表示第 l 个流量对的传输容量需求, $n_{iN_iM}c_M$ 与 n_{ijk} 定义相同。

与文献[3]类似,联合优化问题也要受链路容量限制条件的约束,仍将该类约束表示为矩阵形式:

$$B_l \times X \leq b_0 \quad (3)$$

其中, B_l 是一个含 N_l 行、 $M \times \sum_{i=1}^{N_t} N_{ri}$ 列的矩阵。其结构类似于前面的 A_l 。将 A_l 中由各调制方式的功率构成的子列块改成由相应的容量 $k \times 12.5 \text{ Gb/s}$ 构成的子列块即得到拓展的 B_l , $k=1, 2, \dots, 6$ 。 b_0 是由网络中各光纤链路的容量所构成的 N_l 元列向量。

目前的光纤容量研究情况表明:任何一条光纤可用子载波总数不超过 320。同时考虑到波长对信号所经所有链路要满足连续性限制,该条件可表示为:

$$X \times E \leq 320 \quad (4)$$

其中, E 是与 X 同规模的全为 1 的元素构成的列向量。此外,类似于文献[3]的分析,波长连续性限制已在模型中得到体现,不需要增加其它表达式。

综上分析可知,以通信链路消耗总功率最小化为目标的 EON 路由与子载波数量及调制方式分配联合优化问题,因其目标函数及约束条件均为决策变量的线性表达式,可归结为整数线性规划问题,通常用割平面法^[3]结合单纯形法求解线性整数规划问题。

2 联合优化实施条件

本文所开展的路由与子载波分配及其调制阶数联合优化研究的结果,主要用于网络规划及设计。在计算机处理速度进一步提升或采用云计算的情况下,还可以用于对光传送网络进行动态管理,以充分发挥 EON 的优势。为了实现根据各端到端业务量负荷随时间的变化对路由、子载波数及其调制阶数进行动态调整的目的,需要对光收发机、光交换机以及网络控制面等进行合理设计^[4,5]。

为了保证端到端接力传输过程中的波长连续性,在对端到端连接进行路由及子载波重新分配时,要求光收发机具有载波中心波长连续可调、频谱宽度足够

许世纳,施展:光传送网中路由与子载波调制方式分配联合优化方法

宽(或支持的子载波数足够多)并且支持对每个子载波分别采用不同的调制方式。TOMKOS I 和 AZODOLMOLKY S 等人所设计的频谱切片式多载波光收发机就具备所需的功能^[4]。文献[4]利用硅基液晶的空间相位调制性能,可将其用于制作带宽连续可调的波长选择切换开关(BVWSS),进而可利用 BVWSS 构成适用于 EON 的波长交叉连接(WXC)设备。这种中心波长连续可调、使用子载波数可选且每子载波调制方式可控的光收发机和波长及带宽连续可调的波长交叉连接设备,为构建 EON、实施联合优化奠定了硬件基础。进一步,将 BVWSS 设备的输出经过性能检测模块,继而经过现场可编程逻辑阵列(FPGA),将有关信息提供给控制平面,作为联合优化及动态网络管理的依据,然后控制平面根据决策结果对光收发器及网络交换设备发出调整指令,使其更改工作模式。这种从物理层到传输控制层的弹性可调网络正是目前学术界所倡导的软件定义网络。

3 基于递归算法的端到端路由穷举

为了保证路由与子载波调制方式联合优化结果的最优性,对一个给定的端到端流量对,不能漏过任何一条可用的路由。因此,需要设计一种算法,能够给出任一对节点间的所有可能的路由。由于实际网络中,每经过一跳,都要付出能量消耗的代价,因此每条可用的路由都只能是无环的。在给定拓扑的条件下,由于网络的节点数、链路数是有限的,因此每个端到端节点对间的无环路由的数量是有限的。本文采用递归算法获得给定端-端节点对间全部可能路由的子程序 $\text{exhrout}(Q, ns, ne, cn, cp, mr)$ 的算法流程如图 1 所示。其中, Q 代表网络(所有链路均为双向对称的无向链路)中的节点数, ns 代表所考察的起始端节点, ne 代表所考察的末端节点, cn 代表所试探的某条路由上最新的试探节点, cp 代表所试探的自 ns 至 cn 的由若干节点和链路连成的试探路径, mr 是个 $Q \times Q$ 矩阵,代表整个网络的连接关系。

利用图 1 所示的递归函数或子程序求 $ns \sim ne$ 之间的所有路由,需要在主调程序中设定传入的参数: cn 为 ns , 初始试探路径 cp 只包含一个节点即 ns 。此外,需要为指定的 (ns, ne) 初始化全局变量 nr (令 nr 为 0), rp 为足够大小的空值矩阵。在递归程序 $\text{exhrout}()$ 工作过程中,每当为 $ns \sim ne$ 找到一条无环路由时,就会将全局变量 nr 的值加 1,并将找到的这条路由添加到矩阵 rp 的最后一行。

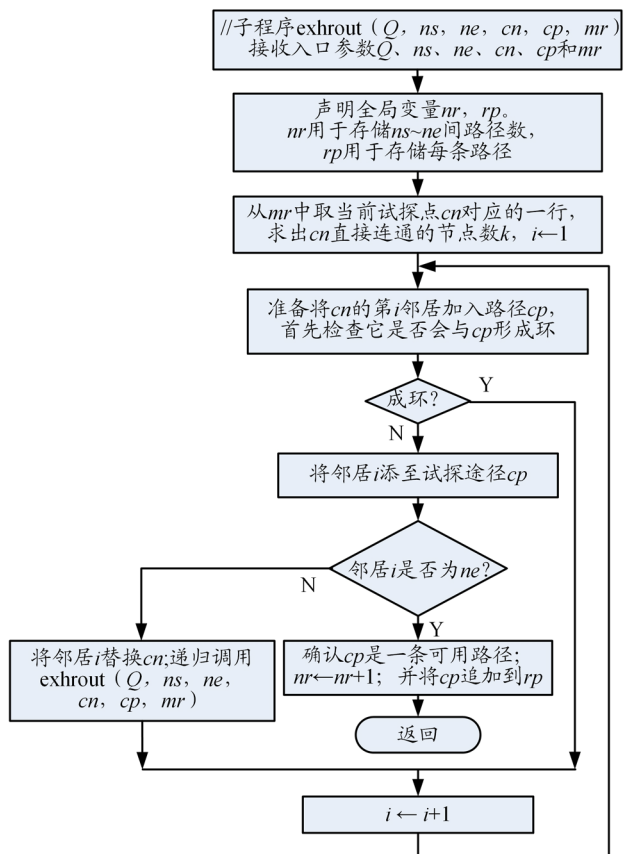


图 1 递归函数 exhrout 工作流程

4 计算实例

为了与文献[3]进行对比,仍以该文中某省电力通信网为例,网络参数与文献[3]相同。我们依旧在 Matlab R2016b 上编写有关程序。首先,运用 $\text{exhrout}()$ 递归函数求出每个端到端流量对间的全部可用路由;然后,根据式(1)~式(4)建立路由与子载波及其调制方式分配联合优化的数学模型;最后,运用 Matlab 内部函数 $\text{intlinprog}()$ 求解 ILP 问题,得到较高精度的路由与子载波及其调制方式联合分配的最优解,并据此算出相应的网络链路总功耗、子载波总数、程序运行时间、空置链路数和所需光纤数(单向,双向则为对)等指标。其中,空置链路数、所需光纤数是通过最优解的每个子载波所选择的路由进行统计得出的。链路总功耗只记录了单向流量所经历各链路的每个载波的功耗。联合优化与 ILP 算法^[3]对比情况如表 1 所示。

表 1 联合优化与 ILP 算法^[3]结果对比

算法	总功耗 (W)	耗时 (s)	子载波数	空置链路数	所需光纤对
联合优化	24895	13.327	60	0	41
ILP	25140	0.240	60	5	44

考虑到双向流量的对称性,双向链路总功耗应该是表1中所列值的2倍。

从表1可以看出,采取路由与子载波及调制方式分配联合优化算法能进一步降低整个网络所有通信链路的总功耗。并且联合优化所得的功耗是给定网络拓扑、承载所需端到端流量负荷条件下的最小功耗。为了对此进行验证,我们通过不断修改文献[3]实验方法中为各流量对选择路由时的链路距离递增因子,重复运行文献[3]对应程序超过1000次,每次试验所得的总功耗都大于表1所列的本文的功耗。从表1的结果还可看出,除了能给出优化的总功耗,联合优化还能更有效地实施流量均衡、解决文献[3]所存在的路由分配与子载波及调制方式分配脱节的问题。该问题的直接体现是:受端到端节点间流量需求的影响和预定路由的制约,有些节点间的光纤被闲置而同时另一些节点间容量不够用,在这些拥挤的链路上按预定的路由必须增加光纤才能满足让信息流按预设路由流动的容量需求。表1最后2列结果的对比表明:联合优化有效利用了空置的链路,通过改选路由避开了一些瓶颈链路。联合优化具备的这种负荷均衡能力,能在一定程度上有效对抗网络负荷的变化、降低需求变化对网络管理的不利影响。

从表1可知,通过将路由和子载波数及调制阶数进行联合优化,总功耗下降约1%。尽管比例不高,但值得强调的是联合优化给出了可能的最低功耗。此外,文献[3]的网络含有41条无向链路,按联合优化给出的结果,每对节点间只需1对光纤就可满足设计的流量需求,而若不进行联合优化,需要额外增加3对光纤及光收发器才能满足设计的容量需求,否则无法满足所有端到端业务量对传输容量的需求。因此,采用联合优化,还使光纤成本降低了约7.4%。

采取路由与子载波及其调制方式联合优化,使得问题的复杂性明显提高。表1所列的联合优化总耗时,其中约1/4是采用递归方法对所有路由进行穷举过程所消耗的。超过一半的时间花在ILP问题的求解过程中。在所研究的算例中,决策变量的个数是64896,属中等以上规模的ILP问题。在实际的网络环境中,如果网络拓扑不变,则路由穷举问题只需求解一次;若流量需求发生变化,则需要重新运行本文所提出的联合优化算法。目前条件下,进行联合优化问题求解的时间,虽不能达到实时控制的要求,但如果充分利用网络的并行与分布式计算能力,则有望达到实时性的要求。

与文献[1,3]不同,本文所提出的路由与子载波数及其调制阶数分配方法容许任何一个端到端的流量经历不同的路由,在带来所有子载波总功耗降低的益处的同时,有可能导致因为路由分裂而不得不增加光纤及光收发器的数量,并可能加重频谱碎片问题^[1]。频谱碎片问题在大规模网络中会导致新建连接呼损率的增加,不过,对于中小规模网络,由于其骨干网上的端到端带宽需求不大且节点间距较小,绝大多数只需很小的子载波数就能满足传输要求,因此频谱碎片对网络的整体性能影响很小。此外,在大规模网络中,如果采用本文的联合优化算法时因为路由分裂引起频谱碎片,则需要通过增加光纤和光收发器来弥补,这会导致建设成本的增加。不过,增加光纤和光收发器后,利用其富余的传输能力又可进一步提升网络的弹性和应对流量突变的能力。总之,采用联合优化,其裨益多于不足。

5 结束语

为了解决EON中预设路由对子载波及其调制方式分配结果的制约,以期进一步降低功耗,本文将路由选择和子载波及调制方式分配进行联合优化,拓展了原来在预定路由条件下进行子载波及其调制方式进行优化分配的模型,使其适用于路由与子载波及其调制方式的联合优化。通过具体算例表明:新的方法可以进一步降低通信链路总功耗,并且有利于负荷均衡、提高各链路的使用效率。如果将新算法与云计算等新技术结合,可以克服计算量大的困扰,进一步提高网络管理的时效性。

参考文献:

- [1] 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
- [2] NAAS N, MOUFTAH H. Power-aware design of the optical interconnect for future data centers [C]// IEEE Symposium on Computers and Communication, June 27-30, 2016, Messina, Italy. New York: IEEE, 2016: 675-682.
- [3] 陈振辉, 陈辉煌. 电力通信光传送网子载波调制方式优化分配方法研究 [J]. 光通信技术, 2019, 43(2): 14-17.
- [4] TOMKOS I, AZODOLMOLKY S, PARETA J S, et al. A tutorial on the flexible optical networking paradigm: state of the art, trends, and research challenges [J]. IEEE Proceedings, 2014, 102(9): 1317-1337.
- [5] CAI X, WEN K, PROIETTI R, et al. Experimental demonstration of adaptive combinational QoT degradation restoration in elastic optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 664-671.