

电力通信光传送网子载波调制方式优化分配方法

陈振辉¹, 陈辉煌²

(1. 广东电网有限责任公司 电力调度控制中心, 广州 510000; 2. 中国能源建设集团 广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510000)

摘要:针对新一代电力系统通信网光传送网所面临的子载波分配问题,建立了以降低网络总功耗为目标的子载波调制方式及分配问题的线性整数规划模型,并综合路由优化和子载波数量及调制方式分配,设计了求解该模型以获得最优子载波分配的算法及程序。以某省电网通信网为例,该方法比节能导向的规划设计算法(PADPA)节省超过2%的总能耗。

关键词:光传送网;弹性光网络;光正交频分复用;子载波分配

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)02-0014-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.02.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimal allocation method of subcarrier modulation mode in optical transmission network for power communication

CHEN Zhenhui¹, CHEN Huihuang²

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

2. Guangdong Electric Power Design Institute Co. Ltd., China Energy Engineering Group, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Aiming at the subcarrier allocation problem faced by the optical transmission network of the new generation power system, a linear integer programming model for the subcarrier modulation mode and allocation problem aiming at reducing the total power consumption of the network is established. The model is designed to solve the problem by combining routing optimization, subcarrier number and modulation mode allocation. This paper designs an algorithm and program to solve the model to get the optimal subcarrier allocation. Taking a provincial power grid communication network as an example, this method saves more than 2% of the total energy consumption than the energy-saving oriented planning and design algorithm (PADPA).

Key words: optical transport network; elastic optical network; orthogonal frequency multiple address; subcarrier allocation

0 引言

随着网络通信技术的发展和电力网络管理水平的提高,电力通信光传送网(OTN)面临更新换代的问题。在电力通信网络规划与设计过程中,由于各通信链路及网络交换设备都需要消耗一定的电功率,如何在保证 OTN 满足各节点对间通信需求的条件下尽量降低 OTN 的总功耗,是电力通信 OTN 规划设计与管理面临的一个重要课题。鉴于 OTN 子载波分配及调制方式选择问题的复杂性,文献[1]提出了一种以降低 OTN 总功耗为目标的搜索算法,称为节能导向的规划

设计算法(PADPA)。由于 PADPA 中有利于降低总功耗的措施仅体现在优先考虑对流量需求大的源-目的通信对选用高阶调制,因而该算法得到的载波分配方案的最优性或近优性尚有提升空间。而弹性光网络(EON)采用光正交频分复用技术,可以灵活地为每个网络设备分配子载波数量及确定每个子载波的调制方式。因此,本文对 EON 的子载波分配及调制方式选择问题进行研究,运用线性整数规划方法建立数学模型并求解,以期获得更好的节能效果。

1 模型建立

1.1 EON 的技术特征

文献[2,3]研究表明,EON 所采用的光正交频复用(O-OFDM)通信链路中每个子载波所需的功耗、信号的传输速率、最大传输距离等都与所选用的调制方式有关,如表1所示。

收稿日期:2018-09-26。

作者简介:陈振辉(1974-),男,学士,工程师,在广东电网有限责任公司长期从事电力系统通信规划、建设工作,在电力通信网络专项工程、500kV及以上输变电项目通信配套工程领域有丰富的建设和管理经验,对通信传输网络、数据网络、接入网技术等有较强的深入研究。



表 1 子载波调制方式与传输速率、功耗及最大传输距离间的关系

调制方式	传输速率 (Gb/s)	消耗功率 (W)	最大距离 (km)
BPSK	12.5	112.374	4000
QPSK	25	133.416	2000
8QAM	37.5	154.457	1000
16QAM	50	175.498	500
32QAM	62.5	196.539	250
64QAM	75	217.581	125

从表 1 所给出的实验结果可以看出,随着调制阶数提高,链路传输速率线性增长的同时,功耗接近线性增长,而最大传输距离则按指数率衰减。在省级电力通信网中,除了个别偏远地区,绝大多数邻近节点间的距离都小于 125km,表 1 所列的调制方式几乎都可以采用。因此,省级电力通信网恰巧是 EON 可以充分发挥技术优势的场合。

1.2 子载波分配问题建模

光传送骨干网由光纤链路和光交换设备构成。每个交换设备可通过接入链路连接若干终端设备,交换设备所汇接的终端设备的通信需求及其本身与其它节点间的通信需求之和将作为骨干网节点间的通信需求一起考虑,而接入链路将被忽略。同时,OTN 的传送流量需求被认为是对称的,子载波分配问题建模及求解都只需考虑单个方向。为此,对于节点对间的流量需求及链路承载的流量,只需考虑正向的流量即可。约定节点间的流量需求的正向为标号较小的节点流向标号较大的节点的方向,链路的正向约定为由标号较小的节点指向标号较大的节点。

用 M 表示 EON 中可用的调制方式的数量,以表 1 为例, $M=6$ 。将有流量需求的节点对数目用 N_l 表示,网络中的链路数用 N_l 表示。此外,考虑到光交换设备的光波长连续性限制,每个源-目的对间的通信可使用若干个子载波,每个子载波可以采用不同的调制方式,因此,子载波分配问题就是要合理设计每个源-目的对所采用的各调制方式的子载波数。用向量 $X_i=(n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{iM})$ 表示第 i 个通信节点对的子载波数及其相应调制阶数分配情况,其中, n_{ij} 表示第 i 通信对使用第 j 类调制方式的载波数量, $i \in \{1, 2, \dots, N_l\}$, $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

网络消耗的电功率包括 2 部分:交换设备消耗的电功率和每条光纤链路消耗的电功率,其中每个交换设备消耗的电功率取决于交换设备的端口数及支持的速率等级、电源及散热风扇等。在网络繁忙的情况下,每个交换设备消耗的这些电功率几乎是固定的,因此本文只考虑各通信链路消耗的电功率。

在网络节点布局及拓扑已确定的情况下,路由算

法决定了每个源-目的通信对的流量经历了哪些通信链路,因而对子载波分配算法的效果有明显影响。为了避免使 EON 技术条件下子载波分配问题过于复杂,本文仅考虑为各源-目的对选定路由的条件下的子载波分配问题。

用一个含 N_l 行、 $M \times N_l$ 列的矩阵 A_l 记录路由算法及各调制方式对每条链路对消耗的通信功率的影响,矩阵 A_l 的每一行对应一条链路 i ,它记录了每个流量对 $j(j=1, 2, \dots, N_l)$ 的信号是否经过链路 i 。准确地说, A_l 的第 i 行的第 j 个相邻 M 个元组,是根据路由算法所确定的第 j 个源-目的流量对是否经过链路 i 来确定的,若经过,则该 M 元组就是每个相应载波消耗的功率(参见表 1 中标为“消耗功率”的那一列),否则,该相邻 M 个元素都为 0。实际上,将矩阵的第 i 行与由各源-目的对子载波分配向量 $X_n (n=1, 2, \dots, N_l)$ 构成的 $M \times N_l$ 元列向量 $X=(X_1, X_2, \dots, X_{N_l})$ 相乘,就得到链路 i 所消耗的电功率。进一步,将 A_l 逐行相加,得到一个行向量 f_i ,将 f_i 与列向量 X 相乘,得到所有链路的总功率为:

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

式(1)所表示的总功率是各通信链路所消耗电功率之和。在给定路由的情况下,由于 f_i 是一个由路由算法和不同调制方式下单个子载波消耗功率所确定的常数,所有链路所消耗的总功率 P_{EON} 是所有决策变量 $X=(n_{11}, n_{12}, \dots, n_{1M}, n_{21}, n_{22}, \dots, n_{2M}, \dots, n_{N_l1}, n_{N_l2}, \dots, n_{N_lM})$ 的线性函数。

子载波及调制方式分配问题涉及的约束条件包括容量需求约束、各链路容量限制约束和子载波总数的约束。容量需求约束,是指分配给各源-目的对所用的子载波数及各子载波相应的调制阶数所提供的传输速率容量不能低于该源-目的对的传输速率需求。其表达式为:

$$n_{11}c_1+n_{12}c_2+\dots+n_{1M}c_M \geq D_l, l=1, 2, \dots, N_l \quad (2)$$

其中, $c_1, c_2, \dots, c_M$ 表示 EON 中各种调制阶数相应的传输速率,具体数值可参考表 1 中标为“传输速率”的那一列; D_l 表示第 l 个流量对的传输容量需求。

链路容量约束是因为每条通信链路所含光纤数、每条光纤及其光收发器所能支持的传输容量有限造成的。一根光纤及其光收发器所能支持的传输容量为 400Gb/s,对每条(光纤)链路,都要受此类条件约束,该类约束可表示为矩阵形式:

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

其中, B_l 是一个含 N_l 行、 $M \times N_l$ 列的矩阵,与前面提到

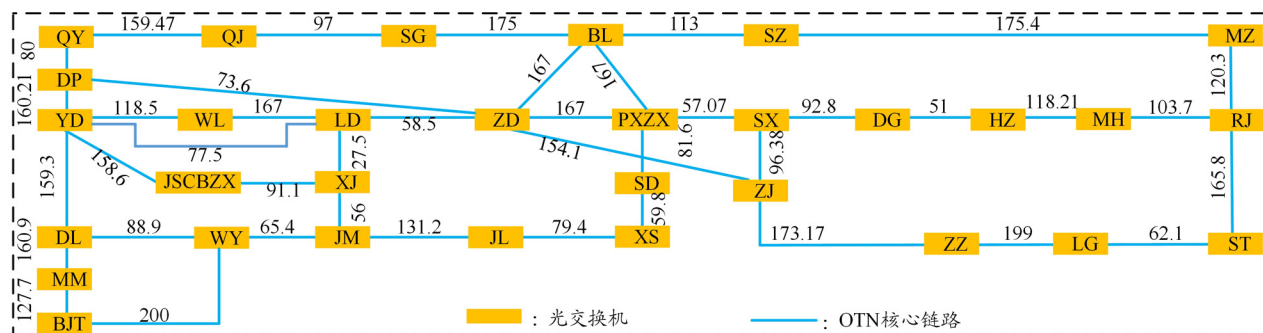


图1 某电力通信网拓扑结构(单位:km)

的 A_i 具有相同结构,区别仅在于将 A_i 中与路由算法中体现某个流量对是否经过给定链路的系数 1 或 0 相乘的因子由各调制方式的功率改成相应的容量 $k \times 12.5\text{Gb/s}$ 。参照表 1, BPSK 对应 $k=1$, QPSK 对应 $k=2$, ..., 64QAM 对应 $k=6$ 。 b_0 表示由网络中各光纤链路的容量所构成的 N_l 元列向量。

在 ITU-T 标准中,光纤的可用频谱为 4THz,子载波间隔为 12.5GHz,因此任何一条光纤可用子载波总数不超过 320。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:

$$n_{11}+n_{12}+\cdots+n_{1M}+n_{21}+n_{22}+\cdots+n_{2M}+\cdots+n_{N1}+n_{N2}+\cdots+n_{NM} \leq 320 \quad (4)$$

由于上述数学模型中的各决策变量是定义在相应流量对的信息传输路径上各调制阶次的子载波数,连续性要求体现为其相应物理量贯穿其经过的所有光纤链路,这已在式(2)、式(3)及 A_i 和 B_i 的构造中得到体现。

综上分析可知,在给定路由条件下以最小化链路消耗总功率为目标的 EON 子载波数量及调制方式分配问题,其目标函数及约束条件均为决策变量的线性表达式,因此是线性优化问题。由于决策变量只能取整数,因而也是整数线性规划问题。

1.3 子载波分配问题求解

前面已把 EON 的子载波数量及调制方式分配问题表示成线性整数规划问题,求解该问题的典型方法是结合单纯形法和割平面法^[4]。此外,在一些数学工具软件如 Matlab R2014 以上版本中,有专门的求解整数线性规划的函数可以直接调用。

2 计算实例

本节将上述线性整数规划方法运用于某省电网通信网子载波及其调制方式的优化分配。该省电网通信网的拓扑结构如图 1 所示。

该网络含有 31 个骨干网节点、41 对双向链路。其中,除有少量节点间距离大于 125km 但小于 250km,其余链路的跨距都小于 125km。因此,参照表 1,在不使用光中继的情况下,少量链路可用的最高调制阶数为 32QAM(单载波最大容量为 62.5Gb/s),其余链路最高可用调制阶数均能达 64QAM(单载波最大容量为 75Gb/s)。经调查分析,该网络的部分节点对间的通信带宽需求如

表2 某电网通信网流量需求(Gb/s)

表 2 所示。

由于双向流量的对称性,表 2 所列各源-目的对间的反向流量需求与正向是相同的。根据图 1 所给出的网络拓扑和表 2 所给出的流量需求,我们先用 Dijkstra 最短

算法确定各流量对间的最短路由,并据此参照表 1 确定式(1)所表示的线性规划的目标函数中的有关系数以及约束条件式(2)~式(4)中所涉及的 A_i 、 B_i 矩阵的每个元素。

在此基础上,我们在 Matlab R2016b 上编写有关程序,并运用其 `intlinprog()` 函数求解线性整数规划问题,计算出了最优的网络链路总功耗、子载波总数、程

节点对	流量需求	节点对	流量需求
JSCBZX-ZD	140	ZD-JSCBZX	140
DG-ZD	20	DG-JSCBZX	10
SD-ZD	20	SD-JSCBZX	10
XS-ZD	20	XS-JSCBZX	10
JL-ZD	20	JL-JSCBZX	10
HZ-ZD	20	HZ-JSCBZX	10
JM-ZD	20	JM-JSCBZX	10
ST-ZD	20	ST-JSCBZX	10
JY-ZD	20	JY-JSCBZX	10
MH-ZD	20	MH-JSCBZX	10
RJ-ZD	40	RJ-JSCBZX	20
BL-ZD	20	BL-JSCBZX	10
SG-ZD	20	SG-JSCBZX	10
QY-ZD	20	QY-JSCBZX	10
YD-ZD	20	YD-JSCBZX	10
WL-ZD	20	WL-JSCBZX	10
MM-ZD	20	MM-JSCBZX	10
BJT-ZD	20	BJT-JSCBZX	10
DL-ZD	20	DL-JSCBZX	10
PXZX-ZD	40	PXZX-JSCBZX	10

序运行时间、空置链路数和满负荷链路数等指标。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,根据双向流量的对称性,链路总功耗应该是表3中所列值的2倍。为了与他人工作进行对比,我们也按文献[5]所述PADPA计算出相应的各项指标,二者的对比情况如表3所示。

表3 本文方法与PADPA效果对比

算法	总功耗(W)	子载波数	耗时(s)	空闲链路数	满载链路数
PADPA	25677	61	0.118	6	2
ILP(本文)	25140	60	0.240	5	0

从表3可以看出,本文所提出的基于整数线性规划(ILP)的子载波及调制方式分配算法能进一步降低总功耗,节能率略大于2%。节能率比预期略低,究其原因,主要是PADPA有一个优点:每次为一个源-目的对分配一个指定调制阶数的载波时都重新计算路由,这样的路由算法具有一定的流量均衡效果并对节能有一定效果。而本文方法中,预先确定了路由且同一源-目的对间所有载波都沿同一路由,这在一定程度上限制了载波分配的灵活性,缩小了线性整数规划可行解的范围。本文算法的运行时间比PADPA的运行时间长,主要原因是求解线性整数规划最优解的过程消耗了较多的时间,而PADPA分配子载波是基于流量需求通过排序直接确定各级调制阶数所需的载波数,然后选择每个载波信号的传输路由,避免了载波数求最优解,因此算法复杂度相对更低。从表3还可看出,PADPA比本文方法给出更多的空闲链路,同时也有更多的满载链路,这种情况在网络业务量波动或突发性业务影响下,会导致网络性能下降,因而不利的。

为降低固定路由算法对子载波数分配的不利影响,在为各流量对分配路由时,我们逐次修改已用链路的重量,使每条用到的链路的重量随使用该链路的流量对的数量线性增长;设定了100种不同的重量修改增量,从0.01~1.0呈均匀分布,获得不同的子载波数量及其调制阶数分配结果。100次运行结果是:优化后总功率最小为24985W,最大为25344W,均值为25097W。

另外,本文还对不同网络规模下的运行时间进行了对比。所选取的网络包括文献[4]中研究的2个网络(1个8节点的网络和1个14节点的网络)、本文研究的具有31个节点的某省电力通信网络及1个虚构的含123个节点的网络。网络的其它数据及子载波优化

分配运行时间对比情况如表4所示。表3和表4所列的结果都是在同一DELL台式计算机上完成的。计算机的处理器为Intel Core i5-7500,主频为3.40GHz,内存为8GB,操作系统为64位Windows10,应用程序设计平台为MATLAB R2016b。

表4 不同规模网络计算用时对比

网络名称	节点数	链路数	流量需求对	计算时间(s)
文献[4]网络1	8	10	4	0.167
文献[4]网络2	14	21	10	0.180
电力通信网络	31	41	58	0.283
某虚构网	123	305	7106	12.730

由此可见,本文所提出的子载波及调制方式分配算法,分配结果无论是从节能的角度还是从提升网络性能角度,都优于PADPA,其代价是增加了算法运行时间。

3 结束语

为了进一步降低光传输网络的功耗,本文提出了EON网络子载波及调制方式分配方法,建立了以降低通信链路总功耗为目标,以链路容量限制、流量需求限制和子载波总数限制为约束条件的子载波及调制方式分配问题的整数线性规划模型。从省级电力通信网的实际情况可以看出,本文算法可以进一步降低功耗,网络的其它性能也略有提升。进一步的研究将考虑路由算法和子载波及调制方式的联合优化,并使计算时间在合理实用的范围内。

参考文献:

- [1] TANIMURA T, HOSHIDA T, KATO T, et al. Data analytics based optical performance monitoring technique for optical transport networks [C]// Optical Fiber Communications Conference and Exposition, March 13-15, 2018, San Diego, USA. California: OSA, 2018: 1-3.
- [2] FALLAHPUR A, BEYRANVAND H, SALEHI J. 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.
- [3] CHRISTODOULOPOULOS K, TOMKOS I, VARVARIGOS E. Elastic bandwidth allocation in exible OFDM-based optical networks [J]. IEEE J. Lightw. Technol., 2011, 29(9): 1354-1366.
- [4] WEINSTEIN S B. The history of orthogonal frequency-division multiplexing [J]. IEEE Communications Magazine, 2009(11): 26-35.
- [5] NAAS N, MOUFTAH H. Power-aware design of the optical interconnect for future data centers [C]//IEEE Symposium on Computers and Communication, June 25-28, 2016, Messina, Italy. New York: IEEE, 2016: 675-682.