

跨层多域电力通信网的弹性光网络架构研究

冯春柳¹, 罗芳²

(1. 广东电网有限责任公司茂名供电局, 广东 茂名 525000; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 频谱分片弹性光网络 (SLICE) 这种新的网络架构面世以来受到了国内外极大的关注和研究, 这种新的光网络体系架构在很大程度上相对于WDM网络有很大的改变。除了提供正常波长业务通道, 还可以对子波长业务和超波长业务进行交换、汇聚等操作, 满足了不同波长业务的请求, 在很大程度上改善了WDM网络中因为固定波长导致资源利用率低的问题。除了SLICE光网络概念, 研究人员还提出了另外一种网络架构, 即可编程光网络架构。这种光网络架构采用正交频分 (OFDM) 多址接入技术实现链路虚拟化。相比于传统的时分复用和波分复用, 正交频分复用利用数字信号处理、并行信号检测和灵活的资源管理方案为子波长提供复用和流量疏导。在此架构中, 能够有效提高网络性能, 降低成本, 提高了服务的透明度。

关键词: 电力通信网; 弹性光网络; 网络架构; 智能电网

Research on elasto-optical network architecture of cross-layer multi-domain electric power communication network

FENG Chunliu¹, LUO Fang²

(1. Maoming Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Maoming 525000, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Since the advent of the new network architecture, spectrum piecewise elastic optical network (SLICE), which has attracted great attention and research at home and abroad, has greatly changed relative to WDM network. In addition to providing normal wavelength service channels, sub-wavelength services and ultra-wavelength services can be switched and aggregated to meet the requirements of different wavelength services, which greatly improves the problem of low resource utilization in WDM networks due to fixed wavelength. In addition to SLICE optical network concept, researchers have proposed another network architecture, namely programmable optical network architecture. This optical network architecture uses orthogonal frequency division (OFDM) multiple access technology to achieve link virtualization. Compared with traditional time division multiplexing and wavelength division multiplexing, orthogonal frequency division multiplexing uses digital signal processing, parallel signal detection and flexible resource management schemes to provide multiplexing and traffic guidance for sub-wavelength. In this architecture, it can effectively improve network performance, reduce costs and improve service transparency.

Key words: power communication network; elastic optical network; network architecture; smart grid

0 引言

在美国, 2010年University of Texas的A. N. Patel和NEC美国实验室等提出了“灵活的WDM

光网络 (Flexible Optical WDM, FWDM) 的网络架构, FWDM架构支持网络建立速率可变的光通路, 同时支持单载波和多载波调制, 用动态网

络分配和网络规划技术。同样，在欧洲，Olivier Rival等人和阿卡特朗讯贝尔实验室联合提出数据速率弹性的光网络（Data Rate Elastic Optical Network, DR-EON），也是目前正在积极开展的全光网研究项目，旨在设计一种“弹性”的新型网络概念。“弹性”的含义代表网络中固定的一系列通信参数，例如调制信号速率、调制码型和频隙大小等在新型的网络架构中均可根据需要进行灵活调节。该网络架构的核心思想与WDM光网络中的混合线路速率（Mixed Line Rate, MLR）概念类似，但是DR-EON还是采用了固定频隙大小的频谱分配策略。所以，网络频谱利用率不高，但与现有的商用WDM网络保持了较好的兼容性。

1 面向跨层多域电力通信网的弹性光网络架构研究

图1为弹性光网络的基础架构，在图1中可以看到主要有两类器件：一类是靠近网络的边缘，连接用户端和中心网络的带宽可变光收发器（BVT）；另一类是处在网络中间，连接BVT的带宽可变光交叉连接器（BV-OXC）。

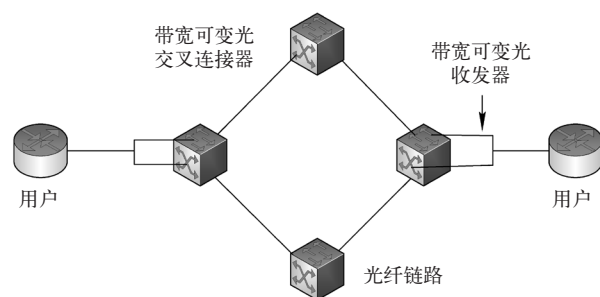


图1 弹性光网络示例

Fig. 1 Example of elastic optical network

带宽可变光收发器的主要功能是产生一系列连续的正交子载波来配置传输带宽，同时根据用户业务的不同需求选择适合的调制方式对用户的业务信号进行调制。调制方式的选择通常是根据传输距离的远近，在选择调制方式的同时要关注传输信道的实时环境，要保证信息质量准确可靠。一般情况下，传输的距离越长，信号传输的环境就越差，需要选择较低阶的调制方式；

相反，传输距离较近，就可以选择高阶的调制方式。越低阶的调制方式每个符号表示的比特数越少，在相同速率情况下需要的频隙数越多；越高的调制方式需要的频隙数越少。通过增加或减少子载波的数量可以灵活地转换传输速率，需要较高的传输速率就增加子载波的个数，需要较低的传输速率就减少子载波的个数。

带宽可变光交叉连接器的主要功能是实现信号的复用和解复用，在其中起关键作用的是带宽可变的波长选择开关（BV-WSS）。

BV-WSS 主要功能是对波长进行选择，处理多种颗粒度的交换，实现对连续频谱信号任意分割。目前在带宽可变的波长选择器中采用的主要技术是微机电系统（MEMS）技术和硅基液晶（LCOS）技术等。前者结构比较简单，主要是利用大规模的微镜片反射阵列，通过电控制使得反射阵列上各个镜片的角度可以任意旋转，不同光波长的信号就通过镜面的反射调整到不同的输出端口，实现信号路径的转换。后者主要是利用基于空间相位的调制，通过改变每个液晶像素的控制电压，不同区域的液晶可以独立地控制入射到该区域的光信号，通过将输入的任意波长切换到任何一个输出端口，从而实现了对光束的控制。以上两种技术各有优势，微机电系统尺寸较小，功耗低，可以在较大范围内实现带宽可变；硅基液晶技术虽然功耗相对较高，但是在信号带宽的灵活调整方面的优势可以弥补其缺陷，而且支持的维度和信号选择的输入输出端口数更多，在智能化的弹性光网络中具有更大的现实意义。

弹性光网络的目标是为差异化的高速率业务需求提供一个频谱高效利用的传输平台。通过架构中多种器件的灵活组合，实现动态分配大小合适的光域带宽，以实现端到端的灵活光路（lightpath）。在弹性光网络中打破传统的固定带宽光路，根据路径所需，从可用的频谱资源范围中取出频隙或频隙组合分配给建立端到端的光路业务。因此，弹性光网络也可以理解为光网络的资源虚拟化（NFV），频谱资源可以根据需求

提供大小合适的光传输路径。

2 光正交频分复用技术分析

OFDM技术已经在多种数字传输系统中得到广泛的应用，例如无线局域网和准对称数字用户线路（Asymmetric Digital Subscriber Line, ADSL）。为了克服大容量、长距离光纤传输时由于色散（Chromatic Dispersion, CD）和偏振模式色散（Polarization Mode Dispersion, PMD）引起的失真，光的研究越来越热门。

光OFDM将数据分布在多个低速率的子载波上，每个子载波的低符号速率降低了色散和偏振模式色散引起的失真，子载波间的频率间隔是符号时间间隔的倒数。由于正交性使得相邻子载波的频谱可以部分重叠，增加了频谱效率。通过改变子载波的数目可以实现数据速率自适应调制。

在弹性光网络发送端OTN物理层和OFDM的实现，封装后的PDU被映射到OTN物理层 n 个OTU_k信道中，接着被发送到OFDM发送模块。OTU_k是ITU-TG.709标准定义的光传输单元，包含管理光

传输网络层的头部开销和一个前向纠错字节。当下标 $k=1$ 时，相当于大约可支持2.5 Gbit/s的数据速率；当 $k=2$ 时，可支持数据速率为10.3 Gbit/s；当 $k=3$ 时，可支持数据速率为43 Gbit/s，当 $k=4$ 时可支持数据速率为112 Gbit/s。根据客户请求的数据流量调整OTU_k信道的数目 n 来为客户信号分配所需要的逻辑带宽。有两种方法来实现光OFDM，电域方法和光域方法，如图2所示。

在电域方法中， n 个OTU_k信道的数据比特被映射到不同的子载波符号，然后通过逆快速傅里叶变换（Inverse Fast Fourier Transform, IFFT），和数模转换被转化为时间序列基带OFDM信号，光OFDM信号通过将基带OFDM信号线性转化到光载波频率上来产生，光载波频率由使用光I/Q（Inphase/Quadrature）调制的波长可调谐激光器产生。在光域方法中，光OFDM信号通过调制各个光子载波直接产生子载波随后跟光耦合器结合。在这种情况下，光频率的调谐和光OFDM信号带宽的调整分别通过改变载波激光器的光频率和调整子载波数目来实现。

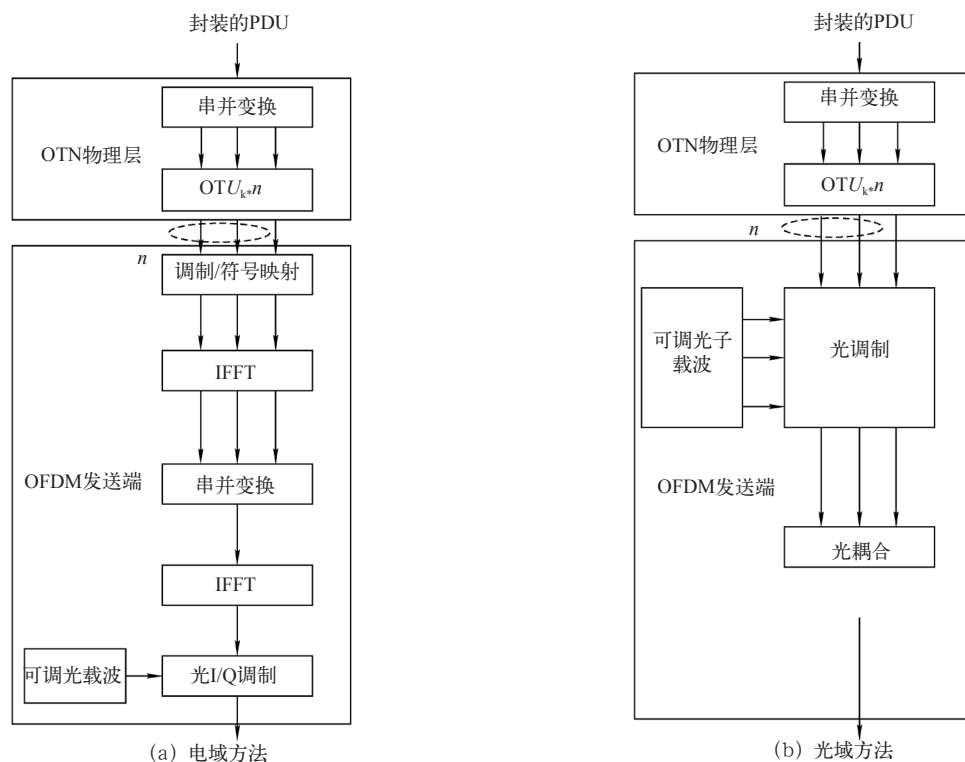


图2 弹性光网络发送端OFDM的实现

Fig. 2 Implementation of OFDM at the transmitter of elastic optical network

3 距离自适应调制技术分析

在弹性光网络中有比特速率自适应和距离自适应两种决定调制方式的形式。

在比特速率自适应频隙分配中，被分配的频隙数是根据业务比特率而变化的。目前，通过比特率自适应频谱资源分配已经实现每信道容量从40 Gbit/s到400 Gbit/s可变。

在距离自适应（Distance Adaptive, DA）调制中，根据给定的传输特性要求如Optical Signal Noise Ratio (OSNR) 来为每条光路选择调制方式。传统光网络只采用单一形式的调制方式，系统的设计必须使得网络中传输损耗最大的光路（通常也即是距离最长的光路）能够以足够的信号质量来传输业务，这样不论路径长短所有光路在发送端都占用相同的频谱宽度。短路径由于传输损耗和滤波相关的损耗都较小，在接收端有更好的性能，使得网络资源存在一定的浪费。距离自适应频谱资源分配方式通过改变每个码元符号上调制的比特数来为较短距离的光路分配更少的资源，从而为整个网络节省了频谱资源。这是通过增加调制度来实现的，从QPSK变换到16QAM，所占用的频谱资源降低了1/2；从QPSK变换到64QAM，所占用的频谱资源降低到原来的1/3。

4 路由与频谱资源分配研究

弹性光网络中的路由与频谱分配问题类似于传统光网络中的路由与波长分配问题（Routing and Wavelength Assignment, RWA）。在RSA问题中，一个特定光路所包含的各光纤链路必须使用相同的频谱资源，这类似于RWA问题中的波长一致性，即一个特定光路所包含的各链路必须使用相同的波长。另外，由于弹性光网络是通过OFDM技术来实现的，一个特定的弹性光路所使用的频谱资源必须是连续的频隙。

弹性光网络中的RSA问题可以分为静态RSA和动态RSA两大类。动态RSA算法又可以进一步被分为集中式和分布式两种。在动态集中式RSA

问题中，PCE维护一个完整的全局网络拓扑信息，连接可以通过分布式信令GMPLS、基于流量工程扩展的资源预留协议（Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering, RSVP-TE）来实现。在动态分布式RSA问题中，各个节点维护自己的拓扑和频谱信息并保存在本地流量工程数据库（Traffic Engineering Database, TED）中，基于流量工程的开放式最短路径优先（Open Shortest Path First-Traffic Engineering, OSPF-TE）协议通过泛洪网络信息的任何改变来维护全网 TED。

目前关于弹性光网络的RSA问题的研究主要是动态中RSA的集中式控制，在每段光纤链路上通过OSPF-TE来泛洪频隙可用信息会面临可扩展性问题。

5 光层流量疏导技术分析

为了避免信道间的干扰，必须在相邻信道之间预留一定的保护间隔，当这些信道被复用到一根光纤中时，保护间隔所占用的频谱资源随着被复用的信道数目的增加而线性上升。这样导致使用大量透明弹性信道支撑网络流量时，由于保护间隔而浪费了不少频谱资源。为了在支撑相同数目的流量的同时减少复用信道的数目，可以聚合多个低速率的连接请求然后将其交换到一个大容量的信道。这个功能就叫做流量疏导，通过将流量打包到已经存在的信道，流量疏导提高了信道资源利用率，通过减少光纤中信道的数量，流量疏导增加了频谱效率。

传统的流量疏导操作于WDM层和客户层之间，称作电流量疏导。电流量疏导首先将输入光信号转化为电信号，采用有电路交换或者包交换能力的电疏导组织来执行疏导的操作，然后再将疏导完成的电信号转化为光信号。电流量疏导需要在每一个节点都进行处理，无论功率效率还是代价都不是最有效的方式。

使用OFDM调制机制可以实现光层流量疏导，如图3所示。在光层流量疏导中，输入光信号首先被转化为基带电信号，利用OFDM子载波

来执行信道的结合、分离、交叉或者子载波的移位操作。疏导后的电信号被调制到一个新的光信道，作为疏导后的光信号。通过在子载波层实现流量疏导使得其对比特速率和协议都没有依赖。子载波间是相互独立的，每一个子载波都有不同的调制形式。除了减少对大部分器件（如处理器、模数数模转换器和串并转换器等）和电路交换或包疏导交换的需求外，当输入信号有不同的波长和子载波时，光层流量疏导技术在进行流量疏导时，还可以减少光电探测器的数目，从而降低了硬件价格。

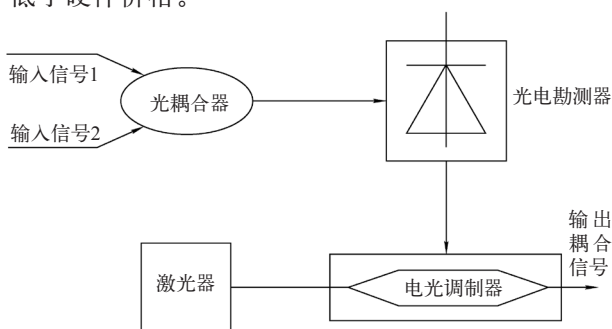


图3 光层流量疏导原理图

Fig. 3 Flow guidance principle of optical layer

6 结束语

频谱分片弹性光网络（SLICE）这种新的网络架构面世以来受到了国内外极大的关注和研究，这种新的光网络体系架构在很大程度上相对于WDM网络有很大的改变。除了提供正常波长业务通道，还可以对子波长业务和超波长业务进行交换、汇聚等操作，满足了不同波长业务的需求，在很大程度上改善了WDM网络中因为固定波长导致资源利用率低的问题。除了SLICE光网络概念，研究人员还提出了另外一种网络架构，即可编程光网络架构。这种光网络架构采用OFDM多址接入技术实现链路虚拟化。相比于传统的时分复用和波分复用，正交频分复用利用数字信号处理、并行信号检测和灵活的资源管理方案为子波长提供复用和流量疏导。在此架构中，能够有效提高网络性能，降低成本，提高了服务的透明度。

参考文献

- [1] QUAGLIOTTI M, ARANGO D C, SCHIANO M, et al. Spectrum fragmentation metrics and their use in optical channel allocation algorithms[C]. Padua: Italian National Conference on Photonic Technologies, 2018.
- [2] YIN Yarui. Resource allocation strategy for optimizing spectrum utilization and energy consumption in elastic optical networks [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [3] FENG Haiyan. Spectrum allocation and traffic grooming in elastic optical networks[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [4] CHATTERJEE B C, SARMA N, OKI E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks; a tutorial[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015, 17(3): 1776-1800.
- [5] FALLAHPOUR A, BEYRANVAND H, NEZAMALHOSSEINI S A, et al. Energy efficient routing and spectrum assignment with regenerator placement in elastic optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(10): 2019-2027.
- [6] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. Open flow: enabling innovation in campus networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 69-74.

作者简介



冯春柳

冯春柳（1991—），女，工程师，主要研究方向为电力通信。

（收稿日期：2019-06-21）EA