选题背景

随着近年通讯事业的发展以及光纤入户的普遍，人们的生活正在变得越来越便利和快捷。由于光网络具有传输容量大、损耗低、无电磁干扰等优势，光网络被广泛地应用在骨干传输、城域网、接入网、数据中心光互联等场景。光网络作为信息通信最基础的物理设施，其安全性越来越受到重视和关注。光纤通信中传输的光信号由于被限制在光纤纤芯内，并不对外辐射光信号，故其比有线电通信方式或者无线电通信方式更加难进行窃听[1]。然而可以将光信号从光纤中牵引出来进行窃听或者往光纤中注入干扰信号，以此来达到攻击光纤网络的目的。通常来说，针对光物理层的攻击，根据目标来说，大致可以分为窃听和服务中断[2]。窃听主要目标是获得光纤传输中信息的未经授权的访问，而服务中断攻击通常是采用插入有害信号（比如光纤干扰，加剧光纤的非线性损伤）或对光纤的物理参数进行修改（比如对光纤的物理结构进行加压，改变光纤的主态，使光纤中传输的光的偏振状态快速变化）。通常光纤通信网络的窃听方式有隐蔽式窃听，分离光束和光纤弯曲耦合[3-4]，对此比较常用的反窃听的方式有光时域反射计，局域网防御，抗窃听光纤。除此之外，还可以采用改变信道和对信息进行加密来加强光纤网络传输的安全性。还有大量的针对光网络的安全防护方案，比如光码分多址（Optical Code Division Multiple Access，OCDMA），量子加密（Quantum Cryptography），混沌加密（Chaotic Encryption），光子防火墙（Photonic Firewall）等。

但是目前绝大多数的技术都集中在物理层的安全加固上，利用控制层来实现物理层的安全防护涉及较少。由于光网络覆盖范围广，极易被监听和入侵。随着光层入侵技术的发展，即使最安全的防护手段也总有被攻破的时候，没有哪一种防护技术是一劳永逸的，是绝对安全的。利用光网络大规模组网互联的特点，通过不断地变换传输信道，变换信号的类型，频谱的位置等，同样可以实现信号的安全传输。因此，本课题拟采用多重不相关路径进行分时段的信息传输来实现物理层信息安全传输。光纤网络的安全传输问题是近年比较受关注的话题，但是通常所采用的安全传输手段基本都是从光物理层进行的，本文首次将多重不相关路径应用到光纤网络的安全传输中，用于光控制层进行信息的安全传输。其主要是多重不相关路径的原因，导致信息可供传输的条数增多，且由于节点的增加，不同不相关光路所占用的频谱资源不重叠且调制格式不相同，故很多程度上增加了网络攻击的难度，且如果使用合适的传输方式，比如随机选取多条不相关光路中的一条进行传输，并且对于不同的不相关光路采取完全不同的加密方式，也会极大程度上增大攻击者的工作量，从而增加网络的安全性。

[1]王薇薇,戴菁,周波,成昂轩.光缆网防窃听和注入攻击方法[J].中国新通信,2019,21(17):120-121.

[2] M. Furdek, C. Natalino, A. Di Giglio and M. Schiano, "Optical network security management: requirements, architecture, and efficient machine learning models for detection of evolving threats [Invited]," in Journal of Optical Communications and Networking, vol. 13, no. 2, pp. A144-A155, February 2021, doi: 10.1364/JOCN.402884.

[3]牛帅.光纤通信网络窃听方法与防御对策研究[J].中国新通信,2019,21(23):19.

[4]彭昌东.光纤通信网络窃听方法与防御对策[J].计算机产品与流通,2019(12):36.

研究内容

本课题的主要任务主要分为五个部分：

2.1 多重不相关路径问题

一个业务可以用源节点、目的节点、传输带宽等描述。面向信息传输安全而言，一个探测器可以部署在某个固定的位置，那么不相关光路首先是独立。同样，考虑分配的频谱位置，采用的调制格式等，综合考虑对不相关光路进行定义。为了实现光网络的安全传输，多重不相关路径需要满足如下基本要求：（1）同个业务不同路径所经过的节点不重叠，即，不相关路径彼此独立；（2）不同链路所占用的频谱资源要相互不重叠；（3）不同链路之间所用的调制格式应该保证两两互不相同。网络的节点或者边连通性越高，该网络就越容易抗节点或者边故障。

弹性光网络不仅会受到诸如随机噪声和多址碰撞等无意干扰，还会受到敌对干扰机的攻击。常见的光纤网络攻击方式为窃听或者服务终端技术，对于这两种常见的攻击方式，多重不相关路径的安全传输技术都能够有效防止。首先，由于对同一个业务分配了不同的独立光路，相互不重叠的频谱以及不同的调制格式，极大增加了攻击者攻击此光纤网络的难度。一般地，通常对于攻击者来说，其只需要攻击光网络中的一条链路即可。而对于采用多重不相关光路技术的光网络，假使此网络对于某个请求，分配了三条不相关光路，如果这三条光路同时进行传输，攻击者仍旧只需要攻击其中一个链路即可。但是假使每次只是随机地选择一条光路进行传输，网络攻击者只能对整个请求的一部分进行窃听，这提高了整个光纤网络的安全性。

2.2 路由和资源分配

利用整数线性规划在给定数目的业务和给定的网络拓扑下，为每个业务进行路由和资源分配，在满足每个业务安全性要求的前提下，最小化网络总的资源消耗；或者在满足不超过网络总的资源的情况下，最大化每个业务的安全性。

弹性光网络的主要优势有：（1）子载波不再基于波长进行带宽分配，而是更细粒度；（2）借助带宽可变收发器和带宽可变光交叉连接来实现根据业务需求动态调整信道数据速率；（3）借助软件来改变调制格式，以此获得更好的频谱效率。在其各种实现技术中，光正交频分复用技术已经成为了研究的热点。OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，正交频分复用）是一种多载波调制技术，它将数据流分布在任意一组正交的低速率子载波上。这些正交子载波在频域上重叠。和传统的波分复用网络相比，基于 OFDM 的弹性光网络能够实现亚波长和超波长的各种业务需求。通过以适当的调制格式分配给一个或者多个相邻的频谱槽，可以实现在两个节点之间建立全光的频谱路径。当两个频谱路径共享一条或者多条物理链路时，应该将这些频谱路径用保护带宽分隔开，因为要用于滤波和恢复信号。弹性光网络的基本问题是 RSA（Routing and Spectrum Allocation，路由和频谱分配）问题。在基于 OFDM 的光网络中，子载波的调制格式可以根据业务的需求量和光路的传输距离进行灵活调整。当考虑 QoT（Quality of Transmission，传输质量）时，由于沿着光路的光纤链路上累积了信号衰减，最大光传输距离受到严格限制。传输速率与传输距离的关系是：信噪比每增加 3dB，传输范围就减少一半。比如，8QAM（3 bit/symbol）可以代替 QPSK（2 bit/symbol），但是 8QAM 信号的传输距离应该减少到 QPSK 的一半，所以当考虑 QoT 时，RSA 问题应该考虑采用适当的调制水平。

为了解决上述所有问题，必须开发新的 RMLSA（Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation，路由、调制格式和频谱分配）策略和算法。新的频谱管理方案的难点在于：

（1）频谱相邻约束：分配给业务的频谱一定是一块相邻的频谱槽。

（2）频谱连续性约束：此约束类似于波分复用网络中的波长连续性约束。在请求端到端的连续链路上必须分配相同的连续频谱槽。

（3）调制格式的选择：调制格式的选择会受到所需带宽和传输距离限制的影响。

2.3 调制格式选择和频谱分配算法

通常来说，频谱和调制格式应该同时进行分配，这是因为当所有业务的请求速率都是相同的情况下，如果采用不同的调制格式，那么不同请求的符号速率是不尽相同的，这会导致不同网络请求所占用的频谱资源不相同。在进行频谱和调制格式分配的时候，本课题算法的目标是能够在有限的频谱资源下，最大化可成功连接的光路总数。很明显，对于同一个网络请求，分配给它的不相关路径越多，它的安全性越高。通常来说，影响调制格式分配的因素有很多，但是本课题仅仅考虑实际路径长度对调制格式的影响：调制格式越高，虽然信号的信息量更多，但是发射功率相同的情况下，信号的抗干扰能力越差。相反，调制格式较低有利于进行长距离的信息传递。综上，暂定将较高的调制格式分配给实际链路较短的链路，而将较低的调制格式分配给实际链路较长的链路。频谱分配方式通常分为 Fixed Segmentation 和 Adaptive Segmentation 两种分配方式。前者对整个频谱资源根据链路的调制格式进行分区，分为 BPSK 区、QPSK 区、8PSK 区和 16QAM 区等，当需要对链路进行频谱分配的时候，根据其所用的调制格式，在相应的分区内寻找可用的频谱资源即可。Fixed Segmentation 这种方式的缺点在于每个频谱分区固定，不够灵活。而Adaptive Segmentation 就要更加灵活了，它主要的分配方式是，前面基本和 Fixed Segmentation 一样，但除了分成 BPSK 区之外，还需要分出一块适用区，然后对链路进行频谱分配的时候，根据其所用的调制格式，在相应的分区内寻找资源，如果相应的分区内没有资源，再在适用区寻找资源。

2.4 多重不相关路径的求解

分为多重不相关路径的独立求解和多条不相关光路的融合求解两个部分。设计启发式算法，对每个动态的业务进行满足其安全性要求的路由和资源分配；或者为每个动态的业务利用网络剩余的资源最大化其安全性。

2.5 进行仿真验证和数据分析

给出不同拓扑和不同业务的情况下，资源的消耗，阻塞率，网络总的安全性等性能指标。首先依据一组静态网络请求，分别验证采用正常多重不相关光路以及分配BPSK的多条不相关光路以及多条不相关光路的链路建立成功率并进行对比。这是因为BPSK这种调制格式虽然传输距离够远，但是它占用的频谱资源也较多，而在频谱资源有限的情况下，如果对所有连路都分配BPSK调制格式的话，不仅会浪费资源，还会增加网路阻塞的概率。接下来对比分别采用多重不相关路径的链路建立成功率，猜测，建立越少的链路，需要分配越少的频谱资源，建立成功的概率就越高。

关键技术

本研究课题的关键技术如下：

光纤网络的安全传输问题是近年比较受关注的话题，但是通常所采用的安全传输手段基本都是从光物理层进行的，本文首次将多重不相关路径应用到光纤网络的安全传输中，在光控制层实现信息的安全传输。

本课题的多重不相关路径的定义，即这几条不相关路径是指什么不相关，具体有几种不相关。再进行完对不相关光路的定义之后，下面就是采取多重不相关路径的传输技术，怎样能够达到光纤网络安全传输的要求，以及采取多重不相关光路的安全传输技术能够有效防止哪些方式的攻击手段。

最近基于OFDM的弹性光网络作为一种具有高业务速率适应性和提高频谱利用效率的有前途的技术被广泛研究。本课题开发的混合整数线性规划模型，解决弹性光网络中基本的路由、调制格式和频谱分配问题，重点是在考虑最大光传输距离的情况下为每个请求确定适当的调制格式，此外，采用多种调制格式有助于缓解光纤链路间频谱消耗不均衡的现象。

本课题最后建立了一个求解动态业务的RMLSA问题的启发式算法。动态的RMLSA问题在业务到达网络时，根据给定的需求选择多条路由，并在这些路由上分配频谱。通过仿真研究了多重不相关路径在网络安全性和阻塞率方面的优势。

论文计划、进度和目标

笔者的论文篇章结构目前暂定为总共五章。

第一章是绪论，主要阐述了论文的研究背景，光网络的发展以及弹性光网络的概述和目前的发展现状，包括国内外发展现状。除此之外，还会简单介绍常见光纤网络的攻击和防御手段，以及弹性网络中多条不相关路径的发展史。

第二章会首先对弹性光网络的特征进行阐述，然后基于论文研究的重点问题：路由选择和频谱分配进行了重点分析，包括几种路由选择方式，以及目前常用的频谱分配算法。最后，介绍一下多条不相关光路的定义、说明为什么采取多条不相关光路的传输技术能够达到安全传输的目的，并提供一种笔者认为可行的多条不相关光路的方案。

第三章预计研究EON中的RSA问题。提出了基于链路的MILP（Mixed Integer Linear Programming，混合整数线性规划）公式，以确定每个业务的路由，调制格式和频谱分配，并考虑了QoT（Quality of Transmission，传输质量）。目标是尽量减少网络中所需的频谱槽数量，以满足所有业务需求。最后，通过示例对MILP模型进行了评估和比较，并对数值结果进行分析。

已做的MILP实验证明了越少条数的不相关光路，其失败次数越低，但是由于考虑多重不相关光路进行安全传输，所以过少的不相关光路条数是不能很好地保证传输的安全性，故在阻塞率和安全传输的综合考虑下，选取不相关光路的时候应该折中采取，实验时所选的就是折中的三条不相关光路。

第四章主要是针对动态业务的频谱分配问题进行了研究，并提出了启发式的动态频谱分配算法。

本章的动态业务比较特别，除了基本的源节点、目的节点、带宽和持续时间之外，还定义了此业务在其中一条光路上传输的最长时间，暂且命名为忍受时间。也就是说，业务在某条链路组传输时，最多在此条路径传输此段时间，事件过后，必须再切换到另外一条不相关路径上继续传输。这么做能够很大程度上提升光网络的安全性。首先会介绍所提的频谱分配算法用到的网络基本假设、术语定义以及数学模型，其次对此算法进行详细介绍，包括流程图和算法举例。最后，对算法的功能进行了实现，并通过与其他算法的对比，得出结论。目前的工作任务是致力于此部分的算法设计。

第五章主要是对全文内容的总结以及对未来待研究的工作做出了展望。