



北京邮电大学

硕士研究生学位论文开题报告

学 号： 2020141204

姓 名： 何岩

学 院： 电子工程学院

专业(领域)： 电子信息（电子与通信工程方向）

研究方向： 信息光电子与光通信

导师姓名： 李新

攻 读 学 位： 电子信息硕士

2021 年 12 月 22 日

论文题目	基于多重不相关路径的光网络安全传输技术		
选题来源	国家自然科学基金项目	论文类型	基础研究
开题日期	2021-12-23	开题地点	新科研楼 314

一、立题依据（包括研究目的、意义、国内外研究现状和发展趋势，需结合科学研究发展趋势来论述科学意义；或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录）（不少于 800 字）

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。目前已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。然而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。

参考文献：

[1] H. Cheng, E. Wijanto, T. Lien, P. Lai and S. Tseng, "Multiple Access Techniques for Bipolar Optical Code Division in Wireless Optical Communications," in IEEE Access, vol. 8, pp. 83511-83523, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2991071.

[2] P. D. Townsend, "Secure communications on passive optical networks using quantum cryptography," Proceedings of European Conference on Optical Communication, 1996, pp. 35-38 vol.3.

[3] Xuelin Yang, Zanwei Shen, Xiaonan Hu and Weisheng Hu, "Physical layer encryption algorithm for chaotic optical OFDM transmission against chosen-plaintext attacks," 2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICTON.2016.7550597.

[4] J. Guo, X. Li, Y. Tang, L. Zhang, T. Gao and S. Huang, "An All-Optical Binary Pattern Recognition System Applied in Photonic Firewall based on VPI Simulation," 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), 2019, pp. 1-3, doi: 10.23919/PS.2019.8817663.

[5] B. Li and Y. Kim, "Efficient routing and spectrum allocation considering QoT in elastic optical networks," 2015 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2015, pp. 109-112, doi: 10.1109/TSP.2015.7296233.

二、研究内容和目标（说明课题的具体研究内容，研究目标和效果，以及拟解决的关键科学问题。此部分为重点阐述内容）（不少于 2500 字）

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，最大共享风险的业务量等描述。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）不同链路之间的传播路径和路径所经过的节点不重叠，即，不相关路径彼此独立；
- （2）不同链路之间的所占用的频谱资源要彼此之间相互不重叠；
- （3）不同链路之间所用的调制格式应该保证两两互不相同。

在 jammer 干扰器开启以后，在给定 s 和 d 节点之间仍然可用的最大不相连的通信路径数称为无线连通性（radio connectivity），或者说是断开 s 和 d 之间通信所需的最小干扰器的数量。在本课题中，引入了网络连通性的度量，它适用于在敌对干扰存在的情况下衡量一对节点之间的可靠性。由于弹性光网络高度复杂的特性，本课题采用了简化和抽象的网络连通性模型。传统方式下，节点连通性或者边连通性可以用来衡量网络的可靠性。两个节点之间的节点连通性定义为让这两个节点无法通信所需要移除的最小节点数目，而两个节点之间的边连通性定义为让这两个节点无法通信所需要移除的最小边数目。与此相似，对于整个网络来说，节点或者边连通性定义为网络不能正常通信的所需要移除的节点或者边数目的最小值。所以，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。不论是节点之间还是整个网络的节点跟边连通性，都能通过时间复杂度为多项式的高效算法计算出来。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。本课题还需要对弹性光网络易受敌对干扰机的影响的特性进行研究。定义了一个新的参数，称为无线电连通性（radio connectivity），用 C_r 表示，以此来测量源和目的节点之间的可靠性。

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，由于对同一个链路分配了不同的独立光路，相互不重叠的频谱以及彼此不相同的调制格式，极大增加了攻击者攻击此光纤传输网络的难度。详细来说，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进行传输的光纤通信网络，假使此光纤传输网络对于一个网络请求，其分配了三条不相关光路，固然如果三条不相关光路同时进行传输，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的选择一条光路进行传输，网络攻击者只能对整个网络请求的一部分进行窃听，显然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。在弹性光网络的各种实现技术中，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，实现了灵活的资源分配和更高效的频谱资源利用。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 的弹性光网络中，每一个子载波都可以在发射端和接收端通过数字信号处理技术进行单独处理。也就是说，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。虽然光 OFDM 能够支持较大的信道容量，但是 QoT 影响着调制格式的选择。传输速率与传输距离的关系是：每个符号可以增加一个额外的比特，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：这个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量的情况下，资源的消耗，阻塞率，网络总的安全性等性能指标。

首先保持一组随机出来的静态网络请求，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 x 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 2 重、3 重、4 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。

三、研究方案设计及其可行性分析（包括：研究方法，技术路线，理论分析、计算、实验方法和步骤及其可行性等）（不少于 800 字）

研究方法，技术路线，理论分析、计算、实验方法和步骤及其可行性

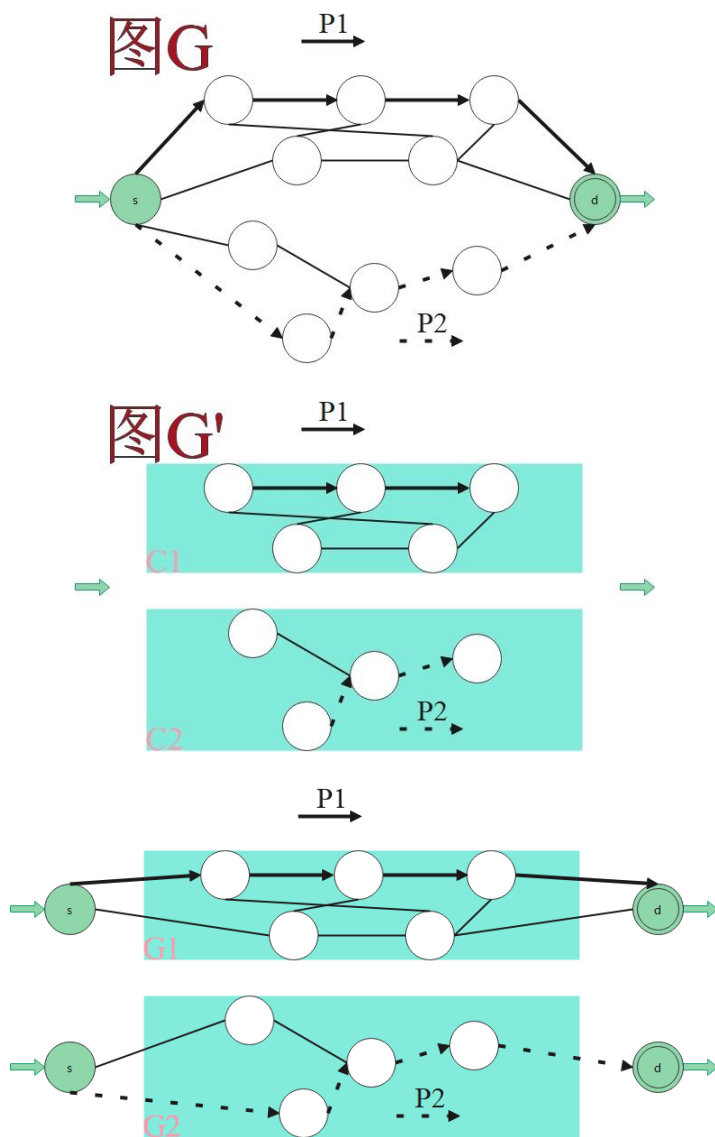
本课题研究弹性光网络中的路由和频谱分配问题，提出了一种有效的基于链路的混合整数线性规划模型，在考虑光路的最大传输距离的情况下，给每个业务确定多条不相关路由、调制水平和频谱位置。为了提高频谱效率，往往选择最高调制水平。然而，如果考虑可接受的 QoT，最高调制水平光路的传输距离十分有限。所以，所提出的模型和算法需要找到频谱槽的数量、调制水平和业务传输距离的权衡。本课题的目标是尽可能的最大化网络的复杂度，即，给每个业务寻找尽可能多的不相关路径，在此基础上，最小化所需的频谱资源，从而满足所有的业务需求。

具体来说，暂定研究路线是先研究静态业务，后研究动态业务。静态业务下，先给一个请求进行独立求解，然后随机产生多个请求，为每个请求寻找 2 到 3 条不相关路径，并在候选路径上进行资源分配；最后，求解在满足网络拓扑条件和各个约束的条件下，给每个请求找尽可能多的路径。在做线性规划时，有如下约束需要考虑：单路路由约束、无环路约束、链路不相交约束、流守恒约束、起始频率槽索引排序约束、频谱连续性和非重叠频谱分配约束、物理链路使用约束、业务调制格式约束、不相关调制格式约束、最大光路传输距离约束、不相关光路频谱不重叠约束等等。基于此，拟使用 CPLEX Optimization Studio 12.8 解决 ILP 问题。

启发式算法部分，分为两个部分：路径算法和频谱分配及调制格式选择算法。路径选择方面，在给定网络拓扑 G 和业务需求 (s, d) 之后，要对整个网络拓扑划分多个子图。具体划分步骤如下：

- (1) 除 s 和 d 节点以外，对于节点度数为 1 的节点，删除该节点及其关联的链路；
- (2) 除 s 和 d 节点以外，对于节点度数为 2 的节点 v_1 ，它与节点 v_2 和 v_3 相邻，则删除 v_1 并连接 v_2 和 v_3 ；
- (3) 此时网络拓扑由 G 变为 G'
- (4) G' 中去掉源节点 s 、目的节点 d 和与 s 、 d 经过的连接，变成 G^{\wedge}
- (5) 得到图 G^{\wedge} 的所有子图，不妨命名为 C_1 、 C_2 、 \dots 、 C_k ；
- (6) C_1 、 C_2 、 \dots 、 C_k 与 s 和 d 节点组成的图命为 G_1 、 G_2 、 \dots 、 G_k

经过上述预处理之后，分别找出每个子图 G_i 的最大独立路径数，并将它们相加，就能得到原始拓扑链接 s 和 d 节点的最大独立路径数目。从而，上述预处理步骤会让问题的规模变小。过程示意图如下：



四、本研究课题可能的创新之处（不少于 500 字）

本研究课题的特色与新颖（创新）之处如下：

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。

本课题所采用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光纤网络哪种攻击手段。

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。本课题要开发一个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整数规划线性模型以及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。最后，本课题也比较了多重不相关路径的启发式算法和整数线性规划模型的性能。

五、研究基础与工作条件（1. 与本项目相关的研究工作积累基础 2. 包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决途径）（不少于 500 字）

已经有如下文献对弹性光网络的 RMLSA 问题进行了研究。文献[4]中提出了一种基于路径的 ILP 模型来解决静态业务的 RMLSA 问题。在该模型中，每个源目的地的 k ($k = 3$) 条候选路径是预先计算的。业务请求只在这 k 条路径中的一条上路由。目标是在考虑频谱连续和非重叠约束的情况下，最小化网络中任意链路上的最大利用频谱索引。文献[5]提出了一种基于链路的 RSA ILP 线性模型，其目标是最小化整个网络中利用 FSs 的最大索引号。为了减少变量的数量和计算复杂度，该模型采用了[4]中的方法，通过开始和结束的 FS 索引来定义每个频谱路径。文献[6]考虑了两个最小化目标：任意光纤上分配的最大子载波索引，以及所有光纤上的子载波总数。但是文献[5]和[6]都没考虑调制格式的选取问题。本次研究在进行仿真的时候，由于没有实际数据的来源，只能创造数据，基于这点，并不能确定每一条链路的安全性要求。至于动态业务，也由于未曾被给予网络拓扑结构数据以及链路请求的数据，所以并不知道具体网络的请求到达时间和持续时间，故在此，可以采用整数随机产生器，对每一个链路都随机产出数字以表示多久之后进行业务删除。与本课题相关的研究工作积累基础已做到，在给定的网络拓扑和静态业务请求集合下，给每一个业务寻找 2 条和 3 条不相关路径；其次，已经初步完成在保证每个业务尽可能多的不相关路径条件下，最小化所消耗的频谱资源。本课题将其应用到一个案例研究中。在 Intel Core (TM) i7-7500UCPU(2.70GHz) 和 8 GB 内存的计算机上，通过优化软件 IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Version12.6 得到所需要的实验结果。

由于优化模型的计算复杂度过高，我们考虑开发启发式算法来解决大规模网络中的 RSA 问题，此外，还可以研究弹性光网络的能效问题。至于算法部分，拟初步采用贪婪算法，最后演变为启发式算法。为了评估所提出模型的性能，由于线性规划模型和启发式算法是在计算机上进行的，目前暂无缺少的实验条件。

参考文献：

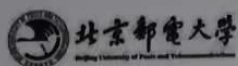
[4] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos and E. A. Varvarigos, "Elastic Bandwidth Allocation in Flexible OFDM-Based Optical Networks," in Journal of Lightwave Technology, vol. 29, no. 9, pp. 1354-1366, May1, 2011, doi: 10.1109/JLT.2011.2125777.

[5] A. Cai, G. Shen, L. Peng and M. Zukerman, "Novel Node-Arc Model and Multiiteration Heuristics for Static Routing and Spectrum Assignment in Elastic Optical Networks," in Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 21, pp. 3402-3413, Nov.1, 2013, doi: 10.1109/JLT.2013.2282696.

[6] Y. Wang, X. Cao, Q. Hu and Y. Pan, "Towards elastic and fine-granular bandwidth allocation in spectrum-sliced optical networks," in Journal of Optical Communications and Networking, vol. 4, no. 11, pp. 906-917, Nov. 2012, doi: 10.1364/JOCN.4.000906.

学位论文工作计划

时间	研究内容	预期效果
2021.11-2022.01	看国内外关于多重不相关路径的论文，撰写论文开题报告。	理论学习与分析，提出系统方案。
2022.01-2022.03	构建完成初步的基于多重不相关路径的 MILP，可以完成路由和资源分配实验。	建立基于多重不相关路径的 MILP，并完成相关实验。
2022.04-2022.08	调研把网络分割成不相交的路径的算法，找到可靠方法并应用到多重不相关路径的安全传输技术中。	结合网络分割成不相交路径算法，预先计算一组不相交的候选链路
2022.08-2022.12	将网络分割算法与基于多重路径的频谱资源分配相结合，使设计的安全传输技术能够正常工作。	完成分割和资源分配方案，同时实现资源消耗最小化。
2022.12-2023.01	完成毕业论文撰写	提交毕业论文
2023.01-2023.03	准备毕业答辩	完成毕业论文答辩，顺利毕业



北京邮电大学硕士研究生学位论文开题报告

评 定 小 组 成 员	姓 名	职 称	导师类型	单位名称	职务
	郭秉礼	副教授	硕导	北京邮电大学	组长
	尹珊	副教授	硕导	北京邮电大学	成员
	李新	副教授	博、硕导	北京邮电大学	成员
	薛旭伟	岗位特聘副教授（人才引进）	博、硕导	北京邮电大学	成员
	黄善国	教授	博、硕导	北京邮电大学	成员

导师意见：

本课题的设计思路明确，利用多重不相关路径提高光网络的安全性。本课题的研究方法和研究步骤基本合理，难度合适，学生能够在预定时间内完成该课题的设计。选题具有理论意义和实用价值，进度计划安排合理，同意开题。

导师（签名）：李新

日期：2021年12月26日

开题报告小组意见：

同意开题

组长（签名）：郭秉礼

日期：2021年12月26日

学院意见（签章）：

负责人：

日期： 年 月 日