

北京邮电大学

本科毕业设计（论文）



题目：光网络中基于多个不相关光路的安全传输技术研究

姓 名 吉晨曦

学 院 电子工程学院

专 业 电磁场与无线技术

班 级 2017211901

学 号 2017213558

班内序号 17

指导教师 李新

2021 年 5 月

北 京 邮 电 大 学

本科毕业设计（论文）诚信声明

本人声明所呈交的毕业设计(论文),题目《**光网络中基于多个不相关光路的安全传输技术研究**》是本人在指导教师的指导下,独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得北京邮电大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

申请学位论文与资料若有不实之处,本人承担一切相关责任。

本人签名: _____ 日期: _____

光网络中基于多个不相关光路的安全传输技术研究

摘 要

随着光纤通信系统的传输速度越来越快，容量越来越大，信息化使得人们的生活变得越来越便利，然而，传输的安全性问题也随之慢慢进入人们的视线，如何实现光纤传输系统的安全传输也成为了最近的热点话题，光纤通信系统的安全传输技术也慢慢地发展起来。多条不相关光路的传输是一项在弹性光网络中十分重要的内容。相比 DWDM 系统，其极大程度地降低了网络阻塞率且增加了传输的效率。本文首次将多条不相关光路的光网络传输技术应用于光纤网络安全传输中，打破了以往光纤安全传输技术都是在光物理层进行的壁垒，于光控制层实施光纤网络的安全传输。

在介绍完为何采取多条不相关光路的光纤网络传输技术能够达到安全传输的效果之后，本文采用 MATLAB 进行仿真平台的搭建，对随机产生的网络请求，采用网络分层后，并根据启发性算法，选择多条不相关路径，之后根据调制格式算法和频谱分配算法为路径分配调制格式和频谱资源。最后通过仿真，得出在保证链路建立成功率的情况下多条不相关光路的最佳方案。

关键词：多条不相关光路 网络分层 启发性算法 RMLSA 算法

Research on Digital Twin-based Novel Communication Technology

ABSTRACT

With the increasing speed and capacity of optical fiber communication system, information technology makes people's life more and more convenient. However, the problem of transmission security is also gradually coming into people's sight. How to realize the safe transmission of optical fiber transmission system has become a hot topic recently, and the safe transmission technology of optical fiber communication system is also slowly developing. The transmission of multiple uncorrelated optical paths is very important in elastic optical networks. Compared with DWDM system, it greatly reduces the network blocking rate and increases the transmission efficiency. In this paper, the optical network transmission technology with multiple unrelated optical paths is applied to the secure transmission of optical fiber network for the first time, which breaks the barrier that the previous optical fiber secure transmission technology is carried out in the optical physical layer, and implements the secure transmission of optical fiber network in the optical control layer.

After introducing why the optical fiber network transmission technology with multiple uncorrelated optical paths can achieve the effect of safe transmission, this paper uses MATLAB to build the simulation platform. After the random network requests are layered, and according to the heuristic algorithm, multiple uncorrelated paths are selected. After, according to the modulation format algorithm and spectrum allocation algorithm, the modulation format and spectrum resources are allocated for the path. Finally, through simulation, the optimal scheme of multiple uncorrelated optical paths is obtained under the condition of ensuring the success rate of link establishment.

KEY WORDS: Multiple uncorrelated paths Network layering Heuristic algorithm RMLSA algorithm

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 常见光纤网络的攻击和防御手段.....	1
1.2 RMLSA 算法算法的简介	1
1.2.1 路径分配算法	1
1.2.2 频谱分配算法	1
1.3 论文主要内容.....	2
第二章 多条不相关光路的定义.....	3
2.1 多条不相关光路的定义	3
2.2 多条不相关光路如何增加光纤网络的安全性	3
2.3 一种假设可行的多条不相关光路分配方案	4
2.4 本章小节	5
第三章 多条不相关光路分配算法的介绍.....	5
3.1 路径算法	5
3.2 频谱分配和调制格式分配算法	7
3.3 本章总结	10
第四章 MATLAB 的仿真及结果分析.....	10
4.1 MATLAB 简介.....	10
4.2 MATLAB 的具体实现简单描述.....	11
4.3 MATLAB 的仿真以及结果分析.....	12
4.4 本章总结	14
第五章 总结展望.....	14
5.1 工作总结	14
5.2 工作展望	14
参考文献.....	16
致谢.....	17
附录.....	18

第一章 绪论

1.1 常见光纤网络的攻击和防御手段

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。然而人们在享受这些便利的同时,也对光纤网络的安全传输提出了越来越多的要求。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进行干扰信号的注入,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。

1.2 RMLSA 算法的简介

1.2.1 路径分配算法

对于采取不相关光路的光纤传输技术,首先比较重要的就是如何寻找到多条不相关光路,在此之前,人们对于多路径传输的研究,是由于单路径可能会导致某些链路建立失败,比如弹性光网络中由于存在碎片化问题,会导致网络低效化,这种情况下采取单通道可能无法建立链路,但是多路径可以建立链路^[5]。除了建立起终点多条路径来摆正有效性之外,还可以考虑选取多个备份用的终点,再分别建立一条从起始点到不同终点的路径,亦可以起到保证数据传输有效性的作用^[6]。故采取多路径的方式来建立链路实现网络请求^[7]。其主要的多路径分配依据还是网络请求的频谱要求和链路时延。之后,对于多路径的研究越来越多,对多路径的选择也变得越来越严谨^[8-9]。本文所采用的路径选择算法为启发性算法,其相比于其他的路径选择算法,最大的优势在于能够选择出的不相关光路的条数最多。

1.2.2 频谱分配和调制格式分配算法

随着光纤通信的发展,DWDM 网络曾成为光纤通信的主流,如何进行 DWDM 系统的资源分配,即 RWA 问题,一时成为当时的热点^[10]。然而对于 DWDM 网络来说,由于网络的特性,对于每一条光路,其是不能够进行不同调制格式的分配的,这导致了网络的低效性,且造成了频谱资源的浪费,显然 DWDM 系统仍旧存在很大的改进空间。随着技术的发展,弹性光网络成为目前光纤传输的主流,其与 DWDM 系统相比最主要的优点就是其能够对不同的链路进行不同调制格式的分配^[11]。之前在 DWDM 系统中比较容易证明 RWA 问题为 NPC 问题,故较好的解决办法是采取启发性算法,通过有限的计算得到较好的仿真结果,比较常见的 RWA 的启发性算法为遗传算法,模拟退火算法和蚁群算法^[12]。而在弹性光网络中,虽然存在 ILP 算法可以进行仿真,但是由于其仅能仿真静态分配问题且结果在拓扑网络结构较大时与实际差别较大^[13],且亦很容易证明无论是 RMLSA 问题还是 RML+SA 问题,都可以证明其仍旧是 NP-hard 问题,故据此仍旧考虑采用启发性算法进行模拟仿真。在 RSA 问题中,需要遵循频谱连续性约束和频谱邻接性,其中频谱连续性约束是指对于相同光路上的每一个链路上,都应被分配相同的频谱资源。这基本与 DWDM 系统中的波长一致性约束是基本相同的,唯一的区别是将分配的资源从波长变成了频谱。而频谱邻接性约束是指光路径频谱轴上要占用连续的频谱资源^[14]。

而对于调制格式分配算法，固然影响调制格式分配的因素很多，但是就当前问题来说，决定性因素仍旧为链路的实际距离^[15]。

1.3 论文主要研究内容

诚然，光纤网络安全传输技术发展的越来越成熟。但是目前基本所有的光纤网络安全传输技术基本都是在光物理层进行的，本文首次从光控制层实现光纤网络的安全传输功能。其主要是多条不相关光路的原因，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。

论文每一章的具体内容安排：

第一章背景介绍中，第一小节简单介绍常见光纤网络的攻击和防御手段，第二小节简要介绍了弹性网络中多条不相关路径的发展史，最后第三小节对论文工作进行概括介绍。

第二章的第一小节介绍了多条不相关光路的定义，在第二小节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。最后在第三小节提供一种我们认为可行的多条不相关光路的方案。

第三章的第一小节介绍了采取多条不相关光路的安全传输中所需要用到的路径分配算法，而在第二小节介绍了采取多条不相关光路的安全传输中所需要用到的调制格式分配算法和频谱资源分配算法，并提供了伪码以便更好的理解和仿真。

第四章的第一小节简要介绍了 MATLAB 之后，在第二小节里较为详细地介绍了仿真的具体思路以及仿真过程中部分细节的处理。最后在第三小节对仿真结果进行分析并和几种其他情况的仿真结果进行对比。

第五章则是对前面的工作进行总结和对下一步工作的展望。

第二章 多条不相关光路的定义

纵观常见的网络攻击的防御手段，基本都是从物理层来进行，现本文考虑采用 RSA 算法，在控制层进行光网络种基于多个不相关光路的安全传输。首先在第一节需要对本文所采用的多条不相关光路的定义，即多条不相关光路是指什么不相关，具体有几种不相关。再进行完对不相关光路的定义之后，接下来在第二节需要进行说明的是采取多条不相关光路的传输技术，如何能够达到光纤网络安全传输的要求，以及采取多条不相关光路的安全传输技术能够有效地防止哪些方式的光纤网络攻击手段。最后在第三节，说明我们对所有情况下，整个不相关光路进行传输分配提出的一种假设可行方案。

2.1 多条不相关光路的定义

首先来说，想要说明光网络中基于多条不相关光路的安全传输技术的具体实现，必须要对多条不相关光路进行定义。需要说明的是本文中所提到的不相关光路基于弹性光网络系统。

对于不相关路径来说，如果要保证每条路径之间互不相关，就需要保证，每条路径所经过的节点必须完全不相同，即任意两条不相关的光路，除了链路起点和链路终点之外，不存在相同的链路节点。此即常说的独立光路。采用独立光路的好处是假使存在一个 jammer 对拓扑网络中非起点终点之外的节点进行了阻塞或者监听，导致经由此节点的所有链路发生链路阻塞或者链路被监听，那么在这种情况下，如果我们想要使 jammer 所造成的影响达到最小，那么最好保证通过此节点的链路尽力少，但考虑到不能造成资源浪费，那么在这种情况下，显然一个节点最多允许被放到一条链路请求路径之中，此即独立光路的定义。接下来，根据光纤网络的物理模型来说，不同链路之间应该采用不同的频谱资源，采取这样的方式能够最大程度降低网络的阻塞率，也符合光纤网络对于不同链路分配不同频谱的物理常识。以上是从独立光路和光纤网络传输系统的常识对不相关光路进行定义。通常来说，如果仅是考虑光纤网络来进行传输，不考虑此网络的光纤网络传输性能的话，一个常规 RSA 算法基本只需要考虑这些即可（其实以前的密集波分复用网络也确实是这样做的），但是如果是要采用多条不相关光路进行安全传输的话，不相关链路之间越多的不同，对于攻击者来说，越难窃听或者攻击。亦感谢光纤网络技术的发展，在弹性光网络中，对于不同的链路请求，可以分配不同的调制格式进行传输，于光纤网络传输来讲，其能够更好地提高网络地频谱效率和传输性能，但对于光纤网络的安全传输技术来说，不同链路之间不同的调制格式能够增加窃听者或者干扰者的窃听或者干扰成本和技术难度，能够更有效地保障总链路的安全性

由上讨论可以论证，对于为了安全传输的光路来说，其基本需要满足的三个要求是（1）：不同链路之间的传播路径和路径所经过的节点不重叠（即独立光路）；（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。

2.2 多条不相关光路如何加强光纤网络的安全性

现阶段，比较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，多条不相关光路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，而对于采用多条不相关光路进行传输的光纤传输网络，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，但是假使上午采用链路一进行信息的传输，下午采用链路二进行信息的传输，最后到了晚上采用链路三进行新系的

传输,在这种情况下,网络攻击者只能对整个网络请求的一部分进行窃听或者服务终端技术进行攻击,显然提高了整个光纤网络的安全性,然而对于整个网络请求来说,终端还是能够完美的收到信息。上述这种方式虽然能够在一定程度上增加网络的安全性,但单就窃听来说,攻击到一条链路的攻击者,仍旧能够窃听一个上午或者一个下午或者一个晚上中网络中传输的信息,仍旧无法避免信息的泄露,故此,可以考虑更加复杂但是更加安全的传输方式,即整个网络中的第一个码字通过第一条链路进行传输,第二个码字通过第二条链路进行传输,第三个码字采用第三条链路进行传输,第四条码字再通过第一条链路进行传输,也可以采用一个输出 1-3 的随机整数输出器,对于每一个码字,随机数输出什么数字,就采用哪一个链路进行传输,这种情况下,攻击者即便窃听者窃听到了一条链路,其接受到的也是无规则而且碎片化的码字,对于其来说是根本无法破解且没用用途的,除非其能够同时将三条不相关链路全部窃听,暂且不谈如何定位不同链路具体位置,如何寻找不同链路所占用的频谱资源以及判断不同链路所采用的调制格式,假使对于不同链路再采用完全不同的加密技术,攻击者如果想要窃听整个网络的难度可想而知。然而对于整个网络请求来说,终端还是能够完美地接收到信息,只是增加了接收地复杂度。综以上讨论,如果只是一个普通的民用或者普通商用的网络,仅做到不同的时间采用不同的链路进行信息的传输即可,其在保证接收端的复杂度不高的情况下,仍旧能够较有效地提高整个网络传输的安全性。而对于比较机密的商用网络或者国家机密商用网络,可以采用对不相关光路再采用完全不同的信息加密技术,再对每一个码字进行随机选择链路进行传输,虽然增加了整个网络的复杂度,但是能够最大程度上保证网络的安全传输。

相同的道理,通过多条路径,能够有效防止对于单一光纤采取的注入光攻击方式,只需要在终端进行多条光纤的比对,通过相关的检测就可以有效对比出是否存在光纤存在被注入光攻击,并能够很明显确认是哪条路径上的光纤被攻击了,能够很有效地保护信息安全。

而对于可能存在的攻击者采用 jammer 对链路进行传输阻塞的情况,可以考虑所有链路同时进行传输,首先先用最短的路径进行传输,如果能够接收到继续用,如果不能够接收到,被 jammer 阻塞,就考虑第二短路径进行传输,以此往复。

2.3 一种假设可行的多条不相关光路分配方案

对于不相关光路的使用。通常来说对于一个拓扑网络来说,可以用 $G(s,d,B)$ 其中 s 代表源节点, d 代表目的节点, B 代表带宽。而对于本项目,我们考虑对拓扑网络进行多一个参数的设定即 $G(s,d,B,m)$, 其中 m 代表多路径的数目,通常在进行考虑的时候,由于 m 代表着不相关路径的数目,很显然,不相关路径的数目越多,那么这个拓扑网络的安全性就越高,在这样的考虑之下,我们通常对于没有安全性要求的链路请求,只为其分配一个链路,保证其能够传输即可,但是对于安全性能高的链路,就给予分配较多的不相关链路(在其拓扑结构允许的情况下),这样就能够加强网络的安全性。但对于这种情况,就提出了一个问题,那么就是当链路请求没有要求安全等级时,该如何进行分配,我在此提出的方案是,先通过路径分配算法,找到对于此拓扑网络最大的不相关路径数目,之后进行分类讨论,当可用链路少于等于 3 个可用链路,那么将这些链路都用来传输数据,当存在 3 个以上可用链路时,现根据某种方式选取其中三个链路进行传输,查看其效果,如果效果可以则继续进行传输,如果效果不佳则再从所有可用链路中根据某种标准选取 3 个链路进行传输,以此往复,直到传输效果稳定或者已经达到此拓扑网络最大的不相关光路数目。除了 m 的数目选择之外,正如之前所说,对于不同网络攻击的预防,应采取不同的选择路径方式,即对于监听网络来说,可以考虑根据时间的不同,随机选取多条可用链路中的一条进行传输,在这种情况下,能够较好的防止数据完全被

窃听走，增加了网络传输的安全性；当为了防止 jammer 时，可以考虑所有链路同时进行传输，首先先用最短的路径进行传输，如果能够接收到继续用，如果不能够接收到，被 jammer 阻塞，就考虑第二短路径进行传输，以此往复。

2.4 本章小结

本章主要对不相关光路的定义，并且对不相关光路如何能够加强网络传输的安全性进行描述，最后提供了一种假设可行的多条不相关光路的分配方案。

第三章 多条不相关光路分配算法的介绍

3.1 路径算法

对于常见的路径分配来说，其通常应该考虑的因素应该是路径长短，常用的算法有迪杰斯特拉（Dijkstra）算法和弗洛伊德（Floyd）算法。但对于多条不相关光路的安全传输技术中，在路径方面最重要的是在第二章所提及的独立光路。故，在此方面常使用的方式是启发性算法^[16]，以下对本文所采用的启发性算法进行介绍。

对于本文所采用的启发性算法，首先需要进行步骤的是对网络进行分层，即以链路的起始点为网络的第一层，与起始点相连接的网络节点为网络的第二层，再对与第二层节点相连接的网络节点为第三层，这里中，已经被分层的节点是不再进行分层的，即，当分配第三层的时候，虽然起始点也是和第二层节点相连接的网络节点，这种情况下要跳过起始点，即起始点仍旧是第一层节点，除起始点之外的节点则为第三层节点。以此往复，直到所有节点都分层完毕。在此需要说明的是，在进行代码编写的时候，由于每一条链路的起始点和终端点多数情况下都不相同，所以对每次链路请求到达失手，都应该根据链路请求的具体情况，对整个网络重新进行分层。

完成对于整个网络的分层之后，可以得到每个节点在此次网络分层中所在的层数以及每个节点处于相同层的节点的个数 $|L(v_x)|$ ，除此之外，根据网络拓扑结构，也很容易能够知道每个节点相邻的节点数 $|N(v_x)|$ 。接下来需要做的是对网络拓扑结构中每条边进行权重的赋值，在此举出我对于文献[16]的一些看法，文献[16]中所采用的赋值方式，是将每条边起始点其同层节点数的值赋给整条边，这样的设置方式意义不明，因为这会导致所有包含第二层节点的链路权重是一样的，在寻找路径的时候，这样的寻找方式是不可能有效从第二层节点选出优先度较高的那一个节点所在的链路来进行传输的，故我认为文献[16]实际是存在一定问题的，那我个人根据文献[16]对此进行了一些改良，在进行权重赋值的时候，我保留了文献[16]的同层节点数作为权重赋值参考量的同时，将每个节点的度数（即每个节点的相邻节点数）同时作为权重赋值参考量，并将两者进行相加，所得的值即为此条链路的权重。即 $weight(v_x) = |L(v_x)| + |N(v_x)|$ ，其中 $weight(v_x)$ 表示的每条链路的权重值。由于我们所要做的是选取多条不相关光路，正如在第二章所讨论的一样，不相关光路首先必须是独立光路，很显然，针对不同的节点，节点度数越多的节点，与其有关的链路个数也就越多，节点度数越少的节点，与其有关的链路个数也就越少，在这种情况下，显然如果想要得到最多条的不相关光路，首先需要把整个链路上所有节点总度数最小的挑出来，这样受影响的链路个数最小，再去挑选整个链路上所有节点总度数第二小的链路，以此类推。分层之后链路挑选的方式也呼之欲出了，即对权值分配后的网络拓扑结构 $G(V, E)$ ，根据每次网络请求的具体要求，通过 Dijkstra 算法首先选取权值最小的链路，然后删除链路上除了起始点和终点之外的所有节点以及与这些节点有关的链路，得到新的网络拓扑结构图 $G'(V, E)$ ，再对此结构图采用 Dijkstra 算法选取权值最小的链路，并删除链路上除了起始点和终点之外的所有节点以及与这些节点有关的链路，以此往复，直到起始点和终点无法相连在一起。当然以

上的描述存在一个漏洞，就是假使起始点和终点本身就存在一条链路，将两点相连在一起，那么这种情况下，虽然能够找到这条链路，但是由于每次在进行删除操作的时候，由于链路上只有起始点和终点，所以最后实际上根本没有删除任何节点任何链路，所以就会导致 $G'(V,E) = G(V,E)$ ，显然这种情况下，只要 Dijkstra 算法找到起始点与终点直连的这条链路，此后所有的链路都会是这条链路，并且算法会永远停不下来，因为起始点和终点将永不分离，故针对这种情况，需要加上一层判定，如果 Dijkstra 算法找出的链路是起始点和终点直连的链路，那么选出此条路径，并且删除起始点和终点直连的这条链路。

至此，本文所采用的路径选择算法介绍完毕，其对应的伪码部分如下：

算法 1 分层并且寻找不相关路径

```

输入：G, Alternate_letters, link_request, s
输出：path_matrix
01:number_of_network_layers=zeros(length(deg),1);
02:for j=1:length(deg)
03:    if isequal(Alternate_letters(j),link_request(number_of_link_counter,1))
04:        number_of_network_layers(j)=1;
05:    end
06:end
07:for i=1:length(deg)
08:    counter_layers=1;
09:    if number_of_network_layers(i)==counter_layers
10:        counter_layers=counter_layers+1;
11:        node_neighbor=neighbors(G,i);
12:        for j=1:length(node_neighbor)
13:            if(number_of_network_layers(node_neighbor(j))==0)
14:                number_of_network_layers(node_neighbor(j))=counter_layers;
15:            end
16:        end
17:    end
18:end
19:number_of_nodes_on_the_same_floor=zeros(length(deg),1);
20:for i=1:length(deg)
21:    temporary_parameters=number_of_network_layers(i);
22:    counter=0;
23:    for j=1:length(deg)
24:        if(number_of_network_layers(j)==temporary_parameters)
25:            counter=counter+1;
26:        end
27:    end
28:    number_of_nodes_on_the_same_floor(i,1)=counter;
29:end
30:weight_matrix=zeros(length(s),1);
31:for i=1:length(s)
32:    weight_matrix(i)=number_of_nodes_on_the_same_floor(s(i))+deg(s(i));
33:end
34:start_node=link_request(number_of_link_counter,1);

```

```

35:end_node=link_request(number_of_link_counter,2);
36:for i=1:length(deg)
37:    [P,d] = shortestpath(G_word,start_node,end_node);
38:    for j=1:length(P)
39:        path_matrix(i,j)=P(j);
40:        if isequal(P(j),start_node)
41:            else
42:                for n=1:length(s)
43:                                                            if
isequal(start_node,path_matrix(i,j-44:1))&&isequal(end_node,path_matrix(i,j))
45:                    G_word=rmedge(G_word,start_node,end_node);
46:                end
47:            end
48:        end
49:        if isequal(P(j),start_node)||isequal(P(j),end_node)
50:            else
51:                G_word = rmnode(G_word,P(j));
52:            end
53:        end
54:end

```

在此对输入输出进行解读，G 是网络拓扑结构，Alternate_letters 是个 cell 类型，其中还有 a 到 z 总共 26 个英文字符，link_request 是网络请求表，其中第一列代表网络请求的起始点 s，第二列表示网络请求的终点 t。最后的输出是 path_matrix，其中每一行代表一个可行的链路，里面所含有的元素，分别表示这一个可行链路所经过网络拓扑中哪些节点。number_of_link_counter 是代表时间的迭代次数。

3.2 频谱分配和调制格式分配算法

通常来说，频谱和调制格式应该同时进行分配，这是因为当所有网络请求信息速率是相同的情况下，如果采用不同的调制格式，那么不同的网络请求符号速率是不尽相同的，同时这会导致不同网络请求所占用的频谱资源不相同。在进行频谱分配和调制格式分配的时候，最终的目的是希望能够在有限的频谱资源下，最大化可成功连接的光路总数。显然，对于同一个网络请求，分配给其越多的不相关光路，其安全性越高，其次，对于整个网络来说，越多的不相关光路也意味着整个网络能够接受更多的网络请求，显然这也是有益的。接下来开始介绍本文所采用的频谱分配和调制格式分配算法。

由于本文所采用的频谱分配方式实际是根据链路所采用的调制格式作为指标进行分配的，故在此先介绍本文所采用的调制格式分配方法。通常来说，影响调制格式分配的因素有许多，但是在本文中，我们仅考虑路径实际距离长度对调制格式的影响，显然从通信原理的角度上来讲，采用更高的调制格式，虽然能够使信号内存在的信息量更多，但是在激光器发射功率相同的情况下，越高的调制格式，也就意味着星座点之间距离越小，也就意味着信号的抗干扰能力越差，在这种情况下，显然是不能够允许调制格式高的信号进行长距离传输的。相反，调制格式低的信号虽然承载的信息量较少，但是由于星座点之间的距离较大，所以，调制格式低的信号显然更适合用来进行长距离的信息传输。综上讨论，我们将较高的调制格式分配给实际路径长度较短的链路，而将较低的调制格式分配给实际路径长度较长的链路。如图 2-1 所示。

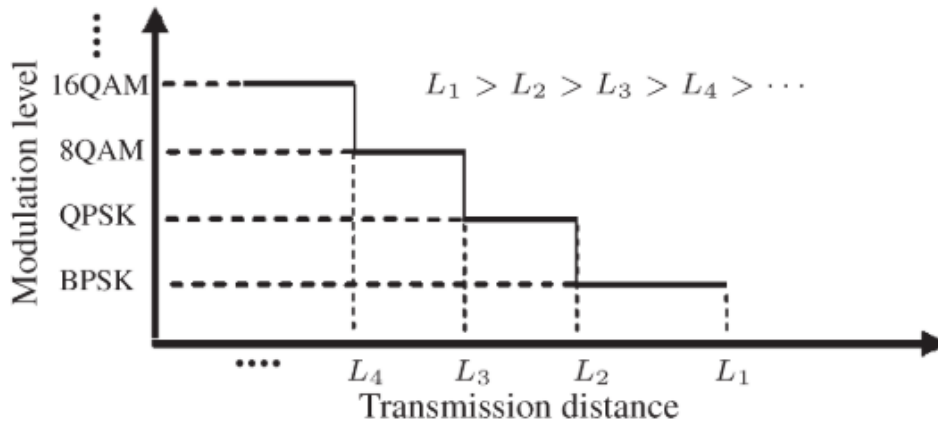


图 2-1 调制格式与路径距离关系图

频谱分配方式通常分为 Fixed Segmentation 和 Adaptive Segmentation 两种分配方式^[17], Fixed Segmentation 即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, 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进行分配, 如果对应的分区内不存在可用的频谱资源, 则再考虑将其他区域的频谱资源分配给链路, 如果最后没有可用的频谱资源分配给链路的话, 则链路建立失败。Fixed Segmentation 这种分配方式的缺点在于每个频谱分区固定, 不够灵活。相比较 Fixed Segmentation 这种频谱分配方式, Adaptive Segmentation 就要更加灵活了, 其主要的分配方式如下所述, 前面基本和 Fixed Segmentation 一样, 即对整块的频谱资源进行分区, 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可用的频谱资源进行分配, 如果对应的分区内不存在可用的频谱资源, 在这种情况下, Adaptive Segmentation 会从适用区先寻找可用的频谱资源, 如果适用区内存在可用的频谱资源, 那么将这段频谱资源分给此链路, 并且将这段频谱资源划分到链路调制格式对应的区, 例如一个 BPSK 链路在 BPSK 区 SS_{BPSK} 没有分配到频谱资源时, 其从适用区分配到了频谱资源 ss , 那么在分配完频谱资源之后, 也需要将 ss 这部分频谱资源划算进 BPSK 区 SS_{BPSK} 。如果适用区也没有找到可用的频谱资源可以分配给链路, 那么再考虑其他分区是否有可用的频谱资源可以分配给链路, 如果有则分配给链路, 如果没有则链路建立失败。

本文的频谱分配主要采用的是某种程度上修改版本的 Fixed Segmentation, 即可以允许 BPSK 信号在 QPSK 信号寻找可用频谱资源, 但是不允许 QPSK 信号不可以在 BPSK 信号寻找可用频谱资源, 进行这样的修改, 主要考虑的点是, 如果有 QPSK 信号被分配在了 BPSK 信号区域, 那么如果之后不再给 QPSK 信号或者更高的调制格式的信号, 仅给 BPSK 信号, 且假设其他所有频谱资源都被分配了, 那么实际上会造成了频谱资源浪费。当然, 这种方式实际上也存在资源浪费的情况, 即如果当 BPSK 信号区域存在频谱资源的时候, 但是 QPSK 信号区域不存在频谱资源的时候, 那么这种分配方式, 也会造成频谱浪费。

通常在频谱分区内进行频谱分配的时候, 存在多种分配方式, 常见的分配方式有 First Fit, Random Fit, Last Fit, First-Last Fit, Least Used, Most Used, Exact Fit。本文中主要采用的方式是 First Fit 方式, 其主要的內容是是从索引中选取最低的索引并将其对应的光谱时隙分给光路。

以上, 介绍了本文的频谱分配和调制格式分配方式, 但是除了分配之外, 还需要对

链路请求的撤离进行定义，这个比较简单，当链路请求发送完毕需要进行删除的时候，直接释放其所占用的频谱资源即可。

综上，本部分的伪码如下所示：

算法 2 调制格式和频谱资源分配算法

输入：m, distance_matrix, path_matrix

输出：output_path_slots_location, output_path_slots_modulation

01: Alternate_modulation = {'BPSK' 'QPSK' '8PSK' '16QAM' '32QAM' '64QAM'};

02: error_modulation_counter = 0;

03: success_modulation_counter = 0;

04: slots_BPSK = zeros(5,1);

05: slots_QPSK = zeros(5,1);

06: slots_8PSK = zeros(5,1);

07: slots_16QAM = zeros(5,1);

08: sort_distance = sort(distance_matrix);

09: if length(sort_distance) > m

10: length_limit_distance = m;

11: else

12: length_limit_distance = length(sort_distance);

13: end

14: for i = 1:length_limit_distance

15: limit_distance(i) = sort_distance(i);

16: end

17: [count_length_path, count_path_width] = size(path_matrix);

18: for i = 1:length_limit_distance

19: for j = 1:count_length_path

20: if(limit_distance(i) == distance_matrix(j))

21: for n = 1:count_path_width

22: limit_path(i,n) = path_matrix(j,n);

23: end

24: end

25: end

26: end

27: for i = 1:length(limit_distance)

28: modulation(i) = Alternate_modulation(length_limit_distance + 1 - i);

29: end

30: [length_path_matrix, width_path_matrix] = size(limit_path);

31: for i = 1:length_path_matrix

32: for j = 1:width_path_matrix

33: output_path(i,j,number_of_link_counter) = limit_path(i,j);

34: end

35: end

36: for i = 1:length(limit_distance)

37: output_distance(i,number_of_link_counter) = limit_distance(i);

38: end

39: for i = 1:length(modulation)

40: output_modulation(i,number_of_link_counter) = modulation(i);

41: end

42: path_slots_modulation = cell(size(zeros(m,1)));

```

43: path_slots_location=zeros(m,1);
44: for i=1:length(limit_distance)
45:     if strcmp(modulation(i),'BPSK')
46:         counter_BPSK=0;
47:         for i_BPSK=1:length(slots_BPSK)
48:             if (counter_BPSK==0)&&(slots_BPSK(i_BPSK)==0)
49:                 counter_BPSK=1;
50:                 slots_BPSK(i_BPSK)=1;
51:                 path_slots_modulation(i)={'slots_BPSK'};
52:                 path_slots_location(i)=i_BPSK;
53:                 success_modulation_counter=success_modulation_counter+1;
54:             end
55:         end
56:         if counter_BPSK==0
57:             error_modulation_counter=error_modulation_counter+1;
58:         end
59:     end
60: end
61: for i=1:length(path_slots_location)
62:     output_path_slots_location(i,number_of_link_counter)=path_slots_location(i);
63:     output_path_slots_modulation(i,number_of_link_counter)=path_slots_modulation(i);
64: end

```

在此对输入输出进行解读， m 是对于未定义安全性的网络请求，系统根据安全性考虑对其分配的不相关光路的条数，本文设置为 3， $distance_matrix$ 是每条路径的实际距离， $path_matrix$ 则为每条不相关光路所经过的网络节点。 $number_of_link_counter$ 是代表时间的迭代次数。 $output_path_slots_location$ ， $output_path_slots_modulation$ 为输出，其分别代表为路径分配的频谱时隙以及具体的调制格式。由于仅是伪码，所以在频谱分配的地方，伪码只提供了最基础的调制格式为 BPSK 的网络请求被分配到 BPSK 区的情况，其他情况基本类似，只是需要改一下判定条件等，由于再呈现上来所占篇幅过大以及确实很多地方均十分类似，违背了伪码仅是提供思想的初衷，故仅提供了最基本的情况。

3.3 本章总结

本章主要对研究中所采用的路径寻找算法，频谱分配和调制格式分配算法进行了详细的介绍，并将本人在编程中所遇到的一些细节进行了详细的描述。

第四章 MATLAB 的仿真及结果分析

4.1 MATLAB 简介

MATLAB 是 matrix & laboratory 两个词的组合，意为矩阵工厂（矩阵实验室）。其是由美国 mathworks 公司发布的主要面对科学计算，可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境。它将数值分析，矩阵计算，科学数据可视化以及非线性动态系统的建模和仿真等诸多强大功能集成在一个易于使用的视窗环境中，为科学研究，工程设计以及必须进行有效数值计算的众多科学领域提供了一种全面的解决方案，并在很大程度上拜托了传统非交互式程序语言（如 C 语言）的编辑模式，代表了当今国际科学计算软件的先进水平。

在此次研究中，采用 MATLAB 的主要优势在于 MATLAB 提供了很成熟的图像处理

功能,并且足够简单,例如 degree 功能能够直接提供整个网络拓扑所有节点的度数,除此之外, MATLAB 也提供了最短路径算法 Dijkstra 算法功能,这些都最大程度上简化了算法的编写难度。

4.2 MATLAB 的具体实现简单描述

首先要说明的是,虽然本文是光网络中基于多个不相关光路的安全传输技术研究,但在第二章的第二节已经对不相关光路的安全性已经进行了描述,并且得到了不相关光路的数目越多,光网络的安全性越高的结论。显然,采取如第三章所讨论的路径分配算法,频谱分配算法和调制格式分配算法会存在阻塞等情况,导致光路建立失败,显然这种情况下,会由于建立成功的光路数目的减少,网络安全性也会因此降低,故接下来所探究的关键元素是不相关光路的建立成功率。显然对比的方案也不是其他的常见光纤网络的安全手段。本文所采用的对比方案分别是对所有路径都采用 BPSK 调制格式的多路径对比方案,以及固定为 x 条多路径的对比方案。

由于未曾被给予图表数据和链路数据,所以在这样的情况下,本文在进行仿真的时候采用了魔方矩阵的上对角线部分来构成网络的拓扑结构以及每条链路的实际距离。显然这样会存在一些特殊性,即会导致网络拓扑中任意两个节点都存在链路,不过我个人也用过其他的拓扑网络图进行测试算法,算法也是有效且没有报错的,结果也符合我个人的推算。故在此认为虽然采用的数据是具有特殊性的,但是算法具有普适性。根据文献[16]的内容,启发性算法并非在具体算法,而是一个近似性算法,其近似性仅在网络拓扑节点小于等于 20 个时比较有效,所以本文采用了 10 阶魔方矩阵进行网络拓扑的模拟。正如前面所言,由于未曾被基于数据,所以在这样的情况下,我们需要自己产生随机的数据,故我们根据所给的网络拓扑结构,随机选取一定数目的节点作为起始点,再选取一定数目的节点作为终点,显然需要进行处理的是每一次链路要求的起始点和终点都不是同一个点。

路径分配算法和频谱分配算法和调制格式分配算法的设计如第三章所述,需要说明的是,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,所以在进行多条不相关光路数目的选择的时候,都是统一先把对应此网络请求的所有不相关光路全部找出来,之后再根据是实际距离进行排序,根据第二章的描述,选取其中最长的三条来进行仿真模拟,如果不足三条,则有几条算几条。选择最短的三条不相关光路亦或是最长的三条不相关光路实际上与本次仿真相关性不大,因为最后测量的是链路建立的成功率,但是在对应实际应用的时候,显然选择距离短的传输链路应该更好地保证传输质量,也能更好地节约资源,故这里选择符合现实实际对于每一个网络请求都选择最短三条的不相关光路。之后还需要进行讨论的内容是,对于每一个网络请求的三条不相关光路,应该对哪个先进行频谱资源的分配。一个比较常见的思想是,先对调制格式低的链路进行频谱资源的分配,其主要的原因是,调制格式低的链路所占用的频谱资源要更多一点,这样先分配完调制格式低的链路之后,有些对于调制格式低链路难以占用的频谱资源空隙却可以分配给调制格式高的链路。其确实具有一定的道理,但是本文不采用这样的分配方式,理由有二,一是本文

已经选取了 Fixed Segmentation 这样的频谱分配方式, 故通常来说, 是会产生一些意料之外的频谱资源空隙的, 基本是会产生碎片化的问题; 二是对于同样的频谱资源, 如果其能被一条调制格式为 BPSK 的链路占用, 其亦可以被两条调制格式为 QPSK 的; 链路占用, 亦可以被三条调制格式为 8PSK 的链路占用, 再加上本文的目的是建立尽可能多的不相关光路, 所以在这样的情况下, 反而应该先为调制格式高的链路分配频谱资源。

综上, 基本已经将整个算法的主体部分介绍完毕, 但是除了主题部分之外, 整个算法还需要添加网络请求删除的功能, 由于未曾被给予网络拓扑结构数据以及链路请求的数据, 所以我并不知道具体的网络请求的具体删除时间, 故在此, 我个人采用了一个 1-5 的整数随机数产生器, 对每一个链路都随机产出个数表示多久之后进行链路删除。整个仿真过程中, 也把迭代次数当作时间进行仿真。固然, 实际上是存在一些时间, 在这一刻并没有新的网络请求要求建立, 这样的时刻我们可以通过对某次迭代过程中的链路请求设置为空集来进行模拟。但其在实际模拟的过程中并没有必要模拟这种情况, 直接模拟所有迭代次数都有网络请求需要建立就好, 显然其是最糟糕最复杂的情况, 也更能反应极端状态下不同算法的优劣性。故在本次仿真中仅考虑每次迭代都有新的网络请求需要建立的情况。

以上, 在此概括, 本文所采用的算法基本想法如图 4-1 所示。

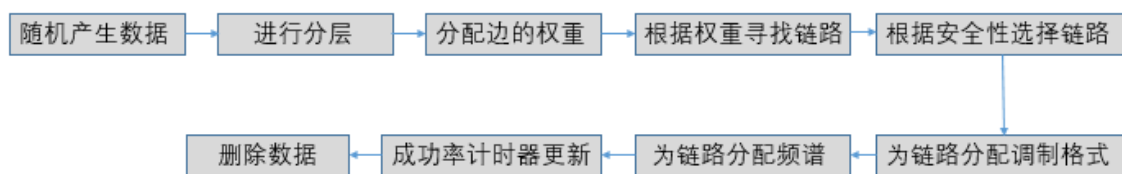


图 4-1 本文算法基本思想

4.3 MATLAB 的仿真以及结果分析

本文采用的频谱资源形式如之前的算法中所示, 在拓扑网络图是由 10 阶魔方矩阵上阶梯矩阵组成的情况下, 保持一组随机出来的 1000 个网络请求且删除时间不变的情况下, 分别验证采取正常多条不相关光路以及均分配 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。对比结果图如表 4-1 所示。

3 条不相关路径且分配调制格式的建立成功率	2 条不相关路径且分配调制格式的建立成功率	4 条不相关路径且分配调制格式的建立成功率	3 条不相关路径且均调制格式分配 BPSK 的建立成功率
0.9753	0.9735	0.9757	0.1903

表 4-1 不同情况下网络请求阻塞率的对比

显然从表 4-1 的第一列和第四列可以看出, 对于采取调制格式均分配 BPSK 的多条

不相关路径的安全传输技术,显然其具有更高的阻塞率,这是显然的,因为 BPSK 这种的调制方式虽然能够在极远的距离都能保证信号传输的质量,但是其也占用较多的频谱资源,在频谱资源有限的情况下,显然对所有链路都分配 BPSK 形势的调制格式,不仅造成了频谱资源的浪费,同时也很大可能发生网络阻塞的概率,这与我们的猜想基本一致。且由于 DWDM 系统是不能进行自由地调制格式的分配的,而弹性光网络则可以,同时也间接说明了为什么弹性光网络比 DWDM 网络更加符合作为当前的主流通信方式。

接下来需要对比的是分别采用 2 条不相关路径,3 条不相关路径,4 条不相关路径,且均进行调制格式分配的建立成功率,从表 4-1 看上去,仿佛是分配的不相关光路越多,建立成功率就越高。然而我们的频谱资源都是固定的,显然建立越少的链路,需要分配越少的频谱资源,其应该建立成功的概率就越高,这是不符合我们的预期的。究其原因不妨看表 4-2。由表 4-2 可知,建议越多的不相关路径,其失败的次数就越多,这是符合我们的预期的。那么能够造成表 4-1 反常数据的原因是建立链路的基数不同,显然对于建立三条不相关路径,其建立链路的基数是 3000,而由于对于建立两条不相关路径,其建立链路的基数是 2000,所以导致即便建立 2 条不相关路径的失败次数更少,但其建立成功率更低一点。当然造成这一现象还有一个原因,就是我所采用的频谱资源表示方式,在某种程度上不能很好的还原实际的频谱资源分配。由于存在调制格式为 QPSK 的信号不能去 BPSK 资源频谱分配区寻找频谱资源的原因,也会存在一定的误差,这样的情况如图 4-2 所示。图 4-2 是来自 2 条不相关光路的建立中,1000 个请求每一个请求对应的两个不相关光路所采取的是什么调制格式。其中 BPSK 就表示所采用的是 BPSK 调制格式, QPSK 就表示所采用的是 QPSK 调制格式,显然 100 列到 110 列都是此次网络请求的两条不相关光路均有频谱资源可进行分配,而 111 列则是通常来说频谱资源缺乏的情况下的正常处理情况,正如在前面所述,频谱资源越匮乏的情况下,考虑到要建立尽可能多条数的不相关光路,所以需要先为调制格式高的链路分配频谱资源,111 列就是这样,其为 QPSK 分配了频谱资源,而没有给 BPSK 分配频谱资源,优点也正如前面所述,在阻塞的情况下能够得到更多条数的不相关光路。而 99 列则对应我说的程序设计不合理之处,是有频谱资源为调制格式为 QPSK 的链路进行频谱资源分配的,但是由于程序限制了调制格式为 QPSK 的链路不能去 BPSK 频谱区寻找频谱资源,那么在 QPSK 频谱资源占满,而 BPSK 频谱资源未满足的情况下,会导致链路建立失败,而可用的频谱资源则分给了同网络请求下的调制格式为 BPSK 的链路。这个是之后可以进行改进的地方。

3 条不相关路径且分配调制格式的建立失败次数	2 条不相关路径且分配调制格式的建立失败次数	4 条不相关路径且分配调制格式的建立失败次数
74	53	97

表 4-2 不同情况下网络请求建立失败次数的对比

99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111
	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK
BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	

图 4-2 由于频谱分配程序的缺陷,导致出现 BPSK 有资源分配,但是 QPSK 没有资源进行分配

那么在以上的分析中,已经证明了越少条数的不相关光路,其失败次数越低,但是由于本文所采用的多条不相关光路的安全传输技术,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,选取不相关光路地时候应该折中采取,本文所选的就是折中的三条不相关光路。

4.4 本章总结

本章首先对 MATLAB 进行了个简要的介绍, 之后比较详细地介绍了本文所采用的算法思路, 并对编程过程的细节进行了详细地交代, 最后对所有链路都进行 BPSK 频谱分配的多条不相关光路和固定 x 条不相关光路和正常的不相关光路进行仿真并对阻塞率(建立成功率)进行分析, 最后得出当不相关光路条数是 3 且都进行频谱分配时能够同时保证建立成功率和传输安全性的结论。

第五章 总结展望

5.1 工作总结

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 RSA 算法应用到光纤网络的安全传输中, 于光控制层进行信息的安全传输。

本文的第一章, 首先介绍了光纤网络安全传输技术的发展以及弹性光网络中 RSA 算法的发展, 为下文的介绍进行了基础背景的铺垫。在第二章, 首先介绍了多条不相关光路的基础定义, 在此基础上, 讨论了为什么采取基于多条不相关光路的光网络传输技术能够达到安全传输的效果, 并最后提出了一种我们认为可行的多条不相关光路分配方案。在本文的第三章, 本文具体介绍了采用基于多条不相关光路的安全传输技术中所使用的算法, 首先在路径算法上, 我们根据文献[16]进行合理修正, 采用了修正之后的启发性算法来选取尽可能多数目的不相关光路, 在第二部分, 着重介绍了调制格式分配算法和频谱分配算法, 并就其细节进行了讨论。在本文的第四章, 首先对 matlab 进行了简要的介绍, 并对为何采用 matlab 作为编程语言进行了简要的描述, 之后对如何使用 matlab 进行整个算法的编程, 进行了一个较为详细的描述, 并对我个人在编程中遇到的一些小问题进行了描述。且提供了一份思维逻辑图。最后对整个结果进行分析。得出结论。

5.2 工作展望

虽然本文尝试将多条不相关光路用到光纤网络安全传输的领域中, 但本文在进行仿真的时候, 由于没有具体数据的原因, 所以数据可能具有一定的随机性, 不太具有实际意义。除此之外, 对于一个基于安全传输的技术来说, 最终的仿真结果比较的是链路建立成功率而非其对网络攻击的抵抗力, 这点也是前期调研不足以及在项目进行时思考不够充分, 在仿真过程中, 采用的频谱分配方式, 正如最后仿真结果分析所言, 也是存在相当一部分的缺陷的, 采取将频谱资源以具体矩阵的方式来表示, 固然提供了一定的方便性, 但同时, 由于矩阵的形式所限, 也导致后面想要进行更多情况的讨论以及频谱资源分配, 增加了更多的复杂度, 基于以上, 我个人认为以后的研究中, 这部分的内容还是需要进行修改和更替的。我个人目前想到的方式是通过建立一个矩阵, 根据已知网络请求的物理特性, 对整个矩阵进行很具体的划分, 再将此矩阵当作实际的频谱资源进行划分, 被分配了的部分用 1 表示, 未被分配的用 0 表示。最后, 本文所采用的算法, 无论是路径分配算法, 调制格式分配算法还是频谱资源分配算法, 都并非是性能最佳的算法, 本文并未将机器学习等前沿内容和所研究内容进行结合, 这也导致了算法的性能仍具有一定的缺陷和较大的改进空间。

论文的未来工作:

- (1) 改进频谱资源的编程方式, 以便得到更好的仿真结果;
- (2) 改进采用的路径选择算法和调制格式分配算法以及频谱资源分配算法, 将机器学习等前沿热点技术运用到本项研究中, 提供更高性能的算法。
- (3) 对整个网络安全传输以及常用的攻击手段进行进一步的研究以及调研, 实现对网络安全传输实验平台的搭建, 并尝试对比常见的防御手段和基于多条不相关光路的安全传输技术的性能优劣。这样的方式更能有效地对光网络中基于多个不相关光路的安全传输技术进行评价。

参考文献

- [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 IEEE/OSA 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.
- [5] B. C. Chatterjee, N. Sarma and E. Oki, "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 3, pp. 1776-1800, thirdquarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2431731.
- [6] Xin Li et al., "Distance-adaptive routing, modulation level and spectrum allocation (RMLSA) in k-node (edge) content connected elastic optical datacenter networks," 2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS), 2016, pp. 1-3.
- [7] W. Lu, X. Zhou, L. Gong, M. Zhang and Z. Zhu, "Dynamic Multi-Path Service Provisioning under Differential Delay Constraint in Elastic Optical Networks," in IEEE Communications Letters, vol. 17, no. 1, pp. 158-161, January 2013, doi: 10.1109/LCOMM.2012.120612.121343.
- [8] Ho àng-Oanh Le; Van Bang Le; Haiko Müller (2003). Splitting a graph into disjoint induced paths or cycles. , 131(1), 199–212. doi:10.1016/s0166-218x(02)00425-0
- [9] Ulrich Pferschy, Joachim Schauer (2013). The maximum flow problem with disjunctive constraints. , 26(1), 109–119. doi:10.1007/s10878-011-9438-7
- [10] P. Sakthivel and P. K. Sankar, "Dynamic multi-path RWA algorithm for WDM based optical networks," 2014 International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/ECS.2014.6892807.
- [11] K. Christodouloupoulos, 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.
- [12] 周围. 基于启发式算法的卫星光网络 RWA 优化算法研究[D].北京邮电大学,2020.
- [13] 林泽斌. 多平行链路光网络中路由及资源分配问题的研究[D].北京邮电大学,2020.
- [14] 邱伟. 弹性光网络中路由选择和频谱分配问题的研究[D].南京邮电大学,2020.
- [15] 李娜娜. 弹性光网络中多跳路由和频谱资源分配算法研究[D].河北工程大学,2020.
- [16] J. L. Wang and J. A. Silvester, "Maximum number of independent paths and radio connectivity," in IEEE Transactions on Communications, vol. 41, no. 10, pp. 1482-1494, Oct. 1993, doi: 10.1109/26.237883.
- [17] X. Wang, K. Kuang, S. Wang, S. Xu, H. Liu and G. N. Liu, "Dynamic routing and spectrum allocation in elastic optical networks with mixed line rates," in IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 6, no. 12, pp. 1115-1127, Dec. 2014, doi: 10.1109/JOCN.2014.6985903.

致 谢

四年的时候悄然已逝,回望 17 年秋天刚来到北邮的时候,还是 17 岁未成年的年纪,如今也已是 21 岁的大小伙子了。临别之际,心中有千言万语想要叙说,但又开不了口不知如何表达。叙说不尽的不舍之情,就用下面这些概括吧。

首先感谢指导我毕业设计的李新老师,在本次毕设环节为我提供了思路,锻炼了我科研方面的思维能力。亦为我提供了很多指导。整个毕设是一次很难忘的科研经历,这次科研经历使我终身受用,我会将从这次毕设中所学习到的东西铭记于心。

其次要感谢北京邮电大学,很感谢北邮培养我,让我学到了很多通信相关的知识,也很有幸能继续在北邮读硕,希望之后在北邮的时光,能够学到更多的东西,也希望可以成为更加优秀的北邮人,为北邮争光。

之后,很感谢我的父母亲,不谈及整个大学期间,仅但是这次毕设期间,如果没有他们的鼓励,我应该无法独自完成此次毕业设计的,很感谢他们两位对我 20 年来的照料。万分感谢。

亦很感谢陈文彬和吕刘杰两位学长,在我整个大学期间给我指点迷境,指明未来的道路,也没少带我一起出去锻炼,撸串。因有幸和学长们继续做学长学弟两年,在此私心还请以后的时光两位学长多多关照,也祝两位学长文章多多,早日毕业,顺利工作。

最后很感谢我在大学时期结交的好朋友赵冠良,王欣然,王皓,王一迪。我相信以后也会经常想起在他们宿舍玩的时候,也会经常想念他们这些朋友。他们中的有些人选择出国深造,有些和我一样继续选择在北邮读研,有的不幸一战失败,目前在准备二战,但无论如何,都想对他们说一句,和你们在一起的时光是我人生中为数不多过的很快乐的日子,希望若干年后的某一天,再见面时候都已是很厉害的大人了。祝我们前程似锦!

再次对以上的人表示感谢。三生有幸能够在人生旅途中遇到你们。谢谢有你们。

附 录

DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing, 密集波分复用
RWA	Routing and Wavelength Assignment, 路由和波长分配
RSA	Routing and Spectrum Allocation, 路由和光谱分配
RMLSA	Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation, 路由,
调制等级和频谱分配	
ILP	Integer Linear Programming