**课题编号：2022YFB2903001**

**国家重点研发计划**

**《逼近单模光纤容量极限的光传输系统理论与实验验证》**

**课题一：**针对单模光纤传输系统的全局优化及容限理论

测试大纲

**所属专项：**多模态网络与通信

**项目编号：**2022YFB2903000

**完成单位：**北京理工大学

**课题负责人：**薄天外

**日期：**2024年5 月1 日

目录

[1 概述 3](#_Toc166931986)

[2 项目概况与测试目的 3](#_Toc166931987)

[2.1 项目概况 3](#_Toc166931988)

[2.2 测试目的 3](#_Toc166931989)

[3 编制依据 4](#_Toc166931990)

[4 测试概述 4](#_Toc166931991)

[5 测试配置 4](#_Toc166931992)

[6 测试项目 6](#_Toc166931993)

[7 主要测试设备/测试软件（待与第三方测试机构沟通补充） 6](#_Toc166931994)

[8 测试方法 7](#_Toc166931995)

[8.1 测试环境要求 7](#_Toc166931996)

[8.2 测试前的准备 7](#_Toc166931997)

[8.3 支持新型调制解调技术的光纤传输仿真系统测试 8](#_Toc166931998)

[8.4 非线性约束下的单模光纤理论容限 10](#_Toc166931999)

[9 合格与否的判定 12](#_Toc166932000)

[10 测试人员、测试时间、测试地点 13](#_Toc166932001)

[11 测试报告 13](#_Toc166932002)

# 概述

本文档从项目验收测试目的出发，主要目的在于为所要进行的测试工作制定各种必要的准则和规范。大纲确定了测试范围，明确了具体要求，指定了适合的测试方法和测试设备。本测试大纲适用于对本课题任务书要求完成的支持新型调制解调技术的光纤传输仿真系统和系统容限指标的测试。

本测试大纲中所述的测试方法对中期和结题测试均适用，两次测试的区别在于测试的系统参数可能会根据项目的中期和结题目标变动，结题时本项目所交付的结果相对中期有更一步的改进。

# 项目概况与测试目的

## 项目概况

**项目课题名称：**针对单模光纤传输系统的全局优化及容限理论

**项目承担单位：**北京理工大学

**项目执行周期：**2022年11月至2025年10月

**项目建设内容：**课题主要任务是厘清超高速信号由于系统器件和光纤链路导致的性能损伤机理，建立兼顾准确性和实时性的光纤传输系统仿真平台；研究超高带宽、超大容量光纤通信系统中的非线性效应，给出非线性约束下的光纤传输系统容限。课题服务于项目最终所交付超高速率光纤传输系统的性能优化，并为项目的顺利实施提供理论基础。

## 测试目的

本次测试目的是验证本项目课题一“针对单模光纤传输系统的全局优化及容限理论”中各项考核指标达到相关要求，为项目验收提供依据。考核指标如表1所示：

表1 课题一考核指标

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 指标名称 | 中期指标值 | 完成时指标值 | 考核方式 |
| 1 | 支持新型调制解调技术的光纤传输仿真系统 | 完成光纤信道仿真 | 建立支持新型调制解调技术的光纤传输仿真系统 | 第三方测试或专家组评审认定 |
| 2 | 非线性约束下的单模光纤理论容限 | 给出线性损伤约束下的理论容限 | 给出非线性约束下的理论容限计算模型 | 第三方测试或专家组评审认定 |

# 编制依据

测试大纲制定和实施的依据文档见表2。

表2 测试大纲制定和实施依据文档

|  |  |
| --- | --- |
| 序号 | 名称 |
| 1 | 课题一任务书 |
| 2 | 《Danshi Wang et al., Data-driven optical fiber channel modeling: a deep learning approach, Journal of Lightwave Technology, vol 38, no. 17, pp. 4730-4743, 2020》  规定了波形仿真MSE<0.02为信道建模结果中波形一致性的判定依据，本测试大纲使用MSE<1×10-4作为标准。 |
| 3 | 《D. Semrau, R. Killey, and P. Polina, A closed-form approximation of the Gaussian noise model in the presence of inter-channel stimulated Raman scattering, Journal of Lightwave Technology, vol 37, no. 9, pp. 1924-1936, 2019》规定了信道容限建模中差异<0.2dB (MSE<0.045)作为模型结果一致的判断依据，本测试大纲使用MSE<1×10-4作为标准。 |

# 测试概述

本课题需交付支持新型调制解调技术的光纤传输仿真系统，并给出非线性损伤约束下的信道容限模型。光纤仿真系统的测试主要方法是在相同条件下与商用仿真软件（VPI TransmissionMaker 11.0，以下简称VPI）的各组件输出波形进行对比，信道容限的测试主要是将蒙特卡洛仿真结果与所推导出的理论值进行对比，当均方误差小于给定阈值时，可认为测试通过。

# 测试配置

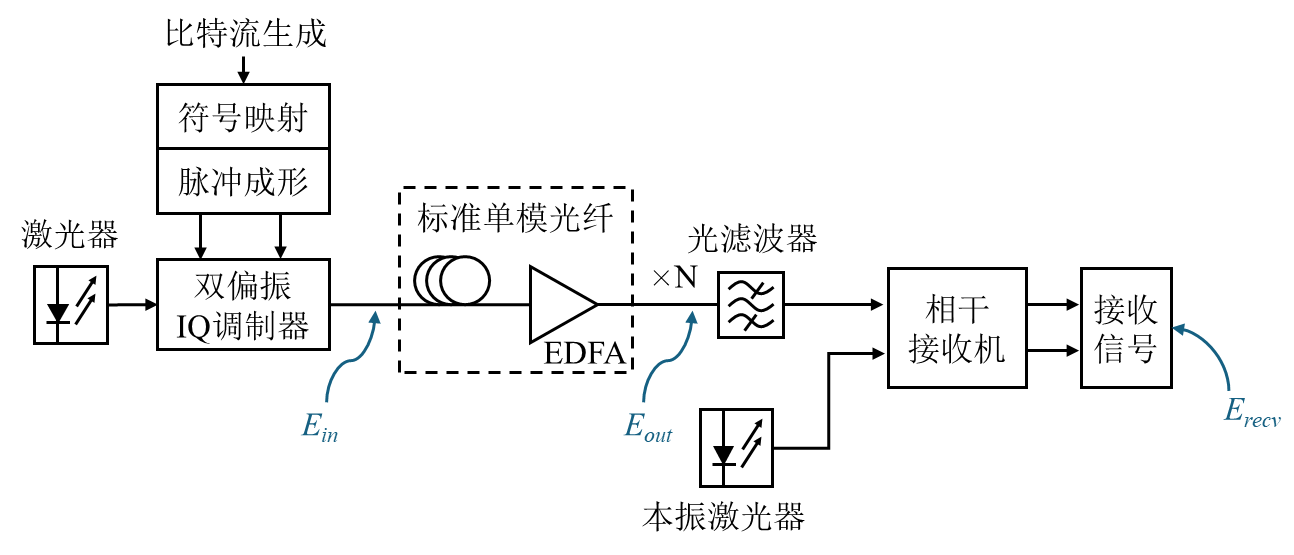


图1 光纤传输仿真系统示意图

图1为仿真系统的示意图，所有器件和传输链路均分别由VPI软件和Matlab实现。为了方便对照，比特流由Matlab统一生成，并导入VPI仿真系统；两个仿真系统中噪声部分的生成模型和随机种子相同，且可根据需要关闭噪声。仿真系统各模块和光纤信道的参数如表3、表4所示。

表3 光传输系统主要参数典型值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 参数名称 | 参数典型取值 |
| 信号生成 | 调制格式 | QAM |
| 调制阶数 | 64 |
| 单组序列长度 | 32768 |
| 每符号采样数 | 16 |
| 脉冲成形滤波器 | 4阶根升余弦滤波器 |
| 信号波特率 | 96 Gbaud |
| 光调制器 | IQ调制器半波电压 | 4.5 V |
| 调制器插入损耗 | 6 dB |
| 调制器消光比 | 30 dB |
| 调制器带宽 | 100 GHz |
| 发射机/接收机 | 发射机/接收机激光器线宽 | 10 kHz |
| 发射机/接收机激光器功率 | 13 dBm |
| 发射机/接收机激光器中心波长 | 1550.12 nm |
| 接收机带宽 | 100 GHz |
| **以下针对多符调制信号：** | | |
|  | 基础调制格式 | QPSK |
| 高斯滤波器阶数 | 33 |
| 高斯滤波器带宽 | 1/8波特率 |

表4 光纤信道主要参数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 参数名称 | VPI参数 | 待测试仿真系统参数 |
| 参考频率 Fc | 184.49-196.71 THz | 184.49-196.71 THz |
| 一跨段光纤长度 L | 40-100 km | 40-100 km |
| 跨段数目 spans | 1 - 15 | 1 - 15 |
| 衰减 α | 0.1-0.3 dB/km | 0.1-0.3 dB/km |
| 色散系数 D | 0-16 ps/nm/km | 0-16 ps/nm/km |
| 色散斜率 S | 0-0.08 ps/nm2/km | 0-0.08 ps/nm2/km |
| 非线性折射率 | 0-4×10-20 m2/W |  |
| 有效面积 | (75-120)×10-12 m2 |  |
| 非线性系数 gamma |  | 1-1.5 W-1km-1 |
| 分布傅里叶算法步长 | 0.001-10 km | 0.001-10 km |

**备注：**

根据计算公式：

其中，即为非线性折射率，为载波波长，为有效面积。

表4中非线性折射率与光纤有效面积计算得到的gamma与表4中gamma取值相等，两仿真系统参数取值完全一致。

# 测试项目

依据测试目标，按照项目合同书的要求，将测试分解为光纤仿真系统测试与信道容限模型测试，以保证测试时能够覆盖项目所需要验证的内容，详见表5。

表5 测试项目

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **测试对象** | **测试项目** | **测试方法** |
| 1 | 项目课题1 | 光纤信道模型和支持新型调制解调技术的光纤传输仿真系统 | 8.2节 |
| 线性损伤约束下的信道容限和非线性损伤约束下的信道容限。 | 8.3节 |

# 主要测试设备/测试软件（待与第三方测试机构沟通补充）

主要测试设备如表6所示。

表6 主要测试设备

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **序号** | **设备名称** | **设备型号/代码名称** |
| 1 | 工作站 | 操作系统为Windows 11，安装有Matlab、VPI软件的工作站 |
|  | CPU | AMD Ryzen 5800X 8-Core Processor |
|  | GPU | NVIDIA TITAN V |
|  | RAM | 32 GB DDR4 |
| 2 | VPI | 版本 11.0 |
| 3 | Matlab | 版本 2022a |

# 测试方法

## 测试环境要求

1. 温度：常温 22℃±2℃；
2. 湿度：55%±15%。

## 测试前的准备

1. 文档与文件检查：详细框架设计说明书，框架内部组件详细说明，仿真框架使用操作指南（用户手册），源代码。检查要求文档或文件具有完备性、正确性、规范性、简明性、可检索性、自说明性。
2. 仿真框架代码检查：对系统关键模块的源代码进行检查，检查内容包括模块代码编写的规范性、注释的准确性、潜在的错误以及代码的可维护性。
3. 仿真框架一致性检查：在符合框架运行基本需求的多台设备上运行采用测试仿真框架内组件搭建的仿真系统，检查是否在不同设备上均可以无错误编译，输出的结果是否有偏差。
4. 可用性测试：测试框架的使用是否方便快捷，对新用户是否友好，测试系统过程中有无明显问题，系统运行过程中是否对用户有明显提示。
5. 功能测试：测试框架各模块建模是否正确、完备、可用。检验各模块输出数据是否正确。
6. 稳定性测试：测试框架是否支持大量数据、大数值数据的复杂的运算与操作，测试多次运行同一系统结果是否一致。
7. 性能测试：测试框架运行时间是否在可接受范围内，测试框架运行时对设备的需求是否合理。

**依据测试目标，按照项目合同书的要求，将测试分解为光纤仿真系统测试与信道容限模型测试，以保证测试时能够覆盖项目所需要验证的内容，详见表5。**

## 支持新型调制解调技术的光纤传输仿真系统测试

本节测试的目的是验证项目所开发的光纤通信仿真系统中信道模型的准确性，以及系统其他模块的准确性、系统端到端建模的准确性和对新型调制解调技术的支持。

|  |  |
| --- | --- |
| 平台主要设备及系统框图 | 分别使用本项目开发的光纤通信仿真系统和商用的VPI软件构建最基本的相干光传输系统模型（以下简称两个平台），发射机包含：激光器、调制器、信号源、光放大器；信道为标准单模光纤，跨距80公里，总共15个跨段；接收机包含本振激光器、相干接收机。系统框图及参数设置见图1及表3、4。  搭建的VPI传输平台如图2所示。所传输信号由Matlab生成并导入到VPI中，经过VPI的光纤信道及放大器之后，经由CoSim联合仿真模块导入Matlab做离线处理、波形归一化及计算均方误差。      图2 本项目开发的光纤通信仿真系统和搭建的VPI传输系统框图 |
| 测试步骤 | **基础单元模块测试**   1. 对于本项目开发的光纤通信仿真系统的各个模块任意抽取三个进行测试； 2. 对于每个被抽取的模块，比较其与VPI对应模块的模型是否准确一致； 3. 对于每个被抽取的模块，在两个平台中分别搭建验证系统，保证相同输入信号的情况下，改变模块参数，得到两个平台的输出波形，并计算波形的归一化均方误差； 4. 按照一下公式对波形进行归一化     其中，E为信号的复数包络，E\*为其复数包络的共轭，N为信号波形的数据长度；   1. 按照以下公式分别计算两套光纤通道仿真系统的输入波形间、输出波形间差异的均方误差（MSE）MSEin、MSEout；      1. 重复步骤3十次，每次设置不同的模块参数，得到10个归一化MSE并取最大值作为最终MSE。   **中期指标****：光纤信道建模的测试流程**   1. 在两个平台中搭建相同的相干光传输系统，所有模块的参数设置相同，其中光纤长度设置为10个跨段共计800km，对应项目中期指标； 2. 分别使用两个平台中的数据采集模块采集进入光纤信道的波形Ein,1、Ein,2 并各自归一化； 3. 分别使用两个平台中的数据采集模块采集光纤信道输出的波形Eout,1、Eout,2并各自归一化； 4. 计算两个平台输出波形的归一化MSE； 5. 任意改变光纤信道的参数（如色散系数、光纤非线性系数等），并重复以上测试步骤，测试10次，取10次测试结果中MSE的最大值作为最终MSE； 6. 记录两个平台的仿真时间t\_matlab和t\_vpi；   **结题指标：支持新型调制解调技术的光纤传输仿真系统的测试流程**   1. 在两个平台中搭建相同的仿真系统，且所有系统参数保持一致； 2. 按照表3中的参数设计生成多符调制信号，同时导入到两个平台中，其中光纤长度设置为15个跨段，共计1200km，对应项目结题指标； 3. 分别使用两个平台中的数据采集模块采集各自的发射机输出波形（Ein,1, Ein,2）、光纤信道输出波形（Eout,1, Eout,2）、接收机输出波形（Erecv,1, Erecv,2），并各自归一化（归一化方式同步骤4）； 4. 按照步骤4中的公式分别计算以上三部分的均方误差，分别为MSEin、MSEout、MSErecv； 5. 对接收到的多符调制信号进行解调，计算误码率； 6. 重复步骤3-5十次，取10次测试结果中波形差异MSE的最大值作为最终MSE。 7. 若对于波分复用系统，对其所有信道进行上述测试流程； |
| 预期测试结果 | 1.光纤信道模型测试中，MSEin、MSEout均小于1×10-4；  2. t\_matlab < t\_vpi，所开发的光纤信道仿真系统执行效率高于商用软件；  2.多符调制仿真系统测试中，MSEin、MSEout、MSErecv均小于1×10-4，解调后，误码率为0。 |

## 非线性约束下的单模光纤理论容限

本节测试的目的是分别验证项目提出的线性损伤约束下和非线性损伤约束下的信道容限计算模型的准确性。

|  |  |
| --- | --- |
| 平台主要设备及系统框图 | 测试的系统框图如下所示：    图3 信道容限测试框图 |
| 测试方案及步骤 | 1. 根据信息论知识，由信道容量表达式给出信号经过加性高斯白噪声信道后信道容量随信噪比变化的理论曲线，信道容量表达式如下[1]：     其中Z为接收端信号，A为发送端信号，I(Z;A)为互信息量，H(·)为信息熵。设置信噪比范围为-2dB至25dB，信噪比间隔为0.5dB，其理论曲线如下，通过该理论曲线可以得到不同信噪比下的信道容量：  16qam  图4 信道容量理论曲线  **中期指标：线性损伤约束下的理论容限**   1. **在线性损伤约束下**，引入EDFA自发辐射噪声，其表达式如下[2]：     仿真条件设置为单信道，中心波长为1550nm，波特率为100GBd，光纤为标准单模光纤，传输15跨段，单跨段80公里，EDFA噪声系数为4.5dB，可以得出不同入纤光功率下的线性噪声，从而求出对应的信噪比与信道容量对应关系的理论曲线；  **结题指标：线性损伤约束下的理论容限**   1. **在非线性损伤约束下，**引入非线性噪声，通过GN模型（计算非线性的通用模型）计算非线性噪声，其表达式如下[3]：     参数设置及计算步骤同上，其中为第个跨段中产生的SPM，为第个跨段中产生的总XPM，为信道跨段的入射功率，且。通过步骤1中的理论公式可以计算出在非线性损伤约束下不同入纤光功率对应的信道容量；   1. 以2k-QAM信号为例，输入信号为离散信号，共2k种取值，经加性高斯白噪声信道后输出信号为连续信号，对信道容量表达式展开推导后如下：     其中N为离散输入符号的个数，Q(k)为符号ak出现的概率，z为接收符号，p(z|ak)为给定发送符号ak的条件下接收符号的概率。通过蒙特卡洛仿真求解积分，可以通过求期望的方式计算出积分值，从而得出仿真曲线；   1. 按照以下公式计算蒙特卡洛仿真曲线与理论曲线和波形差异的均方误差MSE**（中期指标）**和MSE’**（结题指标）**：      1. 重复以上步骤10次，得到10个MSE值，取最大值作为最终测试结果。 |
| 预期测试结果 | 1. 线性损伤约束下的信道容限，蒙特卡洛仿真结果与理论模型结果之间的MSE小于1×10-4；  2. 非线性损伤约束下的信道容限，蒙特卡洛仿真结果与理论模型结果之间的MSE’小于1×10-4。 |

**参考文献：**

[1] 叶中行.信息论基础-第2版[M].高等教育出版社,2007.

[2] Govind P. Agrawal.Fiber-Optic Communication Systems[M]. New Jersey:John Wiley&Sons, 2010.

[3] P. Poggiolini, G. Bosco, A. Carena, V. Curri, Y. Jiang and F. Forghieri, “The GN-Model of Fiber Non-Linear Propagation and its Applications,” J. Lightw. Technol., vol. 32, no. 4, pp. 694–721, Feb. 15, 2014.

[4] D. Semrau, R. I. Killey and P. Bayvel, "A Closed-Form Approximation of the Gaussian Noise Model in the Presence of Inter-Channel Stimulated Raman Scattering," J. Lightw. Technol., vol. 37, no. 9, pp. 1924-1936, May 2019.

# 合格与否的判定

第三方测试机构根据测算系统的测试结果是否符合表1要求作为测试合格与否的判断依据。

1. 对于光纤通信仿真系统，VPI仿真结果与MATLAB程序运行结果波形在平均功率归一化后均方误差低于1×10-4；

2. 对于线性损伤约束和非线性损伤约束下的理论容限计算模型，相同信噪比/入射功率范围下，仿真结果与理论曲线波形间差异的均方误差小于1×10-4，则认为对应的理论容限计算模型无误；

如测试不通过，项目组需对受试系统进行整改，整改完成后依据本大纲要求重新进行功能性能测试。

# 测试人员、测试时间、测试地点

测试人员：杨焕 等；

测试时间：2024年5月24日；

测试地点：北京理工大学8号信息教学楼5025；

# 测试报告

测试结束后，测试工作组应提交试验过程中所有的测试记录，作为功能性能测试试验报告的附件。测试报告应对器件试验的全过程进行概述，给出功能性能测试试验的结论。