|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 项目类别 | 学科代码 |  |
|  |  |  |  |

山 东 省 自 然 科 学 基 金

**申 报 书**

|  |  |
| --- | --- |
| 项 目 名 称 |  |
| 申 报 者 |  |
| 联 系 电 话 |  |
| 电 子 信 箱 |  |
| 依 托 单 位 |  |
| 申 报 日 期 |  |

山 东 省 自 然 科 学 基 金 委 员 会 办 公 室

二○一九年 制

|  |
| --- |
| **目录** |
| [填报说明](#_Toc261959902)  [一、项目基本信息表](#_Toc261959903)  [二、项目组成员](#_Toc261959907)（**青年基金项目无需填写**）  三、立项依据(3000字以内)  1.研究意义  2.国内外研究现状  3.本项目创新之处  4.参考文献  四、研究方案  1. 研究内容、拟解决的科学问题及研究目标（3000字以内）  2. 拟采取的研究方法、技术路线、实验方案及可行性分析（2000字以内）  3. 研究计划的总体进度及安排（1000字以内）  4. 预期成果形式及知识产权、技术水平、市场前景及产业化后经济、社会效益预期结果（1000字以内）  五、研究基础与条件  （一）申报者  （二）项目组其他成员（青年基金无需填写）  六、项目经费预算表 |

|  |
| --- |
| 填 报 说 明   1. 填写申报书前，请先认真查阅《山东省自然科学基金管理办法》及当 年有关申报通知，确认是否具备所要申报项目类别的资格。   二、 实事求是，逐条认真填写申报书（含封面）各项内容，黄色框为必须填写的内容。表达要清晰、严谨。外来语要同时用原文和中文表达。第一次出现的缩写词，须注出全称。  三、 封面右上角填写项目类别：重点项目、面上项目、青年基金项目。  时间的填写格式为：yyyy-mm-dd。  四、 简表部分栏填写要求：   1. 所属学科：应尽量根据学科代码分类细化。若属交叉学科，可填两个，学科1为主学科。 2. 学科代码：与所属学科相对应，采用**2018年**国家自然科学基金委项目代码系统。   五、 **青年基金项目无需填写项目组成员及相关信息。**项目组成员部分须征求本人意见，如实填写， |
|  |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 一、基本信息表 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 项目情况 | 项目名称 | | | | | | 基于神经网络的空间光通信自动光束优化研究 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 所属学科 | | 名称1 | | | |  | | | | | | | | | | | | 学科代码1 | | | | | |  | | | | |
| 名称2 | | | |  | | | | | | | | | | | | 学科代码2 | | | | | |  | | | | |
| 起止时间 | |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 申报者 | 姓名 | 王铭淏 | | | | 性别 | | 男 | | 出生年月 | | | | | | | 1990年6月 | | | | | | 所在院系或部门 | | | | | |  |
| 专业技术职务 | | | | 讲师 | | | | 学位 | | | | | 工学博士 | | | | | | 获得时间 | | | | | | 2019年3月 | | | |
| 依托单位 | 单位名称 | | | |  | | | | | | | | | | | | | | | | | 邮政编码 | | | | |  | | |
| 详细地址 | | | |  | | | | | | | | | | | | | | | | | 联系人 | | | | |  | | |
| 联系电话 | | | |  | | | | | | 手机 | | | | |  | | | | | | 电子信箱 | | | | |  | | |
| 项目组 | 总人数 | | | 高级  职称 | | | | | 中级  职称 | | | | 初级  职称 | | | | | 辅助  人员 | | | 在读  博士后 | | | 在读  博士生 | | | | 在读  硕士生 | |
|  | | |  | | | | |  | | | |  | | | | |  | | |  | | |  | | | |  | |
| 应用领域 | | | | | | | | | | | | |  | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 研究内容摘要（400字以内） | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 在此之前主持过几次省自然科学基金项目（未主持过填0） | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | | | | | | | | | |
| 若主持过，请填写最近主持项目名称 | | | | | | | | | | | |  | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 申报者是否主持过国家自然科学基金项目 | | | | | | | | | | | | | | | [0] 1是 0否 | | | | | | | | | | | | | | |
| 若主持过，请填写最近主持项目名称 | | | | | | | | | | | | |  | | | | | | | | | | | | | | | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 二、项目组成员 | | | | | | | | | |
| 姓名 | 性别 | 出生年月 | 专业技术职务 | 学历学位 | 专业 | 工作单位 | 在本项目中的分工 | 每年用于本项目工作的月数 | 签字 |

|  |
| --- |
| 三、立项依据（3000字以内） |
| 请按以下提纲填写：   1. 研究意义（对基础研究，着重结合国际科学发展趋势，论述项目的科学意义；对应用基础及应用研究，着重结合科学前沿、围绕国民经济和社会发展中的重要科技问题，论述其应用前景）； 2. 国内外研究现状； 3. 本项目的创新之处； 4. 主要参考文献及出处（格式：论文——作者．题目．刊名．年份．卷(期)．页码／专著——作者．书名．出版者．年份）。   **1. 研究意义**  自由空间光（FSO）通信是在空间两点之间通过激光束的视线传播建立高速通信链路的一种光无线技术。在卫星光通信领域，FSO系统比传统的射频通信设备重量更轻、功耗更低，数据速率却能达到后者的10-100倍，因此成为新一代宽带星地通信系统的首选技术。带宽高、体积小、保密性好、部署灵活等特点使FSO系统在舰船间通信、机群通信、灾区应急通信、高层建筑间通信等军用和民用场景下能够实现独立组网或作为射频链路的扩充和备份，具有重要的战略和商业应用价值。  然而，典型的自由空间光链路，如星地链路和地面水平链路，均受到大气湍流的影响而呈现强烈的折射率随机起伏，导致承载信号的激光束在接收机端发生严重的光束展宽、质心漂移和孔径内的光通量起伏（又称“闪烁”）等劣化现象，直接造成信噪比的降低，这是限制自由空间光链路性能提升的主要因素。  由于大气链路本身不具有可操作性，因此寻求改善FSO系统物理层性能指标的努力主要集中于光收发机的设计和优化，具体而言，可以从光学平台和光束传输特性优化两个方向入手。光学平台方面，除捕获-对准-跟踪（PAT）系统外，大尺寸或多入多出（MIMO）光学天线可以通过引入孔径平均效应削弱光通量起伏；成本允许的情况下，还可以考虑在光路中集成由可变形镜和波前传感器组成的自适应光学（AO）装置，直接补偿湍流引起的波前畸变。但此类措施普遍要求使用更多更大的光学元件，且额外的分光光路也会降低信号的接收效率，因而在星载和移动平台等对体积和重量具有严格限制的终端上应用较为受限。    图 1 空间光通信中的光束优化问题  大量研究表明，在光发射机端通过空间调制和变换的方式使信号光束呈现特定的振幅和相位分布，可获得比普遍使用的基模高斯光束更好的抗湍流扰动特性，改善远场光束质量，从而提高光接收机的信噪比。值得注意的是，这种对光束空间分布的优化，在发射机光路中插入空间光调制器或衍射光学元件即可实现，是一种性能代价比很高的FSO链路性能提升方案。**然而，当前的光束优化研究大多是先验型的，即首先给出一种特定的光场形式（如平顶光束、环形光束等），再通过各种手段分析评价其湍流传输特性，这就极大地限制了光束参数的搜索空间**。无论是理论计算、数值仿真还是实验验证，均要求给出发射平面光场的数学形式，而若以接收平面光束质量（如闪烁指数或桶中功率）为评价指标，这种对数学规范性的要求实际上是一种非必要的限制。一般而言，突破这一限制要求人工指定光束参数的搜索策略，再分别计算每一组参数下光束的传输特性，通过比较寻找最优。这种暴力求解过程的效率极低，而且会以较大的概率陷入局部极值，因此并不是实用的全局光束优化方法。  **研究一种非先验的、不受数学形式限制的光束参数自动优化模型，有助于从根本上解决光束优化领域目前存在的搜索空间过小和验证成本过高的问题，从而以更高的效率获得具有优良传输特性的光源空间调制参数，对解决FSO系统中光束振幅相位的精细调控这一实际问题有着直接的指导意义。**图2比较了现有的光束优化方法和基于模型的自动优化方法的不同。    图 2 光束优化的两种方法：传统的基于先验的比较法和基于模型的自动优化方法  本项目聚焦空间光通信中的自动光束优化问题，提出一种基于模块化神经网络的端到端解决方案，其核心思路为：（1）以深度神经网络构建生成模型，通过神经网络的参数优化自动生成最优的光束空间分布；（2）使用生成对抗网络学习湍流的随机分布*，*从而将波动光学传输过程融入神经网络框架，以形成端到端的优化框架*。*该方案的优势包括：（1）将光束参数的优化转化神经网络参数的优化，这一过程可以通过梯度下降以最小化损失函数的训练过程自动实现；（2）生成的振幅和相位可以是任意的二维空间分布，不受解析表达形式的限制，光场的传输稳定性和可实现性可以通过损失函数和正则化条件的设计进行约束；（3）优化过程无需遍历高维参数空间中的所有网格点，而是以梯度下降的方式较快地收敛到极值附近，从而大大减少计算量；（4）模型具有可扩展性，各个子模块的结构和性能可以紧跟深度学习领域的进展而升级，而湍流光传输基础理论和数值仿真方法的进步可以提供更精确的数据集，也将使生成模型输出的可信度持续提高。  综上，本项目引入新的思路，搭建模块化的神经网络解决湍流光传输领域的光束优化问题，在扩展参数搜索空间的同时实现了优化过程的自动化，**不仅能为我国下一代FSO系统的研究提供有力的技术支持，也将作为一种具有较强通用性和扩展性的研究工具在成像和测量等领域得到应用，具有明确的应用和学术研究价值。**  **2. 国内外研究现状**  自由空间光通信在航天、军事、民用通信组网领域具有重大应用价值，因此相关理论与技术的研究长期受到世界各国重视。美国于上世纪90年代开展星地光通信在轨实验后，于2012年成功进行月球激光通信演示（LLCD），在月球轨道与地面站之间实现了622Mbps的下行传输，最新的LRCD项目则计划在地球同步轨道与地面站间建立双向千兆链路，同时美国还在推进面向飞机光通信的OCD-2[[28](#_ENREF_28)]和针对近地轨道飞行器的OPALS计划[[29](#_ENREF_29)]。欧洲航天局的欧洲数据中继系统（EDRS）和日本宇航发展局的轨道间光通信工程测试卫星（OICETS）也在2000年后相继搭载卫星升空，并持续进行技术验证和迭代。  国内方面，哈尔滨工业大学于2011年完成我国首次星地激光链路试验 [[44](#_ENREF_44), [45](#_ENREF_45)]，2017年实现了国际上首次高轨道星地双向高速激光通信试验，2018年开展微纳星座的星间链路激光实验，链路速率和光机平台稳定性达到国际先进水平。上海光机所牵头研制的星地高速相干激光通信载荷于2016年搭载“墨子号”卫星入轨测试，实现了下行5.12Gbps的高速数据传输。近地面链路方面，中电34所研制的FSO光端机已应用在多种舰载、机载、车载和民用平台，并达到最高10Gbps的传输速率。  随着高精度PAT系统和相关协议栈的逐步成熟，新型光束成为FSO领域的研究热点，以进一步改善接收质量和稳定性、挖掘物理层容量潜力。以高斯谢尔模光束为代表的部分相干光通过降低光源相干度，降低了波前对湍流扰动的敏感性，但同时也因能量弥散导致传输距离受限。以贝塞尔光束和艾利光束为代表的无衍射光束在弱湍流中可以实现波前畸变的自愈，但其物理实现要求在源平面进行截断，导致远场发散，限制了其使用场景。此外，高阶平顶光束、超高斯光束、环形光束和涡旋光束等，均可以在特定的链路条件下减轻接受孔径内的闪烁，提高接收机信噪比。需要指出的是，**相关工作均遵循“提出光束解析表达式—分析其传输特性”的模式，将光束调制参数的搜索范围限定为特定光束的有限几个模式**。理论上，给定一条FSO链路，不仅所有满足亥姆霍兹方程的光场分布都应纳入参数的搜索空间，所有在接收平面上具有良好特性的光场分布也应一并考虑（如截断的贝塞尔光束），而目前的主流研究手段，即理论推导、实验验证和波动光学仿真三种方式，都无法实现这种全局性的参数搜索。  神经网络作为一种强大的分布拟合模型，已经成为计算机视觉领域的主流研究工具之一。以卷积神经网络（CNN）为代表的现代深度神经结构可以实现空间特征的高效提取，残差连接（Residual Connection）和批标准化（Batch Normalization）等技术在很大程度上解决了梯度消失和过拟合问题，从而在图片分类、目标检测、目标跟踪等领域取得了当前最佳成绩。除用作判别模型外，神经网络还可以构建生成模型，如广泛应用的生成对抗网络（GAN）。经典GAN存在的模式坍缩、梯度消失和训练难以收敛等问题，可以通过引入Wasserstein损失、频谱标准化等方式结合训练技巧加以缓解，训练得当的GAN可以生成多样化的、难以与真实图片区分的输出，在图片修复、超分辨率、数据增强等应用方向具有重要应用。  卷积神经网络主要面向图像应用开发，自然也适用于处理更一般的光场分布，因而近年在散射成像、波前预测、光谱分析等传统光学领域也得到了应用。然而截至目前，在湍流光传输、光束空间调制和自动优化方向暂时还没有与神经网络结合的相关研究报道。  **3. 本项目的创新之处**  （1）引入神经网络解决光束优化问题  将光束参数的优化与神经网络的权重更新过程联系起来，通过网络参数的优化，直接生成传输质量最高的光场空间分布图样。这样，光束参数的取值范围不再只是高维空间中的几个点，而是整个N×N×2维的实数空间（N是单边采样点数，2代表振幅和相位两个参数通道），同时神经网络的梯度下降算法又将实际的计算约束在参数空间中的一条曲线，既保证了搜索结果的质量，又提高了搜索的效率。  （2）提出模块化的端到端光束优化框架  端到端的框架是指整个优化过程完全通过梯度的反向传播实现，无需人工干预或算法切换。为此，本项目设计了**光束生成网络**和**湍流传输网络**两大模块级联的结构，其中调制网络负责生成空间调制或变换后的发射平面振幅和相位，传输网络通过生成对抗模式学习波动光学计算过程，直接生成湍流传输后的远场分布。通过这一设计，由远场分布计算的损失函数的梯度在反向传播时可以穿透传输网络传递到调制网络，实现后者的参数更新。此外，针对本项目的研究对象与传统计算机视觉任务的不同，提出并验证保证光场横向连续性和对称性的正则化约束方法。  （3）构建基于波动光学仿真的空间光通信数据集  本项目通过波动光学仿真生成训练传输网络所需的湍流相位和光场传输数据。为保证训练的收敛和网络的泛化能力，数据集中不仅要包含与光束传输相关的数据，还要包含各种仅在理论上存在的光场及其对应的远场分布所组成的样本，在保证数据多样性的前提下维持较小的数据规模，使网络高效而完整地学习到不同链路条件下的湍流和衍射传播数据的潜在分布。 |

|  |
| --- |
| 四、研究方案 |
| 1、研究内*容、拟解决的科学*问题及研究目标（3000字以内）  **1.1 研究内容**  本项目以模块化的神经网络为主要工具，研究一种端到端的优化方法，尝试解决自由空间光通信中的光束自动优化问题，总体设计思想如图3所示。湍流光传输的物理场景与常规的计算机视觉任务有着显著区别，因此需要围绕光束优化过程中的空间调制和传输计算两大核心步骤，以深度学习领域前沿的神经网络结构为基础，设计光束生成网络和湍流传输网络，并建立专门的数据集、训练策略、评价函数和实验方案，实现网络的训练和功能验证。    图 3 基于神经网络的端到端光束优化过程：①光束生成网络通过预训练输出默认的准直高斯光束，通过湍流传输网络得到湍流信到传输后的远场分布；②计算与接收光束质量相关的损失函数，将损失梯度反向传播至光束生成网络并更新其权重；③权重更新后的光束生成网络给出新的振幅和相位分布，由梯度下降原理，此时的接收光束质量得到改善。重复上述训练过程，直至损失函数不再下降，此时认为光束生成网络的输出是最优的发射平面光场分布。  本项目的具体研究内容包括：  （1）构造光束生成网络，实现光源平面的振幅和相位调制  调制网络的作用是对输入的基本光束（如平面波或高斯光束）进行空间调制，以N×N矩阵的形式分别输出调制后的振幅和相位，调制过程由神经网络内部的矩阵运算和非线性激活等操作实现，具体的调制方式由网络参数决定，而网络的可训练参数则通过损失函数梯度的反向传播进行更新/优化，其中损失函数的表达式与远场光束质量直接相关。需要特别指出的是，本项目中的光源网络不用于推理，其输入是常量（甚至可以不设输入），在训练结束后调制网络将给出一个固定的输出，这个输出就是优化后的源平面光场。  作为一种特殊的生成模型，首先需要**确定光源生成网络的模型框架**，重点比较编解码模型和上采样模型之间的性能差异，在原理验证阶段将直接选用当前流行的网络架构，然后通过网格搜索或神经结构搜索等方法进一步优化内部连接；为保证训练能够顺利进行，还需要针对湍流光传输这一特定物理场景，**制定专门的初始化和预训练策略**；此外，虽然训练中损失函数的计算依赖于传输网络给出的接收平面光场，但调制网络本身的输出也要通过**设计正则损失项**等方式加以约束，保证其输出满足非零、中心对称等基本特征，且是物理可实现的。  （2）设计模块化的湍流传输网络，直接生成湍流传输后的光场  实现端到端优化的关键是计算接收平面光束质量的损失函数梯度并回传给调制网络，为实现这一功能，本项目设计专门的传输网络，其输入是调制网络给出的源平面光场分布，输出是经过湍流传输的接收平面（远场）的振幅和相位分布。针对波动光学仿真中随机数生成函数不可微的问题，**使用兼容主流深度学习框架的模型结构实现远场衍射图样的直接生成**，确保梯度可以透过传输模块反向传播至调制网络。为了获得高精度的远场振幅和相位生成，**比照波动光学仿真的计算过程设计传输网络内部的模块和层次结构**，通过损失函数和超参的优化避免梯度消失和模式坍缩，在输出的多样性和可信度之间取得平衡；研究批量生成非常规源平面振幅和相位分布的算法，**构建特征丰富的数据集，使其涵盖取值范围宽泛的传输距离、湍流强度、湍流内外尺度等链路参数**，以此为基础将传输网络训练成为具有较强泛化能力的条件生成模型，使其能够适应链路条件的变化而无需重新训练。  （3）确定仿真和实验方案，验证模型性能  **传输网络的性能优劣从可信度和多样性两方面分别评价**。可信度方面，衡量生成2D湍流相屏的湍流子网络是否学习到了训练数据中隐含的湍流功率谱对应的空间域分布，以及给定链路条件下远场光束的统计特性是否与数值仿真结果一致；多样性方面，分析其每次生成的湍流表示（相位屏或间接的远场分布）之间是否具有足够的差异。  **对于光速优化模型的整体性能评价**，即调制网络和传输网络级联后能够通过训练获得传输性质更好的光束，**则从模拟和实验两方面进行分析。**模拟方法以波动光学仿真为主，通过控制变量的方法，以准直高斯光束为基准，在链路参数不变的情况下比较模型给出的光束调制方案与其他各类新型光束的传输性质；实验方面，首先搭建以湍流发生器为核心的室内实验平台进行筛选，对传输结果较优的光束，在户外近地面链路中进行传输实验以验证其在真实湍流链路中的性能表现。  **1.2 拟解决的关键科学问题**  （1）基于深度神经网络的光束空间调制生成模型  现有的先验优化方法限制了光束参数的取值范围，导致在N×N的分辨率下，实际的计算局限于N2维参数空间中极少几个点之间的比较。非先验的方法由于隐变量的存在，要求使用生成模型，在各类统计学习方法中，能够实现高分辨率输出的是基于神经网络的生成模型。该生成模型对输入光束的振幅和相位进行空间变换，使变换后的光束在湍流光链路中的传输特性（另外计算）得到改善，网络本身进行的操作就是光束调制，因此称为调制网络。需要强调的是，对于给定的光链路，（局部）最优的光束参数是一组确定空间分布，不具有随机性且与输入无关，因此调制网络并非传统意义上的生成模型。事实上，调制网络的训练过程就是光束参数的优化过程，当调制网络的训练结束，其输出就是最优化的源平面光场分布。为实现这一功能，需要确定所选用神经网络的类型、架构、深度，损失函数、正则项的数学形式，以及包含超参数设置在内的训练策略。  （2）使用神经网络实现波动光学仿真功能  光束的优化过程要求计算源平面光束（即调制模块的输出）在湍流信道中传输后的远场分布，对于一般的非高斯光束，完成此类计算的常用手段是基于功率谱反演和菲涅尔衍射的波动光学仿真方法。波动光学数值计算中，生成湍流相位屏所使用的随机数发生器是无法在深度学习的框架内求导从而进行反向传播的，这样，无论如何定义损失函数，调制网络都无法获得非零的梯度以进行参数更新，这也是此前相关研究迟迟无法开展的症结所在。本项目提出，这一问题的解决需要依靠基于神经网络及可导操作的方法，使网络通过数据学习到大气湍流功率谱的统计规律，以直接生成接收平面光场的方式取代数值计算。从功能上看，传输网络的一次前向传输等同于完成湍流的一个具体实现下的光束传输计算，但这一传输过程隐含了确定性的菲涅尔衍射规律，这种随机性和确定性的共存对传输网络内部结构的设计提出了很高的要求，不同的子模块整合方式对结果的精度（可信度）和计算效率都有非常大的影响，这将是本项目的研究重点。此外，由于生成模型的训练难度较大，训练的策略和技巧在很大程度上决定了能否收敛，因此也需要通过对比试验等手段进行深入探索和迭代优化。  （3）多尺度、多模态的湍流光传输数据集的生成  调制网络的训练可以看作针对特定链路条件下一组光束参数的回归，从生成模型的角度看则是向着单一模式的坍缩，对泛化能力没有要求，因此无需训练数据。而传输网络属于典型的概率生成模型，其学习过程需要大量数据的支撑，网络的泛化能力，即在链路参数变化时维持输出精度的能力，很大程度上取决于数据集的丰富程度。因此，数据生成过程中应充分考虑链路长度、大气折射率结构常数、湍流涡旋尺度、接收机噪声等链路参数，增强数据集内部的多样性。其次，注意到湍流光传输的数据样本是光场或湍流相位屏的空间图样，以常规计算机视觉的标准，这类样本间的相似度极高，因此要求网络能够区分样本间的微小差异。为降低网络的学习难度，需要研究预处理算法对数据进行变换，突出对训练有帮助的空间特征，弱化共性特征。与此同时，还需根据所选模型的容量确定链路参数的取值范围以保证模型训练能够收敛。此外，由于不同分辨率的生成模型的训练难度差别很大，在算法验证初期考虑使用较低分辨率，随着收敛性的提高和训练策略的优化逐渐提高输出分辨率，这就要求数据集的原始分辨率较高（512×512以上），因此不能盲目堆砌数据量，应在保证数据集多样性的前提下控制数据集规模，从而优化存储空间、提高训练效率并避免过拟合。  **1.3 研究目标**  本项目的研究目标是形成一套适用于各类自由空间光通信链路的高精度、高分辨率自动光束优化方法，通过将光束参数的优化问题转化为神经网络连接权重的更新，将参数的搜索范围扩展到整个高维参数空间，实现不同于传统研究方法的全局优化。  为了使优化模型与主流的深度学习框架兼容，除了以调制网络实现源平面光场的空间调制，调制后光场在湍流中的传输计算也要通过神经网络实现，以此确保损失函数梯度的链式回传，从而实现端到端的自动优化。其中，调制网络的输出通过正则化约束保证其空间对称性和连续性，调制网络使能够相应链路参数变化的条件生成模型，通过数据集设计和训练策略的优化保证其生成精度不低于波动光学仿真计算。本项目提出的优化框架旨在为自由空间光通信中的光束优化问题提供新的解决思路，在多变的湍流链路条件下给出传输性能更好的光束空间调制方案，降低远场的光束漂移、展宽和闪烁，提高光接收机的信噪比。 |

|  |
| --- |
| 2、拟采取的研究方法、技术路线、实验方案及可行性分析（2000字以内）  **2.1 技术路线**  本项目围绕实现光束的自动优化这一目标，以随机介质光传输物理原理为基础，以波动光学仿真结果为参照量，计划从湍流光传输数据集的制作和神经优化框架自底向上的构建过程入手，按“生成数据集→实现子模块功能→搭建完整框架→实验验证”的总体技术路线展开研究工作，具体实施步骤如图4所示，图中的技术细节将根据试验效果进行调整。    图 4 技术路线图  **2.2 研究方法**  本项目通过构建和训练由模块化的光束生成网络和湍流传输网络组成的端到端优化框架，实现自由空间光通信中发射平面光束的自动优化和全局优化。为实现这一构想，拟采用如下研究方法：  （1）湍流相屏与光场传输数据集生成  本项目涉及的数据集主要有两类，一类是用于训练湍流子网络*Nt*的2D湍流相屏，另一类是用于训练*Nt*上一级传输网络的光场传输前后的空间分布2D湍流相屏的生成采用功率谱反演法，在空间频率域对湍流功率谱进行随机化后变换到空间域。不失一般性，本项目选用经典的Kolmogorov谱作为湍流折射率起伏的功率谱密度函数，向其他功率谱模型的推广无需改变算法框架。光场传输数据集的产生依靠波动光学仿真数值计算，其每个样本是发射平面和接收平面的振幅和相位图样。以上两类数据都与湍流强度和传输距离等链路参数绑定，链路参数作为生成模型的条件输入。波动光学仿真原理和两类数据的样本示例如图5所示。    图 5 （a）光束传输的分步式波动光学仿真原理示意图；（b）2D湍流相屏单个样本示例；（c）光束传输数据单个样本，由发射平面和接收平面的振幅相位分布构成  （2）高精度光束传输生成模型构建与训练方法  如前所述，构建传输网络的目的是解决波动光学仿真运算无法通过求导完成损失梯度反向传播的问题，其本质是将随机湍流相位屏的生成和光束的衍射传播以神经网络的方式实现。本项目比照波动光学仿真中分步式的空间相屏调制与菲涅尔衍射积分过程，通过堆叠生成2D湍流相屏的湍流子网络*Nt*和计算菲涅尔衍射积分的自定义层*Lf*搭建模块化的传输网络，同时通过级联一个较小的误差校正网络*Ne*来进一步弥合传输网络与数值计算结果的差距，如图6所示。其中，*Lf*层以深度学习框架提供的FFT运算为核心，没有需要训练的参数。    图 6 传输网络整体结构  湍流子网络*Nt*通过训练集中的湍流相屏数据学习带参数的大气湍流功率谱反演过程，其训练采用生成对抗网络（GAN）的形式，如图7所示。考虑到重复堆叠的需要，*Nt*网络的规模应严格限制，故采用特征提取效率较高的倒置残差模块和压缩-激活模块通过上采样方式构造，GAN中的判别模块则设计成与*Nt*对称的形式，以Progressive GAN的渐进训练方式逐步提高*Nt*网络的分辨率。传输网络由*Nt*网络、*Lf*层和*Ne*网络组成，在传输网络的训练过程中，冻结已训练的*Nt*网络，只更新*Ne*网络参数。传输网络的训练同样采用GAN模式，给定链路参数作为各子网络的条件输入，由判别模块分辨一组接收平面光场数据是来自训练集还是由传输网络生成，当判别模块无法区分二者时，训练完成，再在测试集上验证传输网络的生成结果是否逼近波动光学仿真的精度。    图 7 湍流子网络的生成对抗模式训练  （3）光源调制生成模型构建和与传输网络的联合训练  光源调制网络的本质是一个非随机的空间光场分布生成器，本项目以神经网络权重更新过程对光束优化问题建模，利用神经网络生成二维空间采样分布不受数学形式限制且无需先验知识的特点，实现光束参数的全局优化。调制网络只负责产生发射平面光束，其参数的优化依赖于湍流传输结果即接收平面光场的计算，为此将调制网络与（2）中的传输网络级联成为端到端的神经网络结构，冻结传输网络的所有权重，只更新调制网络的权重；调制网络生成的光束作为传输网络的输入，通过传输网络的输出计算由光斑漂移、光强起伏、桶中功率等光束质量评价指标转化并加权的损失函数。需要特别指出的是，调制网络的输入是不变的，联合框架训练中的批数据（batch）实际上是各个湍流子网络*Nt*的噪声输入（因此无需专门数据集），当训练完成时，调制网络的输出就是最优的发射平面光束振幅和相位。可见，调制网络无需推理泛化，其训练实际上是针对湍流传输的过拟合，因此，控制链路参数的取值范围，可以获得在该范围内传输特性更好的光束。  **2.3 实验方案**  （1）数据集生成  可靠的数据集是神经网络成功应用的基础，本项目使用数值方法生成湍流相位和光束传播数据，通过设置恰当的采样条件，模拟数据的准确性可以得到保证，其高效性也便于大规模数据的生成。本项目中两类数据均在MATLAB中生成，单边采样点数不低于512，训练集、验证集、测试集拟采用8：1：1的划分比例，波长固定为1550nm。   * 每个湍流相屏数据对应随机长度的路径分段，反映湍流强度的折射率结构常数也在一定范围内之间随机抽样，采用副谐波方法强化空间功率谱的低频采样，以准确复现大尺度波前畸变。 * 光场传输数据方面，发射平面考虑高斯光束、环形光束、平顶光束、阵列光束、贝塞尔光束、艾里光束等振幅分布，叠加可变相干长度的部分相干相位，研究使用参数化批量生成、空间域线性随机组合等方式扩充特征空间；接收平面光场则通过分布式波动光学仿真计算，使用申请人博士期间开发的软件平台。   （2）网络搭建与训练  本项目提出的光束优化框架，其实验实施的工作量主要在于搭建网络模型和确保训练收敛。   * 优化模型涉及的光源调制网络、湍流子网络、修正子网络和生成对抗模型的判别器均是需要选型或设计的神经网络模块。网络选型设计遵循的主要原则是，首先尽量使用成熟的网络结构，或以块而非层为单位进行搭建，在实现了基本功能的验证后，再考虑通过针对性的结构优化，优化方法主要是神经结构搜索。 * 传输网络及其子网络的训练都采用生成对抗模式，其特点就是收敛较为困难，且存在模式坍缩现象。为此计划采用包括WGAN-GP和频谱归一化等方式，同时充分借鉴、尝试文献中的各类训练技巧，避免梯度消失问题、提高模型输出的多样性。此外，考虑到湍流子网络的输出应满足Kolmogorov谱，而传输网络的输出也有明确的监督信号，因此可以设计RMSE之类的逐点误差，以一定权重加入生成模型的损失函数，加快训练收敛。 * 调制网络的训练与一般的分类网络类似，在传输网络功能正确的情况下将以较大概率收敛，其损失函数的最低值直接反映远场光束质量，因此除网络结构的设计外，损失函数中各项的权重、判别器生成器训练比例和其他超参设置，对最终收敛值有较大影响，需要以网格搜索的方式进行迭代优化。   （3）实验验证手段  优化框架完整建立后，通过传输网络的条件输入指定湍流链路参数集*P*link并开始训练，损失由调制网络给出对应的光束优化结果，结果的验证通过数值方法和实验方法分别进行，以闪烁指数、光束质心漂移和反应展宽情况的桶中功率作为评价指标。数值方法方面，在波动光学仿真中设置同样的链路参数*P*link，以高斯光束为基准，比较优化所得光束与现有各类光束在远场的光束性质。实验方面，搭建以热风湍流箱为核心的湍流传输平台，通过密集反射光路增加光束在湍流中的传输距离，研究优化所得光束在实验平台上的传输性质。由风扇和加热板产生的湍流虽然与真实大气湍流的统计特性存在差异，但也是一种常用的研究手段，可以在很大程度上反映光束的抗湍流特性。通过与华中科技大学光电学院的合作，还将开展楼宇间的短距离户外传输实验，使用两个空间光调制器对单模空间光激光器的振幅和相位分别进行调制，产生优化所得光束，在相距200m的两栋建筑间建立单向收发链路，以闪烁仪确定实验链路上的湍流强度，接收端使用高速CCD测量散斑特性。  **2.4 可行性分析**  （1）原理可行性  本项目以神经网络的权重更新对光束优化问题建模，其本质是在全局参数空间内对光束振幅和相位的二维分布进行搜索和性能评价。与计算机视觉类应用不同，神经网络在这里仅充当含有大量待定参数的非随机生成模型，当损失函数与接收平面的光束质量联系起来后，通过梯度下降更新网络参数而使损失函数减小，必然意味着发射平面的光束分布得到了优化，因此该光束优化方案在理论上是可行的。  （2）技术可行性  本项目以波动光学仿真和卷积神经网络为主要研究工具。波动光学仿真是较为成熟的光束传输数值计算方法，能够以较高的精度模拟光束在湍流信道中传播的各个路径分段上的；卷积神经网络是非线性黑盒函数/分布拟合工具，具有强大的空间特征提取和生成能力，适于处理光场分布这样的二维空间数据。传输网络的训练由波动光学仿真提供数据，生成对抗训练模式主要目的是使网络学习到湍流功率谱密度和波前调制过程对应的分布，这种显式的分布与ImageNet等数据集的隐分布相比更加容易学习。此外，本项目在具体实施过程中遵循由简到繁的原则，首先使网络学习弱湍流、低分辨率的生成和优化，在前一步功能验证通过的基础上逐步提高湍流强度和分辨率，以此保证模型的收敛性和成果的阶段性产出。  （3）申报人研究背景与基础  申报人本硕博均就读于华中科技大学光电学院，光学工程专业，研究生期间专业方向为空间光通信理论、统计光学、湍流光传输的波动光学仿真建模，提出径向部分相干光这一新型光束，以扩展惠更斯-菲涅尔原理改进了星地光通信理论模型，解释了星地链路不对称性的衍射原理，以第一作者身份发表SCI论文3篇、EI期刊和会议论文5篇。博士毕业后曾在锐捷网络任职算法研究员，从事基于深度学习的计算机视觉算法研发，作为主要成员参与了多镜头行人重识别、零售商品数据自动标注、智能识别台秤等项目，拥有较丰富的工程经验。综上，申请人同时具备的光场传播研究背景和神经网络相关技术积累，能够支撑本项目研究工作的顺利开展。 |

|  |
| --- |
| 3、研究计划的总体进度及安排（1000字以内） |
| 4、预期成果形式及知识产权、技术水平、市场前景及产业化后经济、社会效益预期结果（1000字以内） |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 五、研究基础与条件 | | | | | | | | | | | | | |
| （一）、申报者  1、申报者近五年承担的主要项目情况（包括国家、省部级及厅局、市级各类科技发展计划） | | | | | | | | | | | | | |
| 项目编号 | 项目名称 | 资助金额 | 位次 | | 计划类别 | | 计划下达单位 | | | 起止年月 | | 完成或进展情况 | |
|  |  |  |  | |  | |  | | |  | |  | |
|  |  |  |  | |  | |  | | |  | |  | |
|  |  |  |  | |  | |  | | |  | |  | |
|  |  |  |  | |  | |  | | |  | |  | |
|  |  |  |  | |  | |  | | |  | |  | |
| 2、申报者近五年发表的与本项目有关的代表性论著（不超过5篇，署名（独立）通讯作者的文章，备注一栏中必须标注并在附件中上传。） | | | | | | | | | | | | | |
| 发表时间 | 论著名称 | | | 发表刊物、出版社 | | | | 本人位次 | 收录情况 | | 影响因子 | | 备注 |
|  |  | | |  | | | |  |  | |  | |  |
|  |  | | |  | | | |  |  | |  | |  |
|  |  | | |  | | | |  |  | |  | |  |
|  |  | | |  | | | |  |  | |  | |  |
|  |  | | |  | | | |  |  | |  | |  |
| 3、申报者近五年完成的科研成果名称以及获奖情况（仅限省部级以上奖励） | | | | | | | | | | | | | |
| 授予时间 | 成果名称 | | 奖励名称 | | | 等级 | | 第一  完成人 | 本人位次 | | 授予单位 | | |
|  |  | |  | | |  | |  |  | |  | | |
|  |  | |  | | |  | |  |  | |  | | |
|  |  | |  | | |  | |  |  | |  | | |
|  |  | |  | | |  | |  |  | |  | | |
|  |  | |  | | |  | |  |  | |  | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| （二）、项目组其他成员**（项目组其他主要成员科研情况，不必将所有成员一一列出）**  1、项目组其他成员近五年承担的项目情况（包括国家、省部级各类科技发展计划、国家及省自然科学基金计划，限五项） | | | | | | | | | | | | | | | |
| 项目编号 | 项目名称 | 资助金额 | | 姓名 | | 位次 | 计划类别 | | 计划下达单位 | | | 起止年月 | | | 完成或进展情况 |
|  |  |  | |  | |  |  | |  | | |  | | |  |
|  |  |  | |  | |  |  | |  | | |  | | |  |
|  |  |  | |  | |  |  | |  | | |  | | |  |
|  |  |  | |  | |  |  | |  | | |  | | |  |
|  |  |  | |  | |  |  | |  | | |  | | |  |
| 2、项目组其他成员近五年发表的与本项目有关的代表性论著（不超过5篇） | | | | | | | | | | | | | | | |
| 发表时间 | 论著名称 | | 发表刊物、出版社 | | | | 作者 | 本人位次 | | 收录情况 | | | 影响因子 | | 备注 |
|  |  | |  | | | |  |  | |  | | |  | |  |
|  |  | |  | | | |  |  | |  | | |  | |  |
|  |  | |  | | | |  |  | |  | | |  | |  |
|  |  | |  | | | |  |  | |  | | |  | |  |
|  |  | |  | | | |  |  | |  | | |  | |  |
| 3、项目组其他成员近五年完成的科研成果名称以及获奖情况（仅限省部级以上奖励，限五项） | | | | | | | | | | | | | | | |
| 授予时间 | 成果名称 | | | | 奖励名称 | | 等级 | 第一  完成人 | | | 本人位次 | | | 授予单位 | |
|  |  | | | |  | |  |  | | |  | | |  | |
|  |  | | | |  | |  |  | | |  | | |  | |
|  |  | | | |  | |  |  | | |  | | |  | |
|  |  | | | |  | |  |  | | |  | | |  | |
|  |  | | | |  | |  |  | | |  | | |  | |

六、项目经费预算表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **科目名称** | **金额（单位：万元）** | **备注（计算依据与说明）** |
| 项目资助总额 |  |  |
| 一、项目直接费用 |  |  |
| 1、设备费 |  |  |
| （1）设备购置费 |  |  |
| （2）设备试制费 |  |  |
| （3）设备改造与租赁费 |  |  |
| 2、材料费/测试化验加工费/燃料动力费 |  |  |
| 3、差旅/会议/国际合作与交流费(直接费用10%以上需填写测算依据) |  |  |
| 4、劳务费/专家咨询费 |  |  |
| 5、其他支出 |  |  |
| 二、项目间接经费 |  |  |
| 1、房屋占用/日常水电气暖消耗 |  |  |
| 2、管理费 |  |  |
| 3、绩效支出 |  |  |
| 三、自筹经费 |  |  |

|  |
| --- |
| 附件： |