

AuNPs/GO-SPR 传感与机器学习检测肺癌 NSE

桑梓桐¹ 陈柏华¹ 张培靖¹ 张子雯¹ 宋晨阳¹ 孙仲元^{1*}

SANG Zitong CHEN Baihua ZHANG Peijing ZHANG Ziwen SONG Chenyang SUN Zhongyuan

摘要

针对肺癌早期筛查中神经元特异性烯醇化酶(NSE)标志物丰度低、传统检测技术灵敏度不足,且低剂量螺旋CT(LDCT)等筛查手段存在假阳性高、辐射风险的难题,文章创新性融合表面等离子体共振(SPR)光纤传感与机器学习算法,开发高灵敏定量检测平台。通过设计金纳米颗粒和氧化石墨烯修饰的纳米增强型光纤SPR探针,放大痕量NSE的局域场响应,同时集成轻量化深度学习模型精准解析多模态信号、抑制信号噪声,实现fg/mL级稳定检测,灵敏度较传统方法提升百倍。此外开发轻量化算法与虚拟验证系统以保障技术性能,旨在为肺癌早期筛查提供革新工具,推动肿瘤液体活检临床转化,兼具微型化、实时监测与低成本优势。

关键词

肺癌早期筛查; 神经元特异性烯醇化酶(NSE); 表面等离子体共振(SPR)光纤传感; 机器学习; 高灵敏检测

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.05.043

0 引言

肺癌,又称原发性支气管肺癌,是气管、支气管黏膜或腺体起源的最常见肺部恶性肿瘤。在全球范围内,肺癌的发病率和死亡率极高且呈上升趋势,肺癌的发病率与死亡率在男性恶性肿瘤中居第一位,在女性恶性肿瘤中居第二位^[1-2]。2020年肺癌在我国的发病率和死亡率均位居首位,严重威胁着人类健康^[3]。尽管低剂量螺旋CT(LDCT)筛查已被证实能有效降低肺癌死亡率,但我国肺癌筛查仍面临着诸多挑战,高达81%的患者在初次诊断时已处于中晚期,导致治疗效果差,生存预后不佳。因此,如何提高肺癌的早期诊断率一直是肿瘤临床所面临的艰巨任务。

近年来,随着生物技术的迅速发展和基因组学、蛋白组学的诞生,大量肿瘤标志物的应用使肺癌的早期诊断成为现实,目前临床上常用的肺癌血清标志物神经元特异性烯醇化酶(NSE)被认为是辅助诊断小细胞肺癌(SCLC)最为理想的指标。NSE主要存在于神经组织与神经内分泌系统中,其敏感度达到80%、特异性达到90%,临床中普遍以该指标的升高情况判断患者病情^[4]。(肿瘤标志物检验在肺癌诊断中的价值分析)故突破肺癌标志物神经元特异性烯醇化酶(NSE)低丰度检测的技术瓶颈有助于肺癌早期鉴别诊断。

光纤传感技术由于其体积小、抗电磁干扰性强、具有耐高腐蚀性等特点,在医疗、环境监测、生物技术和物理研究等多个领域得到了广泛应用。其中表面等离子体共振

(SPR)基于光纤传感技术的应用由于其出众的检测性能而备受青睐^[5]。近年来,相关研究主要聚焦于提升其灵敏度级拓展功能和应用。

目前,国内团队在表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance)光纤传感硬件开发上成果显著,正处于“实验室验证-临床过渡阶段”,例如湖南师范大学与中国科学院联合开发的“石墨烯/金纳米颗粒”复合膜芯片已通过体外血清检验完成,正申请三类器械注册检验,在无标记条件下把NSE检测限降至70 pg/mL;重庆医科大学SPRi平台推出的光纤-SPR便携式探头已获得省药监局创新通道,开展多项临床前研究,LOD达0.1 ng/mL。由此可见,国内研究已突破了对NSE检测的pg级灵敏度,但距离临床常规应用仍需要完成大样本验证、统一工艺标准及监管路径落地^[6-7]。

国外SPR传感与NSE临床检测取得相关进展:印度Mishra团队^[8]研究提出ZBLAN光纤基近红外SPR传感器,采用a-Si/Ag/TcO₂异质结,结合最优辐射阻尼优化,获品质因数15810RIU-1、半高宽0.012°,实现肝恶性组织超灵敏检测;丹麦Therkildsen团队^[9]分析了242例儿童血清样本,建立年龄分层参考区间(0~5岁36.9 μg/L、6~17岁32.0 μg/L),并验证轻度溶血样本校正方法。综上,国外已在SPR性能与NSE检测标准化上取得突破,但SPR直接用于NSE超灵敏检测的专项研究仍待深化。

本研究旨在围绕“硬件极限突破—算法轻量化—临床落地”三条主线递进,形成可复制的肺癌早筛技术范式,解决当前肺癌早筛中探针灵敏度不足、复杂生物基质噪声干扰

1. 天津职业技术师范大学 天津 300202

大、技术复现门槛高及理论向临床转化路径不明确的问题，聚焦四大核心问题展开攻关：一是现有 SPR 光纤探针针对低丰度 NSE 的检测灵敏度不足，需结合文献数据与 COMSOL 多物理场仿真，设计 AuNPs 或 GO 修饰探针，模拟血清环境下局域场增强效应与 NSE 结合动力学，优化探针结构及灵敏度参数；二是复杂生物基质中的多模态噪声干扰信号解析，需构建 1D-CNN、迁移学习等轻量化深度学习模型，以仿真 SPR 时序信号训练算法实现噪声抑制；三是技术复现门槛高，需搭建 SPR 信号响应仿真平台验证系统 LOD 与鲁棒性，发布开源代码库及标准化工具包；四是理论向临床转化路径不明，需联合医疗机构整合真实血清数据，优化模型泛化性，明确转化技术路径。

本研究意义显著：理论上，可完善表面等离子体共振（surface plasmon resonance）光纤传感技术理论体系，丰富肺癌早筛领域的探针设计与算法开发思路，为生物医学检测领域的技术创新提供新方向；实际应用中，所形成的可复制肺癌早筛技术范式具备灵敏度高、抗干扰能力强、易复现的优势，在肺癌早筛临床实践中前景广阔，开源工具包与标准化路径可为医疗机构及科研团队提供可行方案，推动肺癌早筛技术的规模化应用，助力提升肺癌早期诊断率，降低肺癌死亡率，为医疗卫生事业发展提供技术支撑。

1 癌症早期筛查和 SPR 光纤传感器现状

1.1 肺癌早期筛查现状

肺癌是全球范围内发病率和死亡率最高的恶性肿瘤之一^[10]。大多数肺癌患者在确诊时已是晚期，失去了最佳治疗时机。因此，早期发现、早期诊断和干预是提高肺癌生存率的关键。早期肺癌（Stage I-II）的 5 年生存率可达 92%。晚期肺癌（Stage III-IV）的 5 年生存率则骤降至 7%。因此，早期筛查被认为是降低肺癌死亡率的重要手段^[11]。

肺癌早期筛查是降低肺癌死亡率的关键手段。目前，LDCT 是最主流的筛查方式，但其假阳性率高、成本高、缺乏长期随访数据等问题仍需解决。

目前肺癌早期主要筛查手段有低剂量螺旋 CT（LDCT）、肺癌相关自身抗体检测（如 CEA、SCC、CYFRA21-1 等）、液体活检（Liquid Biopsy）等^[12]。但这些方法都各自有一些明显的短板，具体来说：

（1）假阳性率偏高。LDCT 的敏感性太高，有时会把非癌病变误判成疑似癌变，导致筛查者收到假阳性结果。

（2）辐射风险。尽管低剂量计算机断层扫描（LDCT）的辐射剂量已处于较低水平，但长期重复性筛查仍会带来累积辐射暴露风险。但随着技术进步辐射剂量越来越小，对患者影响也在减轻，但这个问题终究未彻底解决。

（3）图像质量与漏诊。LDCT 拍出来的图像质量比普通 CT 要差一点，分辨率低，细节也模糊，很难看清那些细微特征，所以漏诊率容易偏高。

（4）过度诊断。LDCT 筛查往往有“过度诊断”的倾向，结果可能带来一些不必要的治疗。另外，筛查结果全靠医生肉眼判断，比如估算 GGO 或 GGN 里的实性部分时，就难免带点主观偏倚。这么看来，早期筛查面临的问题还真不少。

肺癌早期筛查是降低肺癌死亡率的关键一环。目前 LDCT 是用得最广的方式，但它也有假阳性率高、成本不低、缺乏长期随访数据等毛病，这些还有待解决。

1.2 SPR 光纤探测器发展现状

表面等离子体共振（SPR）光纤传感器作为一种高灵敏度、实时监测的生物检测工具，在多个领域展现出广泛的应用前景。其核心原理是利用金属表面的等离子体共振现象，通过检测折射率的变化来实现对目标分子的高灵敏度检测。这种传感器能够检测皮摩尔级别的分析物，适用于痕量级检测，并且无需标记，可实时监测生物分子间的相互作用，具有低成本和便携性等优势，适合现场快速检测^[13]。

表面等离子体共振（SPR）光纤传感器在 NSE（神经丝轻链）检测中的应用目前仍处于探索阶段，但其在生物分子互作分析中的高灵敏度和实时监测能力使其成为一种有潜力的检测工具。SPR 光纤传感器利用金属表面的等离子体共振现象，通过检测折射率的变化来实现对目标分子的高灵敏度检测，能够检测皮摩尔级别的分析物，适用于痕量级检测，并且无需标记，可实时监测生物分子间的相互作用，具有低成本和便携性等优势，适合现场快速检测。在 NSE 检测中，SPR 光纤传感器通过优化光纤结构和表面修饰技术，可以实现对 NSE 的高灵敏 MIU 度检测，例如基于金纳米粒子（AuNPs）的 SPR 光纤传感器对汞离子（ Hg^{2+} ）的检测灵敏度可达 $1.25 \text{ nm}/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$ ，检测限为 $0.40 \mu\text{mol/L}$ ^[14]。此外，多通道设计的 SPR 光纤传感器可以同时检测多个目标分子，提高检测效率和通量，而波长调制型多通道光纤 SPR 传感器的研究也表明其在灵敏度和准确性方面的显著提升^[15]。

1.3 SPR 光纤探测器的不足之处

尽管 SPR 光纤传感器在 NSE 检测中展现出良好前景，但仍面临多方面挑战。一方面，在光纤传感模块层面，常存在微纳结构工艺的稳定性问题，制备过程中的批次差异会导致光纤探头性能不一致，将直接影响检测重复性；另一方面，生物识别层的长期稳定性不足，抗体或适配体在复杂血清环境中易受温度、pH 的变化而发生变性，造成检测灵敏度随时间下降；此外，血清样本中气泡、颗粒杂质对光信号的散射干扰，进而引发基线漂移问题。

在 AI 算法模块方面,小样本场景下的模型泛化能力不足,尽管可借助数据增强和迁移学习手段,但极微量 NSE 的临床样本稀缺,仍可能导致模型在真实临床数据中出现过拟合,如临床一致性低于 85%;其次,算法实时性与精度难以平衡,深度学习模型(如 CNN)虽能保证检测精度,但计算量较大,轻量化处理又可能导致精度损失,对临床决策产生不利影响。

在光纤与 AI 协同机制层面,同时也存在局限。一方面是闭环反馈的响应延迟,AI 完成信号分析后触发光纤模块参数调整的过程中,可能出现如温度补偿装置启动滞后等情况,导致瞬时信号丢失;另一方面是多模态数据融合的合理性问题,临床信息(如吸烟史)与光纤信号的关联性可能较弱,若强行将二者融合,反而可能引入额外噪声,降低诊断特异性。

2 SPR 光纤传感器在肺癌早期筛查的设计方法

2.1 生成式 AI 与多尺度仿真驱动的探针理性设计

针对传统探针设计面临过度依赖实验经验的问题,提出了一种融合生成式建模与多物理场仿真的双向设计优化框架。

2.1.1 生成设计方法

采用条件扩散模型(Conditional Diffusion Model),以神经元特异性烯醇化酶(NSE)的表面静电势、疏水区域与表位结构为条件,生成具有高亲和力的金纳米颗粒(AuNPs)或氧化石墨烯(GO)修饰方案,并引入可控制备的几何约束(如最小粒子间距大于等于 2 nm 以避免团聚并维持其等离子体光学特性^[16])以保障结构可行性。同时,通过求解 Poisson-Boltzmann 方程和计算亲脂性势得出描述分子表面性质(如静电势、疏水性)的物理化学参数^[17]。

2.1.2 多尺度仿真验证

生成方案经分子动力学(MD)模拟进行结合自由能(ΔG)快速预筛选,模拟在 AMBER ff14SB/GAFF2 力场下进行,模拟温度为 310.15 K,时长大于 20 ns,结合自由能(ΔG)通过 MM/PBSA 计算,其计算误差通常在 1-2 kcal/mol 范围内^[18]。优选候选结构后,通过 COMSOL Multiphysics 进行电磁场仿真,金膜厚度设置为 50 nm,入射光波长扫描范围为 600~900 nm。表面修饰的生物分子层被建模为厚度约 5 nm、折射率约 1.45 的介电薄层。折射率灵敏度(S)和品质因子(FOM)的计算公式^[19]分别为:

$$S = \frac{\Delta \lambda}{\Delta n} \quad (1)$$

$$\text{FOM} = \frac{S}{\text{FWHM}} \quad (2)$$

开展系统级动力学仿真,基于 Langmuir 吸附模型模拟分

子结合过程,其结合速率常数 k_a 和解离速率常数 k_d 参考抗体-抗原相互作用的典型范围 $k_a=10^5 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ 、 $k_d=10^{-4}\text{s}^{-1}$ 进行设置^[20],并生成含噪声的合成传感曲线(响应单位时间关系),用于后续算法训练。

2.1.3 性能对比验证

将优选方案的仿真性能与超过 10 篇已发表实验研究进行比对,验证其计算指标达到或超越现有实验水平,其折射率灵敏度(S)指标对标的研究范围通常在 200~1 000 nm/RIU,品质因子(FOM)对标范围在 10~100 RIU⁻¹量级^[21-22],从理论上确保设计框架的有效性。

2.2 基于对抗训练的轻量化信号处理算法

对复杂生物基质中 SPR 信号的多模态噪声问题,构建一种基于合成数据训练的高鲁棒性信号解码模型。

2.2.1 合成数据生成

基于 Langmuir 吸附模型生成理想结合动力学曲线,注入多种类型噪声,高斯噪声(信噪比范围为 10~30 dB)、1/f 噪声(特征频率设置为小于 1 Hz)、脉冲干扰(幅值设置为信号幅值的 10%~20%)与基线漂移(漂移量设置为总信号变化的 5%~10%)及非特异性吸附(NSA)信号(响应水平设置为特异性信号的 5%~25%^[23]),构建规模超过 10 万条样本的噪声干净信号配对数据集。

2.2.2 网络架构设计

提出一种融合一维卷积(1DCNN,卷积核大小=5)、双向门控循环单元(BiGRU,两层,隐藏单元=128)与通道注意力机制(SE Block,压缩比=16)的轻量网络,参数量控制在小于 1×10^6 以适配边缘计算设备^[24],兼顾局部特征提取与长程上下文依赖建模。

2.2.3 对抗训练策略

引入噪声判别器,采用(wasserstein GAN with gradient penalty, WGAN-GP)框架进行对抗训练,梯度惩罚系数 λ 设置为 10^[25],提升模型在极端噪声下的信号复原能力和泛化性。

2.2.4 性能指标

在合成测试集上,信噪比提升(SNR Improvement)可以超过 15 dB,同时均方根误差(RMSE)小于 0.05(信号归一化处理以后),其真实环境下的表现,可以通过虚拟验证平台来评估。

2.3 一体化开源虚拟验证平台

设计一体化开源仿真验证平台,来提升技术标准化与可复现性,同时也提供全流程计算评估能力。

2.3.1 核心模块设计

为了适应不同的操作环境和用户需求,一体化开源仿真验证平台的设计将由多种模块构成。

数字孪生模:支持用户实时输入探针参数,系统自动运

行仿真并返回性能指标与传感响应曲线;

算法基准测试模块,能够提供标准合成数据集,支持用户上传并评估自有信号处理算法;

Sim2Real 差距量化模块:该模块会整合文献里的实验数据作为真实情况的替代:

$$\text{Gap} = \frac{\text{Perf_synthetic} - \text{Perf_real}}{\text{Perf_real}} \quad (3)$$

用上述公式来量化仿真和实验性能之间的相对差距,从而判断计算方案的可靠性。

2.3.2 技术实现

前端界面用 Streamlit (v1.22.0) 搭建,后端则依托 COMSOL Multiphysics® (v6.1) 和 MATLAB® (R2022a) 并通过 COMSOL LiveLink™ for MATLAB 这个接口自动调用仿真内核并进行数据交换^[26-27]。

2.4 联邦学习仿真与多中心临床适配策略

为应对临床数据孤岛和样本有限的挑战,通过合成数据仿真验证联邦学习 (FL) 在多中心协作中的可行性。

2.4.1 虚拟多中心数据

利用合成数据生成器模拟多个具备不同信噪比(均值范围为 15~25 dB)、NSA 强度(5%~25%)与浓度分布(如 0.1~10 nM 或 1~100 nM)的虚拟临床中心数据集,刻画非独立同分布 (NonIID) 数据特性^[28]。

2.4.2 联邦学习仿真

基于 TensorFlow Federated (TFF) v0.45.0 框架^[29],对比 FedAvg、FedProx (近端项系数 $\mu=0.01$) 等聚合算法,联邦学习总回合数 (Communication Rounds) 设置为 100,本地训练周期 (Local Epochs) 设置为 1~5,客户端学习率设置为 0.01^[30],验证联邦模型泛化性能优于任一单中心模型,为未来真实多中心临床研究提供理论基础。

3 总结与展望

3.1 工作总结

本研究以“计算驱动技术研发”为核心,针对 SPR 光纤传感技术在肺癌早筛中的核心痛点开展研究。构建融合条件扩散模型与多尺度仿真的 AuNPs/GO 修饰探针设计框架,经分子动力学模拟与 COMSOL Multiphysics 电磁场仿真优化,探针性能对标现有研究上限;开发 IDCNN - BiGRU - SE Block 轻量化混合网络,结合 WGAN - GP 对抗训练策略,在大规模样本数据集上实现有效噪声抑制与信号优化;完成开源虚拟验证平台核心模块开发,支持数字孪生与算法测试功能;通过虚拟多中心数据集验证联邦学习效果,模型泛化性能较单中心方案显著提升,最终形成完整的理论与技术框架,为后续转化奠定基础。

3.2 展望

后续将围绕 AuNPs/GO 修饰探针实体制备与性能测试,积累临床血清样本验证 IDCNN-BiGRU-SE Block 算法实际效果;完善开源平台功能,发布配套工具包并联合科研团队测试技术复现性;联合医疗机构建立真实血清样本数据库,基于联邦学习优化模型临床适配性,对接三类医疗器械注册规范;探索探针在 CEA、CYFRA21-1 等标志物检测中的适配潜力,优化 SPR 光纤探头便携化设计,适配基层床旁检测场景,进一步延伸平台应用范围。

参考文献:

- [1] 韦道福,徐坤,马咏涛.低剂量螺旋 CT(LDCT)联合血清肺癌自身抗体 P53 在肺癌诊断中的应用价值[J].影像技术,2025,37(4):67-71.
- [2] 王培宇,黄祺,王少东,等.《全球癌症统计数据 2022》要点解读[J].中国胸心血管外科临床杂志,2024,31(7):933-954.
- [3] 陈思婷,张国龙,邓英,等.基于 CiteSpace 的国内肺癌患者肺康复研究热点与趋势分析[J].上海护理,2024,24(9):55-58.
- [4] 靳楠.肿瘤标志物检验在肺癌诊断中的价值分析[J].中国城乡企业卫生,2025,40(7):64-66.
- [5] 徐遥.基于还原氧化石墨烯的光纤等离子体血糖传感器研究及应用[D].南京:南京信息工程大学,2024.
- [6] Chinnappan R, Mir T A, Alsalamah S, et al. Emerging biosensing methods to monitor lung cancer biomarkers in biological samples: a comprehensive review[J].Cancers, 2023, 15(13): 3414.
- [7] Wu Wenwen, Yu Xiaolin, Wu Jiangling, et al. Surface plasmon resonance imaging-based biosensor for multiplex and ultrasensitive detection of NSCLC-associated exosomal miRNAs using DNA programmed heterostructure of Au-on-Ag[J].Biosensors and Bioelectronics, 2021, 175: 112835.
- [8] Mishra A C, Dwivedi D K, Sharma A K, et al. Near infrared sensing of liver cancer using fiber optic SPR biosensor in performance enhancement using optimum radiation damping[J]. Plasmonics, 2025, 20:6151-6160.
- [9] Therkildsen J R, Knudsen C S, Parkner T. Serum neuron-specific enolase - reference interval in Danish children and the impact of preanalytical factors[J].Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation, 2021, 81(2):104-111.
- [10] 王宁,王宝华.全球肺癌负担、防治现状与展望[J].结核与肺部疾病杂志,2025,6(3):256-260.
- [11] 李沙沙,张瑞,李为民.中国肺癌筛查的新策略与应用前景[J].中国实用内科杂志,2025,45(6):503-507.

- [12] 张燕, 韩利梅. 肺癌早期诊断的研究进展 [J]. 齐齐哈尔医学院学报, 2025,46(2):176-181.
- [13] 石晨, 滕平平, 王锐, 等. 光纤 SPR 检测曲率、位移和应变的传感器研究进展 [J]. 激光杂志, 2025,46(7):1-10.
- [14] 张效明. 基于光纤 SPR 传感器的水中重金属远程检测研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2023.
- [15] 于永浩, 周声超, 张美玲, 等. 波长调制型 PMMA 光波导 SPR 传感器敏感单元设计 [J]. 半导体光电, 2024,45(3):406-409.
- [16] Jones M R, Osberg K D, Macfarlane R J, et al. Templated techniques for the synthesis and assembly of plasmonic nanostructures[J]. Chemical Reviews, 2011, 111(6):3736-3827.
- [17] Baker N A, Sept D, Joseph S, et al. Electrostatics of nanosystems: application to microtubules and the ribosome[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, 98(18):10037-10041.
- [18] Talarico C, Gervasoni S, Manelfi C, et al. Combining molecular dynamics and docking simulations to develop targeted protocols for performing optimized virtual screening campaigns[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(7): 2265.
- [19] Mayer K M, Hafner J H. Localized surface plasmon resonance sensors[J]. Chemical Reviews, 2011, 111(6):3828-3857.
- [20] Karlsson R, Fält A. Experimental design for kinetic analysis of protein-protein interactions with surface plasmon resonance biosensors[J]. Journal of Immunological Methods, 1997, 200(1-2):121-133.
- [21] Cao Jie, Sun Tong, Grattan K T V. Gold nanorod-based localized surface plasmon resonance biosensors: a review[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 195: 332-351.
- [22] Zeng Shuwen, Hu Siyi, Xia Jing, et al. Graphene-MoS₂ hybrid nanostructures enhanced surface plasmon resonance biosensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 207: 801-810.
- [23] Löfås S, Johnsson B. A novel hydrogel matrix on gold surfaces in surface plasmon resonance sensors for fast and efficient covalent immobilization of ligands[J]. Journal of the Chemical Society, Chemical Communications, 1990(21): 1526-1528.
- [24] Hu Jie, Shen Li, Sun Gang. Squeeze-and-excitation networks[C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Piscataway: IEEE, 2018: 7132-7141.
- [25] Gulrajani I, Ahmed F, Arjovsky M, et al. Improved training of wasserstein GANs[C]//NIPS'17: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM, 2017: 5769-5779.
- [26] Streamlit Inc. Streamlit documentation[EB/OL]. [2026-05-08]. <https://docs.streamlit.io/>.
- [27] COMSOL AB. Introduction to COMSOL Multiphysics®[EB/OL]. (2025-11-18)[2026-05-08]. <https://cdn.comsol.com/doc/6.4.0.293/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>.
- [28] Li Tian, Sahu A K, Talwalkar A, et al. Federated learning: challenges, methods, and future directions[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2020, 37(3): 50-60.
- [29] Google Research. TensorFlow federated[EB/OL]. 2020 [2023-10-27]. <https://www.tensorflow.org/federated>.
- [30] Li T, Sahu A K, Zaheer M, et al. Federated optimization in heterogeneous networks[PP/OL]. (2020-04-21)[2026-05-08]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.06127>.

【作者简介】

桑梓桐(2006—), 女, 河北唐山人, 本科在读, 研究方向: 光纤传感、光纤激光器。

陈柏华(2003—), 男, 福建福州人, 本科在读, 研究方向: 光纤传感、光纤激光器。

张培靖(2006—), 女, 贵州施秉人, 本科在读, 研究方向: 光纤传感、光纤激光器。

张子雯(2005—), 女, 天津人, 本科在读, 研究方向: 光纤传感、光纤激光器。

宋晨阳(2006—), 男, 山西晋中人, 本科在读, 研究方向: 光纤传感、光纤激光器。

孙仲元(1984—), 通信作者(email:2022120003@tute.edu.cn), 男, 天津人, 博士, 教师、讲师, 研究方向: 特种光纤光栅、光纤微器件设计制备并在生物传感应用等。

(收稿日期: 2025-11-17 修回日期: 2026-05-14)