

引用本文:李术强,吕福睿,刘作禹,等.基于BP神经网络的参数自调节三维光纤章动算法[J].光通信技术,2026,50(3):46-52.

基于BP神经网络的参数自调节三维光纤章动算法

李术强^{1,2},吕福睿^{1,2},刘作禹^{1,2},吴昊¹,金玳冉¹,马鑫洋¹,高世杰^{1*},刘永凯^{1*}

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:针对自由空间光通信中单模光纤耦合易受静态偏差与动态扰动影响、固定参数章动算法鲁棒性不足的问题,提出一种基于反向传播(BP)神经网络的参数自调节三维光纤章动算法。该算法以实时耦合光功率及其变化率为输入,通过BP神经网络非线性映射能力,在线自主决策输出章动半径、章动步长、Z轴扫描半径及扫描步长,并结合三维章动搜索机制实现对横向和轴向对准偏差的联合校正。仿真结果表明:静态偏差下,该算法较固定参数算法稳态精度提升19.51%~67%,耦合速度提升11.94%~53.32%;动态扰动下,仍保持高耦合效率与稳态精度,具备良好的宽频适应性。

关键词:自由空间光通信;单模光纤;光纤章动;反向传播神经网络;参数自调节

中图分类号:TN249 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)03-0046-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.03.008

Three-dimensional fiber nutation algorithm with self-adjusting parameters based on BP neural network

LI Shuqiang^{1,2}, LYU Furui^{1,2}, LIU Zuoyu^{1,2}, WU Hao¹, JIN Dairan¹, MA Xinyang¹, GAO Shijie^{1*}, LIU Yongkai^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To address the issues that single-mode fiber coupling in free-space optical communication is susceptible to static deviations and dynamic disturbances, and that fixed-parameter nutation algorithms lack robustness, a parameter self-adjusting three-dimensional fiber nutation algorithm based on a back propagation (BP) neural network is proposed. The algorithm takes the real-time coupled optical power and its rate of change as inputs. Leveraging the nonlinear mapping capability of the BP neural network, it autonomously and online determines the optimal nutation radius, nutation step size, Z-axis scanning radius, and Z-axis scanning step size. Combined with a three-dimensional nutation search mechanism, it achieves joint correction of lateral and axial alignment errors. Simulation results show that under static deviations, the proposed algorithm improves steady-state accuracy by 19.51%~67% and increases coupling speed by 11.94%~53.32% compared to fixed-parameter algorithms. Under dynamic disturbances, it maintains high coupling efficiency and steady-state accuracy, demonstrating excellent wide-frequency adaptability.

Key words: free-space optical communication, single-mode fiber, fiber nutation, back propagation neural network, parameter self-adjust

收稿日期:2025-04-09。

基金项目:中国科学院青年创新促进会项目(20211214)资助。

作者简介:李术强(2002—),男,硕士研究生,现就读于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,主要研究方向为激光通信单模光纤耦合算法。曾参与激光某复合通信天线及伺服系统项目、某激光通信指向机构项目。

*通信作者 1:高世杰(1979—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光通信技术研究。

*通信作者 2:刘永凯(1989—),男,博士,副研究员,主要从事自由空间光通信光束跟踪、指向与控制相关技术研究。



0 引言

自由空间光通信(FSOC)技术以激光为载体,具有传输速率快、信息容量大、保密性好等优点,已成为未来通信网络的重要发展方向^[1-6]。将空间光束高效耦合进单模光纤(SMF)是FSOC系统的核心技术瓶颈之一。SMF纤芯直径仅微米级,这对光束的对准精度要求极高。大气湍流、平台振动及装调误差等因素会导致光斑与光纤之间产生横向和轴向偏差,严重降低耦合效率^[7-8],影响通信链路性能与可靠性。因此,校正

光束对准偏差、提升光纤耦合效率,成为亟待解决的关键问题。国内外学者针对光纤对准偏差校正已开展大量研究,多采用快速反射镜(FSM)作为驱动装置,结合章动算法、无参数优化算法构建光纤耦合控制系统,实现对准偏差补偿^[9-12];也有研究依托自适应光纤耦合器并配合随机并行梯度下降(SPGD)算法完成偏差校正^[13-14]。现有方案虽能在一定程度上改善耦合性能,但仍存在明显局限:多数系统仅聚焦横向偏差校正,普遍忽略轴向离焦带来的性能劣化。

在实际工程中,温度变化、空气气流等环境因素会导致系统焦距漂移,使轴向偏差逐渐增大,显著降低耦合效率。研究表明,仅校正横向偏差难以达到最优耦合,轴向偏差的校正同样至关重要^[15-17]。目前,已有研究团队设计了能够同时校正横向和轴向偏移的光纤耦合系统,如采用四维光纤调整架^[18]或五自由度耦合装置配合SPGD算法^[19]进行对准偏差校正。然而,现有同时校正横纵向偏差的研究中,对动态扰动(如平台振动)的考虑尚不充分。文献[20-21]比较了章动算法与SPGD算法在动态扰动下的表现,结果表明章动算法具有更优的扰动抑制带宽,更适用于动态环境;而在静态偏差校正中,章动算法对大偏差收敛快,SPGD算法在小偏差下效率更高。

针对上述不足,本文提出一种基于反向传播(BP)神经网络的参数自调节三维光纤章动算法,实现章动参数的自动调节,显著提高耦合效率和稳态精度。

1 三维章动算法

1.1 三维章动算法原理

本文采用三维章动耦合机制,可同时实现X/Y横向、Z轴向对准偏差校正。其核心原理为:先设定章动半径、章动步长、Z轴扫描半径及扫描步长,对光斑进行圆周扫描与轴向往返扫描;通过光功率采样搜索最大耦合功率位置,逐次迭代更新X/Y扫描中心与Z轴向扫描中心,不断逼近最佳耦合点,直至系统进入稳态并收敛。具体流程如下:

1)初始化:假定初始扫描中心为 (X_0, Y_0, Z_0) ,设置X/Y方向的章动半径为 r ,章动步长为 d ,Z方向的扫描半径为 r_z 和扫描步长为 d_z ,以及采样点数为 n 。

2)X/Y方向扫描:计算控制量 (X'_0, Y'_0) ,其表达式为

$$\begin{cases} X'_0 = X_0 + r \cos(2\pi i/(n-4)) \\ Y'_0 = Y_0 + r \sin(2\pi i/(n-4)) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i = 0, 1, 2, \dots, n-4$ 。

依此输出一周的控制量并对各点功率进行采样,记录其中的最大光功率及其对应的采样点序号 I_0 。

3)更新X/Y扫描中心:将 (X_0, Y_0) 沿光功率最大的方向移动一个步长 d ,其表达式为

$$\begin{cases} X_0 = X_0 + d \cos(2\pi(I_0 - 1)/(n-4)) \\ Y_0 = Y_0 + d \sin(2\pi(I_0 - 1)/(n-4)) \end{cases} \quad (2)$$

4)Z方向扫描:计算Z方向的2个控制量 Z'_0 和 Z''_0 ,如式(3)所示。

$$\begin{cases} Z'_0 = Z_0 + r_z \\ Z''_0 = Z_0 - r_z \end{cases} \quad (3)$$

依次输出 Z'_0 和 Z''_0 ,对2点的功率进行采样,记录其中的最大光功率及其方向。

5)更新Z扫描中心:将 Z_0 沿光功率最大的方向移动一个步长 d_z 后,其表达式为

$$Z_0 = Z_0 \pm d_z \quad (4)$$

6)迭代:重复步骤2)~5),直至达到稳态。

1.2 仿真系统与参数设置

为验证三维章动算法的可行性,本文开展了仿真实验,原理图如图1所示。系统由激光器、准直透镜、耦合透镜、扰动FSM、耦合FSM、高精度位移台及光功率计组成。扰动FSM模拟平台振动及其他外界干扰,耦合FSM与位移台执行三维章动搜索与偏差校正,光功率计实时反馈耦合功率至控制器。仿真参数设置如下:激光波长为1 550 nm,耦合透镜焦距为50 mm、直径为10 mm,SMF模场半径为5.2 μm ,FSM工作频率为1 kHz,高精度位移台工作频率为100 Hz。全文仿真统一固定采样点数 $n=10$,保证对比条件一致。

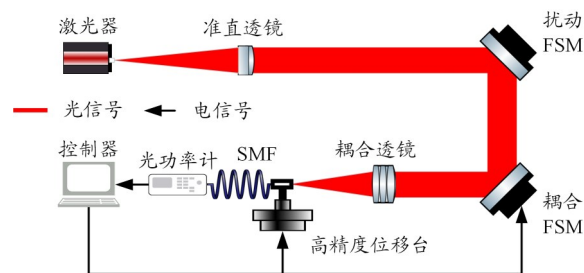


图1 仿真实验原理图

1.3 静态偏差下算法性能验证

设置横向偏差为5 μm 、轴向偏差为150 μm 作为典型静态偏差工况。为了更精确地量化章动参数对系统耦合性能的影响,本文设计多组章动参数组合(A1~A16)开展仿真,并采用以下3个评价指标进行分析:收敛时间、稳态稳定性及稳态耦合效率。其中,收

李术强,吕福睿,刘作禹,等:基于BP神经网络的参数自调节三维光纤章动算法

敛时间指耦合能量从初始状态上升并稳定至最佳耦合点所需的时间,用于反映耦合速度;稳态稳定性(稳定精度)指稳态下耦合效率的标准差 σ ,该值越小表明抖动抑制越好、链路越稳定;稳态耦合效率指稳态阶段耦合效率的平均值 η ,用于衡量最终的耦合能量水平。结果如表1所示。由表1可知,在静态偏差下,三维章动算法能有效校正横向和轴向偏差,且校正效果与章动算法的参数密切相关,具体分析如下:

1)章动半径 r (组A1-A4)的影响。 r 对耦合速度影响不明显(收敛时间均约0.410 s),但显著影响稳态稳定性:与最小半径(A1组)相比,最大半径(A4组)的标准差 σ 增大至5.82倍,PV值增大至9.16倍。这表明增大 r 会加剧稳态波动,降低稳定性。

2) Z 轴扫描半径 r_z (组A5-A8)的影响。 r_z 对耦合速度影响不明显(收敛时间约0.410 s),但对稳态稳定性有一定影响。最大半径(A8组)的 σ 和PV值分别约为最小半径(A5组)的2.13倍和1.25倍。 r_z 的影响程度弱于 r 。

3)章动步长 d (组A9-A12)的影响。增大 d 可显著提升耦合速度:A10组的收敛时间约为A9组的0.525倍。然而,该增益效果随步长增大而递减,A12组的速度仅提升至A10组的0.904倍。此外,过大的步长会显著恶化系统的稳态稳定性,最大步长(A12组)的 σ 和PV值分别约为最小步长(A9组)的3.42倍和3.17倍。

4) Z 轴扫描步长 d_z (组A13-A16)的影响。 d_z 对耦合速度的影响规律与 d 类似:A14组的收敛时间为A13组的0.501倍,而A16组仅约为A14组的0.741倍。但 d_z 对稳态稳定性的影响较小,最大步长组(A16)的 σ 和PV值分别仅约为最小组(A13)的1.13倍和1.11倍。

综上所述,固定章动参数难以同时兼顾收敛速度、稳态精度与平稳性,只能单一偏向速度或精度,存在固有性能取舍。

1.4 动态扰动下算法性能验证

在静态偏差基础上,于 X/Y 方向施加50 μrad 的正弦扰动,分别设置1、2 Hz这2种扰动频率。多组(B1~B8)典型章动参数选取如表2所示,动态扰动下的校正效果如表3所示。仿真结果表明,三维章动算法具备抑制动态扰动的能力,但校正效果与参数设置密切相关。结合表2与表3对比,具体分析如下:

1)章动半径 r 的影响: r 对算法抗干扰能力影响显著。在2 Hz扰动下,较小的 r 可能导致收敛失败。以组B1、B3($r=0.2$)为例,二者均未能有效抑制扰动,校正后能量波动反而大于未校正状态,出现扰动放大现象;而组B2、B4($r=0.6$)的标准差 σ 较未校正状态有所降低。这表明适当增大 r 有助于提升抗干扰能力。

2) Z 轴扫描半径 r_z 的影响: r_z 对算法抗干扰能力及稳态稳定性几乎无影响。对比仅改变 r_z 的B1组与B3,在1 Hz和2 Hz扰动下,两者的抑制效果与稳态表

表1 静态偏差下的校正结果

实验组	$r/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$r_z/\mu\text{m}$	$d_z/\mu\text{m}$	PV值	η	σ	收敛时间/s
A1	0.2	0.8	8	12	0.016 0	0.803 4	0.004 5	0.414
A2	0.5	0.8	8	12	0.059 0	0.798 8	0.011 2	0.413
A3	0.8	0.8	8	12	0.083 9	0.797 1	0.013 6	0.408
A4	1.2	0.8	8	12	0.146 6	0.783 4	0.026 2	0.409
A5	0.45	0.3	2	12	0.027 5	0.803 2	0.005 4	0.413
A6	0.45	1.6	8	12	0.027 5	0.802 7	0.005 6	0.410
A7	0.45	0.8	14	12	0.036 8	0.798 7	0.008 3	0.412
A8	0.45	0.8	20	24	0.034 5	0.799 4	0.011 5	0.409
A9	0.45	0.3	8	12	0.018 1	0.806 5	0.003 3	0.855
A10	0.45	0.6	8	12	0.016 0	0.805 1	0.003 5	0.449
A11	0.45	0.9	8	12	0.023 2	0.801 2	0.004 2	0.410
A12	0.45	1.6	8	12	0.057 3	0.787 8	0.011 3	0.406
A13	0.45	0.8	8	6	0.031 1	0.802 2	0.005 3	0.816
A14	0.45	0.8	8	12	0.027 5	0.802 7	0.005 6	0.409
A15	0.45	0.8	8	18	0.030 0	0.801 5	0.005 6	0.303
A16	0.45	0.8	8	24	0.034 5	0.799 4	0.006 0	0.303

表2 章动参数选取

实验组	$r/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$r_z/\mu\text{m}$	$d_z/\mu\text{m}$
B1	0.2	1.2	3	12
B2	0.6	1.2	3	12
B3	0.2	1.2	12	12
B4	0.6	1.2	12	12
B5	0.45	0.6	8	8
B6	0.45	1.5	8	8
B7	0.45	0.6	8	16
B8	0.45	1.5	8	16

表3 动态扰动下的校正效果

实验组	频率为 1 Hz			频率为 2 Hz		
	η	σ	PV 值	η	σ	PV 值
B1	0.792 7	0.015 3	0.088 5	0.616 0	0.232 6	0.751 1
B2	0.793 9	0.012 8	0.099 7	0.695 4	0.066 1	0.339 5
B3	0.791 4	0.015 4	0.089 9	0.603 1	0.234 7	0.737 7
B4	0.792 8	0.012 5	0.095 7	0.668 8	0.078 0	0.374 8
B5	0.719 6	0.059 3	0.260 1	0.632 5	0.085 7	0.364 9
B6	0.786 7	0.017 2	0.112 7	0.695 8	0.061 0	0.316 8
B7	0.727 2	0.057 1	0.248 1	0.674 6	0.085 9	0.362 9
B8	0.786 9	0.017 7	0.110 6	0.726 9	0.059 0	0.278 5
未校正	0.659 5	0.103 3	0.317 2	0.659 5	0.103 3	0.317 2

现基本一致。

3)章动步长 d 的影响: d 对抗干扰能力影响较大。对比仅改变 d 的组B5与B6,在1 Hz和2 Hz扰动下,步长较大的组B6相较于步长较小的组B5,其平均耦合效率 η 更高、标准差 σ 和PV值更小。B7与B8组的对比结果与此一致:步长较大的B8同样获得了更高的 η 、更小的 σ 和PV值。因此,增大 d 有助于提升抗干扰能力。

4)Z轴扫描步长 d_z 的影响: d_z 对抗干扰能力有一定促进作用,但影响程度弱于 d 。对比仅改变 d_z 的组B5与B7,步长较大的B7组在平均耦合效率 η 、标准差 σ 、PV值上的提升有限,仅略有改善。

综上所述,同一组固定参数无法同时适配低频、高频2类扰动工况,难以适应复杂动态环境。

2 基于BP神经网络的参数自调节三维光纤章动耦合算法设计

传统三维光纤章动耦合算法依赖人工预设固定

参数,在静态偏差与动态扰动共存的复杂工况下,难以同时兼顾收敛速度、稳态精度与抗干扰能力。针对该问题,本文将BP神经网络^[22-23]的非线性自适应决策能力与三维章动搜索机制相结合,构建一种参数自调节的三维光纤章动算法。该算法根据实时耦合功率及其变化趋势自主决策最优章动参数,突破固定参数工况适配性差的局限,实现全工况下高精度、高稳定性光纤耦合。

2.1 BP神经网络参数自调节策略设计

2.1.1 网络结构与训练流程

BP神经网络通过误差正向传播与反向迭代优化,具备优秀的非线性映射与自适应决策能力,可有效拟合耦合状态与最优章动参数间的关联规律。本文所建网络由输入层、隐藏层、输出层构成,结构如图2所示。信号由输入层接收后,经隐藏层加权运算与非线性变换,由输出层给出章动参数预测值;当输出与期望目标存在偏差时,误差信号沿原通路反向传播,逐层调整层间权值与节点阈值,使网络输出不断逼近最优控制参数。

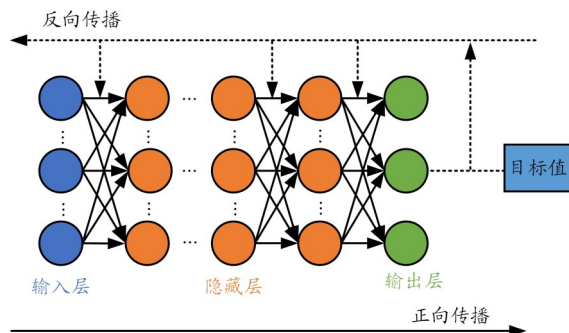


图2 BP神经网络基本结构图

输入层:该层中的实时耦合光功率 P 及其功率变化率 P_t ,用于直接反映系统当前的对准状态与扰动强度。

隐藏层:承担非线性特征的提取与映射功能。

输出层:该层覆盖三维章动全部关键参数,分别为章动半径 r ,章动步长 d ,Z方向扫描半径 r_z ,Z方向扫描步长 d_z 。

网络采用双极性 Sigmoid 激活函数,以 Levenberg-Marquardt 算法完成训练,均方误差(MSE)设为 10^{-6} ,最大迭代次数设置为10 000次。

2.1.2 自调节策略与样本构建

为实现粗对准快速收敛、精对准高稳耦合,网络采用分级自适应调参逻辑:

1)低功率阶段:采用较大章动半径与步长,提升

李术强,吕福睿,刘作禹,等:基于BP神经网络的参数自调节三维光纤章动算法

搜索速度,快速逼近最优耦合点;

2)高功率阶段:采用较小章动半径与步长,降低功率波动,提升稳态精度;

3)动态扰动阶段:根据功率变化率自适应调参,增强抗扰与跟踪能力。

本文以三维章动算法仿真数据为基础,采集耦合光功率、功率变化率作为输入样本,以对应工况下最优章动参数作为输出标签,完成网络离线训练。共构建2 000组样本,按8:2比例划分为训练集与测试集;训练收敛后将网络嵌入耦合闭环控制系统,在线实时整定4项章动参数,实现参数自适应调节。

2.2 静态偏差下算法性能验证

同样在横向偏差为5 μm 、轴向偏差为150 μm 的典型静态偏差条件下,本文开展仿真实验,将所提算法与3组(C1~C3)典型固定参数三维章动算法、SPGD算法进行对比,结果如表5和图3所示。由于SPGD算法不属于章动算法体系,表5中仅3组固定参数三维章动算法配置了具体章动参数;图3插图为稳态区间局部放大图。

由表5和图3可知,相较于3组固定参数章动算法与SPGD算法,本文算法无需预设固定章动参数,可依据工况在线自适应调整,偏差校正综合性能提升显著。具体性能优势体现在以下2个方面:

1)稳态精度和稳态平均耦合效率提升:系统收敛至稳态后,本文算法较3组固定参数三维章动算法稳态精度提升幅度为19.51%~67%,平均耦合效率 η 优于各固定参数算法及SPGD算法,稳态性能最优。

2)耦合速度提升:所提算法的耦合收敛时间相较于3组固定参数算法减少了11.94%~53.32%,相比SPGD算法耦合速度提升了13.4%。

此外,从图3可以看出,本文算法耦合效率上升斜率更大、收敛更快,稳态阶段波动更小、稳定性更优;3组固定参数三维章动算法收敛速度与稳态平稳性存

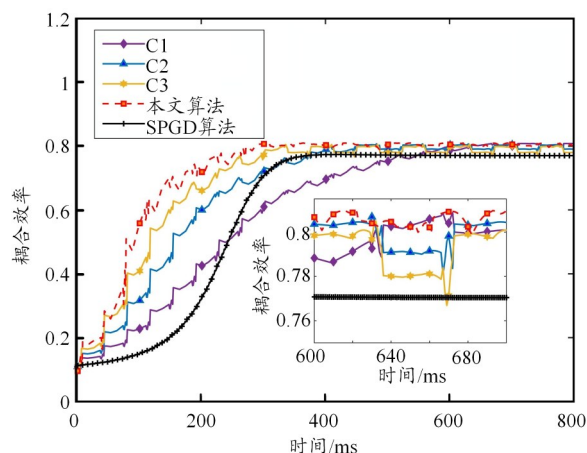


图3 静态偏差下的校正效果

在明显取舍,SPGD算法整体收敛特性和稳态耦合效果均偏弱。

2.3 动态扰动下算法性能验证

同样在相同静态偏差基础上,于X/Y方向施加50 μrad 正弦扰动,分别选取1、2 Hz这2种扰动频率。结合1.4节参数影响规律,选取D1~D4这4组典型固定章动参数(如表6所示),并开展多算法动态对比仿真,结果如图4、图5所示。可以看出,图4、图5整体变化趋势相近,但稳态阶段波动幅度存在明显区别:2 Hz高频扰动下,所有算法的效率波动均大于1 Hz低频工况。固定参数算法仅能适配单一频率扰动,而本文算法在2种扰动频率下,均保持更小的波动与更高的耦合效率,宽频适应性更优。

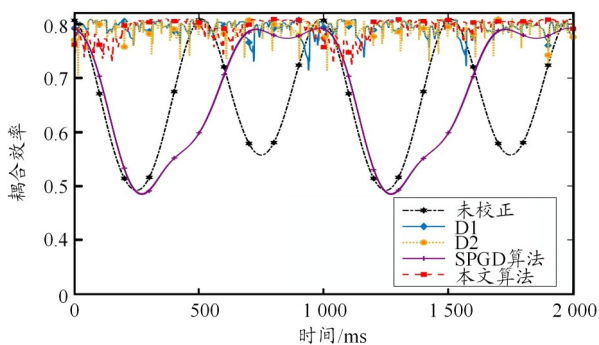
BP神经网络参数自调节耦合系统在不同频率扰动下均表现出优于固定参数章动耦合的性能。在PV值为50 μrad 、频率分别为1 Hz和2 Hz的正弦扰动下,系统达到稳态后,对光功率计采集的耦合功率数据进行统计计算,得到的性能指标如下:平均耦合效率 η 分别为0.803 6和0.783 8,标准差 σ 分别为0.005 1和0.019 9,PV值分别为0.040 5、0.143 0。上述结果表

表5 静态偏差下的校正效果

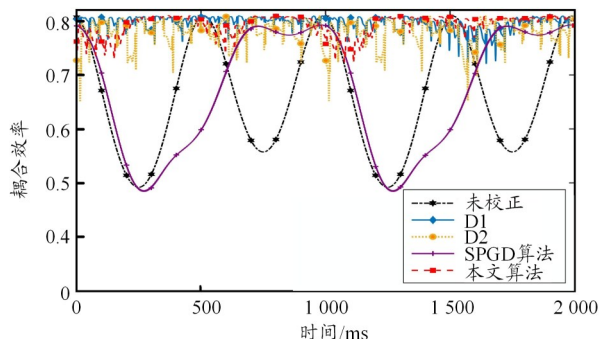
实验组	$r/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$r_z/\mu\text{m}$	$d_z/\mu\text{m}$	PV	η	σ	收敛时间/s
C1	0.2	0.8	2	8	0.015 1	0.803 7	0.004 1	0.632
C2	0.2	1.2	2	12	0.025 7	0.797 5	0.006 8	0.408
C3	0.2	1.6	2	16	0.038 1	0.789 9	0.010 0	0.335
SPGD算法	-	-	-	-	0.000 4	0.770 5	0.000 1	0.341
本文算法	-	-	-	-	0.015 0	0.805 1	0.003 3	0.295

表6 章动参数选取

实验组	$r/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$r_z/\mu\text{m}$	$d_z/\mu\text{m}$
D1	0.2	1.2	10	12
D2	0.6	1.2	10	12
D3	0.45	0.8	10	8
D4	0.45	1.6	10	16

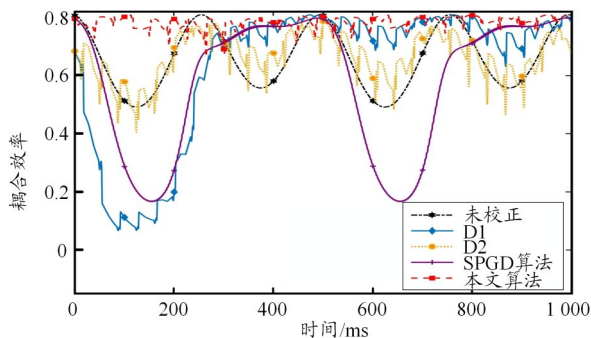


(a) 全过程曲线

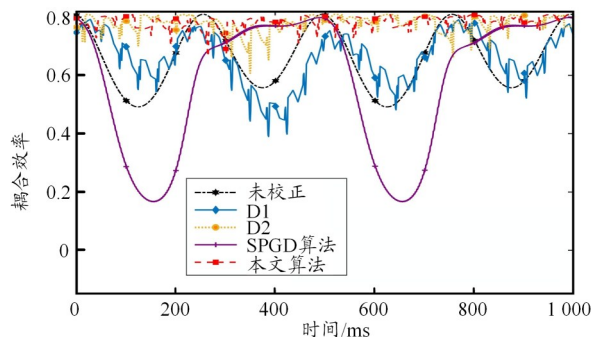


(b) 稳态区域放大图

图4 1 Hz正弦扰动下各算法耦合效率曲线



(a) 全过程曲线



(b) 稳态区域放大图

图5 2 Hz正弦扰动下各算法耦合效率曲线

明,该自调节系统在不同扰动频率下均能保持较高的耦合效率和稳态精度。

3 结束语

针对FSOC光纤耦合易受位置偏差与动态扰动干扰、耦合效率稳定性差的问题,本文首先研究了三维光纤章动耦合算法。仿真表明,该算法可补偿对准偏差,但固定参数无法适配复杂工况,且耦合速度与稳态精度受限。

为此,本文结合BP神经网络构建参数自调节章动耦合算法,以耦合光功率及功率变化率为输入,自适应输出最优控制参数,实现多工况下综合性能优化。仿真结果显示:静态偏差工况中,本文算法相较固定参数算法,稳态精度提升19.51%~67%,耦合速度提升11.94%~53.32%,平均耦合效率达0.805 1,收敛时间为0.295 s,整体性能优于固定参数算法与SPGD算法;在1、2 Hz动态扰动下,该算法依旧保持最优耦合效率与稳态精度,克服了传统算法仅适配单一扰动频率的缺陷。本文算法可在静态偏差与宽频扰动场景下完成偏差校正,有效提升系统鲁棒性与环境适应性,可为空间光-单模光纤高精度耦合的工程应用提供参考。

参考文献:

- [1] Kolev D R, Casado A C, Trinh P V, et al. Latest developments in the field of optical communications for small satellites and beyond[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(12): 3750-3757.
- [2] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [3] 石卓灵,蒋大钢,牛梦晨,等. 大气光通信链路综合仿真方法研究[J]. 光通信技术, 2026, 50(1): 33-41.
- [4] 尹幸,姚海峰,刘智,等. 基于指向误差与不同噪声的星地激光通信系统误码性能分析[J]. 光通信技术, 2023, 47(3): 31-36.
- [5] 李进,赵辉,马薇雯,等. 自由空间光通信中的光广义正交空间调制技术[J]. 光通信技术, 2023, 47(3): 23-30.
- [6] 刘作禹,刘章宸,吕福睿,等. 四象限探测器高精度光斑位置检测技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(13): 1-35.
- [7] 刘永凯. 大气湍流对单模光纤耦合效率影响的理论分析与实验研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
- [8] 宋佳雪,陈纯毅,姚海峰,等. 湍流扰动单模光纤耦合效率概率分布研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 140-147.
- [9] Swanson E A, Bondurant R S. Using fiber optics to simplify free-space lasercom systems[J]. Free-Space Laser Communication Technologies II. SPIE, 1990, 1218: 70-82.

李术强,吕福睿,刘作禹,等:基于BP神经网络的参数自调节三维光纤章动算法

- [10] Li Bo, Liu Yuting, Tong Shoufeng, et al. Adaptive single-mode fiber coupling method based on coarse-fine laser nutation[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 1-12.
- [11] Li Ziqiang, Pan Ziting, Li Yuting, et al. Parameter-free fiber coupling method for inter-satellite laser communications based on Gaussian approximation[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2024, 16(3): 258-269.
- [12] 郭烽,高世杰,刘永凯,等. 基于模糊控制的参数自调节光纤章动耦合算法[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(17): 1706009.
- [13] Peng Bo, Ruan Ping, Han Junfeng, et al. Design and simulation analysis of piezoelectric ceramic tube-based fiber optic nutator applied to an intersatellite laser communication system[J]. Photonics, 2023, 10(7): 769.
- [14] Pan Ziting, Li Ziqiang, Li Yuting. et al. Experimental demonstration of free-space optical communication under 2 km urban atmosphere using adaptive fiber coupling[J]. Optics Communications, 2025, 576: 131151.
- [15] 曹桂源,杨玉强,俞建杰,等. 温度对空间光-单模光纤耦合的影响研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 65-70.
- [16] 况耀武,何志平,徐卫明,等. 收发共光路单模光纤耦合光学系统研究[J]. 半导体光电, 2019, 40(2): 206-210, 230.
- [17] 任兰旭,张缓缓,薛婧婧,等. 温度场对空间光到单模光纤耦合效率影响分析[J]. 空间电子技术, 2021, 18(5): 88-93.
- [18] 陈海涛,杨华军,李拓辉,等. 光纤偏移对空间光-单模光纤耦合效率的影响[J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 75-78.
- [19] 吴加丽,柯熙政,杨尚君,等. 多维耦合器校正空间光-单模光纤耦合对准误差[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 40-50.
- [20] 朱世伟. 基于能量反馈的单模光纤耦合算法研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
- [21] 赵卓,湛明,刘向南,等. 降低随机振动对卫星激光通信光纤耦合影响的补偿算法[J]. 光通信技术, 2020, 44(12): 47-51.
- [22] Liu Luyao, Liu Diran, Sun Qie, et al. Forecasting power output of photovoltaic system using a BP network method[J]. Energy Procedia, 2017, 142: 780-786.
- [23] Li Jichao, Zhao Danling, Ge Bingfeng, et al. A link prediction method for heterogeneous networks based on BP neural network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 495: 1-17.