

激光与光电子学进展

基于模糊控制的参数自调节光纤章动耦合算法

郭峰^{1,2}, 高世杰^{1*}, 刘永凯^{1*}, 吴昊¹, 吕福睿^{1,2}¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对空间激光通信单模光纤耦合系统中,传统激光章动算法参数固定,导致系统收敛速度与收敛稳定性无法兼得的问题,提出了一种基于模糊控制的参数自调节光纤章动耦合算法。该算法以快速反射镜(Fast steering mirror, FSM)为执行单元,根据实时耦合能量反馈值,在激光章动收敛过程中自调节算法参数,以提升系统的收敛速度与稳态精度。仿真结果表明:在无扰动条件下,参数自调节章动耦合算法的耦合效率、耦合精度、耦合速度均优于传统激光章动算法;在有扰动条件下,传统激光章动算法仅对一定条件下的扰动具有较好的抑制效果,参数自调节章动耦合算法对于1~20 Hz的扰动均有着较好的抑制效果,并且在耦合效率及耦合稳定性方面有着明显优势,更加适合应用于激光通信链路。

关键词 自由空间光通信; 单模光纤耦合; 激光章动; 模糊控制; 参数自调节

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232618

Parameter Self-Adjusting Nutation Fiber Coupling Algorithm Based on Fuzzy Control

Guo Feng^{1,2}, Gao Shijie^{1**}, Liu Yongkai^{1*}, Wu Hao¹, Lü Furui^{1,2}¹*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, Jilin, China;*²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract In the single mode fiber coupling system of space laser communication, the parameters of the traditional laser nutation algorithm are fixed, which leads to the problem that the system convergence speed and convergence stability cannot be achieved at the same time. Therefore, a parameter self-adjusting nutation fiber coupling algorithm based on fuzzy control is proposed. The proposed algorithm uses a fast steering mirror (FSM) as the execution unit. According to real-time coupling energy feedback, the algorithm parameters are self-adjusted during the process of laser nutation convergence to improve the convergence speed and steady-state accuracy of the system. The simulation results show that the coupling efficiency, coupling precision and coupling speed of the parameter self-adjusting nutation coupling algorithm are better than those of the traditional laser nutation algorithm under the condition of no disturbance. Under the condition of disturbance, the traditional laser nutation algorithm only has a good suppression effect on the disturbance under certain conditions. However, the parameters of the self-adjusting nutation coupling algorithm have a good suppression effect on disturbances of 1–20 Hz, and the proposed method displays obvious advantages in terms of coupling efficiency and coupling stability. Hence, the proposed method is more suitable for application in laser communication links.

Key words free-space optical communication; single-mode fiber coupling; laser nutation; fuzzy control; parameter self-adjusting

1 引言

空间激光通信是一种利用激光作为载波进行通信的技术^[1],相较于传统的微波通信,具有数据传输速率

快、体积小、功耗低、保密性好和抗干扰能力强等优势。因此,激光通信技术拥有极强的应用潜力,适用于机载、星载、舰载以及地面等终端^[2-6]。

单模光纤耦合决定了激光信号的传输质量和效

收稿日期: 2023-12-05; 修回日期: 2024-01-15; 录用日期: 2024-02-05; 网络首发日期: 2024-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(11973041)

通信作者: **13604329504@163.com; *liuyk@ciomp.ac.cn

率^[7],是激光通信系统中关键技术之一。光纤耦合系统主要使用位置反馈型和能量反馈型传感器。位置反馈型传感器如四象限探测器(Quadrant detector, QD)、位置敏感探测器(Position sensitive detector, PSD)以及电荷耦合元件(Charge coupled device, CCD)在实际应用中仍会受到应力释放、温度变化和平台振动等因素的影响,导致传感器对光斑定位发生偏移。能量反馈型传感器只以耦合进入光纤的能量为反馈量,受环境影响因素小,算法复杂度低,可靠性强^[8]。

目前以能量为反馈量的光纤耦合系统都以快速反射镜(FSM)^[9-10]为执行机构,这些系统的差异在于所采用的算法不同。1990年,麻省理工学院的Swanson等^[11]设计了以能量为反馈量,采用谐振式光纤耦合器实现章动功能的系统,该系统的耦合效率达到了63%。2016年,中国科学院上海光学精密机械研究所的高建秋等^[12]在国内首次提出激光章动算法的概念,通过控制激光在单模光纤端面上作圆形扫描,根据光电探测器输出电压的变化规律求出光斑脱靶量,使系统的耦合效率提高6.5%。2019年,中国科学院长春光学精密机械研究所的朱世伟^[13]搭建了基于FSM的光纤耦合系统,在对激光章动和随机梯度下降(Stochastic pseudo-gradient descent, SPGD)两种算法的参数取值进行了详细研究后,认为对于动态扰动的校正,激光章动算法具有更高的抑制带宽。目前的研究现状表明激光章动算法是应用最为广泛的方法。然而,目前国内利用激光章动算法搭建的光纤耦合系统仍存在以下问题:1)激光章动参数(章动步长为 d ,章动半径为 r)固定导致系统收敛速度与收敛稳定性不可兼得;2)只引入理想光斑进行研究,与实际应用情况不符。针对上述两个问题,本文提出一种将模糊控制与激光章动算法结合的参数自适应调节章动耦合算法,并引入了带有残差的光斑进行了仿真分析。仿真结果表明该算法能有效提升光纤耦合系统的收敛速度和稳态精度,并且对于带有不同像差的输入光斑均有着较好的自适应调节效果。

2 单模光纤耦合原理及激光章动算法原理

2.1 单模光纤耦合原理

空间激光通信系统的链路一般为几千米至几十万千米量级,因此经过长距离传输后,到达接收终端的激光束可以视为平面波。平面光束经过透镜会聚后在焦平面上形成艾里斑,若要耦合进入单模光纤的光功率值达到最大,则需要艾里斑中心与单模光纤的模场中心重合。如图1所示, E_A 代表入射光瞳面A上的平面光场, E_o 是平面波通过透镜后在焦平面O上形成的光场, D 是透镜直径, ω_o 是单模光纤模场半径, f 是透镜焦距。

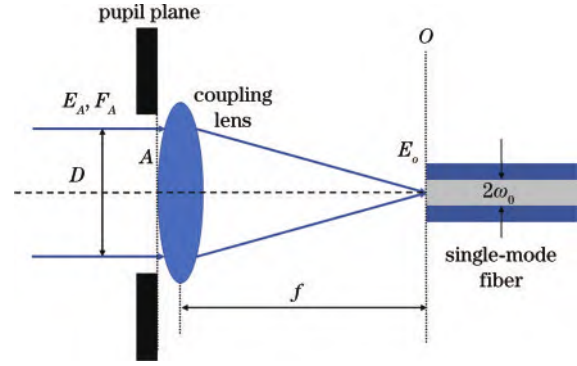


图1 单模光纤耦合原理示意图

Fig. 1 Schematic program of single-mode fiber coupling principle

空间光到单模光纤的耦合效率定义为:焦平面O上光斑 E_o 的光功率与进入到单模光纤中的光功率的比值。由于使用泽尼克多项式拟合 E_A 的波前相位较为复杂,可以根据Parseval定理,在入射光瞳面A上计算的耦合效率为^[14-15]

$$\eta = \frac{\left| \iint E_A^*(\rho, \theta) F_A(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \right|^2}{\iint |E_A(\rho, \theta)|^2 \rho d\rho d\theta \cdot \iint |F_A(\rho, \theta)|^2 \rho d\rho d\theta}, \quad (1)$$

式中: (ρ, θ) 为焦平面O上任意点的极坐标; E_A^* 为 E_A 的共轭; F_A 为单模光纤模场经后向传输后在光瞳面A上形成的后向传输模场,具体的表达式为

$$F_A(\rho, \theta) = \sqrt{\frac{2}{\pi \omega_a^2}} \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega_a^2}\right), \quad (2)$$

式中: ω_a 为后向传输模场半径,计算公式为 $\omega_a = \lambda f / \pi \omega_o$ 。入射光波为 $E_A(\rho) = E_s \exp[-j\phi(\rho, \theta)]$, E_s 为空间光振幅,是一个常数,在式(1)中,积分范围为入射光瞳面A的全有效通光孔径,则

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\left| \iint E_A^*(\rho, \theta) F_A(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \right|^2}{\iint |E_A(\rho, \theta)|^2 \rho d\rho d\theta \cdot \iint |F_A(\rho, \theta)|^2 \rho d\rho d\theta} = \\ &= \frac{\left| \iint \exp[-j\phi(\rho, \theta)] \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi \omega_a^2}} \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega_a^2}\right) \rho d\rho d\theta \right|^2}{\frac{2}{\pi^2 \rho^2 \omega_a^2} \left\{ \iint \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega_a^2}\right) \cos[\phi(\rho, \theta)] \rho d\rho d\theta \right\}^2 +} \\ &\quad \left\{ \iint \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega_a^2}\right) \sin[\phi(\rho, \theta)] \rho d\rho d\theta \right\}^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

为简化表达,将公式(3)实部的积分项定义为 α_r ,虚部的积分项定义为 α_j ,即

$$\begin{cases} \alpha_r = \iint \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega_a^2}\right) \cos[\phi(\rho, \theta)] \rho d\rho d\theta \\ \alpha_j = \iint \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega_a^2}\right) \sin[\phi(\rho, \theta)] \rho d\rho d\theta \end{cases}, \quad (4)$$

将式(4)带入公式(3)中,则有

$$\eta = \frac{2}{\pi^2 \rho^2 \omega_a^2} (\alpha_r^2 + \alpha_j^2). \quad (5)$$

根据式(5)即可求得不同波前相位情况下空间光到单模光纤的耦合效率。

2.2 激光章动算法原理

激光通信系统中,激光章动算法是一种被广泛应用的基础光纤耦合方法。该算法原理是首先利用FSM使焦平面上的光斑按一定半径进行圆周运动;然后,在每个运动周期中,系统通过功率采样来寻找具有最大功率的位置,并将其记录下来;最后,通过FSM移动扫描中心将位置调整到记录的功率最大位置,并进行下一次扫描。经过多次扫描后,系统可以最终收敛到一个全局最优的位置,从而找到最大耦合效率的位置。具体流程如下:

1) 进行初始化,设定扫描中心 (X_0, Y_0) 、章动半径 r 、章动步长 d 以及一周期内的采样点数 n 。

2) 输出控制量,计算控制量 (X'_0, Y'_0) ,具体的表达式为

$$\begin{cases} X'_0 = X_0 + r \cos(2\pi m/n) \\ Y'_0 = Y_0 + r \sin(2\pi m/n) \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $m=0, 1, \dots, n-1$ 。控制量和章动半径 r 具有相同的量纲。输出扫描一个周期的控制量,并对每个位置进行采样,记录达到最大耦合效率的位置 $(X_{\text{best}}, Y_{\text{best}})$ 以及光功率最大时的采样次数 I 。

3) 移动扫描中心,将扫描中心按照设定章动步长 d 朝着最大耦合效率的方向进行移动,得到新的扫描中心 $(X_{\text{center}}, Y_{\text{center}})$,即

$$\begin{cases} X_{\text{center}} = X_0 + d \cos[2\pi(I-1)/n] \\ Y_{\text{center}} = Y_0 + d \sin[2\pi(I-1)/n] \end{cases}. \quad (7)$$

4) 重复2)~3),其中式(6)中的扫描中心为式(7)计算得出新的扫描中心。

上述过程可以用图2来表示。

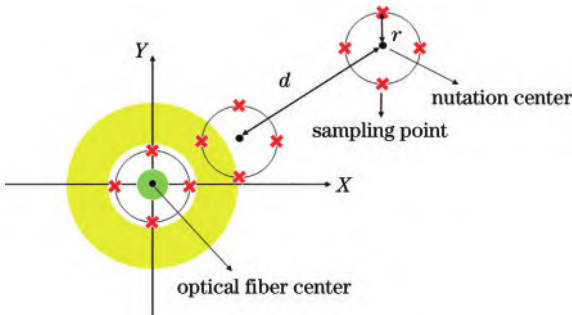


图2 激光章动算法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of laser nutation algorithm

由激光章动算法原理可知,在收敛过程中:若章动半径 r 与章动步长 d 较小,会导致收敛速度降低;若章动半径 r 与章动步长 d 较大,会导致收敛稳定性变

差。目前高校和科研机构搭建的章动耦合系统,需要综合平衡耦合效率、功率振荡的平稳性与收敛速度等方面,选择合适的章动半径以及章动步长。并且,目前国内外研究机构在验证激光章动耦合系统的耦合效率时,均采用激光器发出的理想光源作为耦合系统的输入,其波前信息不发生变化。而在实际情况中,进入耦合系统的光斑仍有一定的像差。本文将利用模糊控制算法,使章动半径 r 以及章动步长 d 自适应调节,以提升系统在有波前像差的条件下的收敛速度及稳态精度。

3 参数自调节控制器设计

3.1 参数对耦合性能的影响

对单模光纤激光章动算法的过程进行仿真,分析激光章动参数值的选取对耦合性能的影响。设定激光波长 λ 为1550 nm,耦合透镜等效焦距 f 为710 mm,透镜直径 D 为15 cm。经计算艾里斑直径约为18 μm ,单模光纤直径一般为10 μm ,这些参数能使仿真结果符合实际应用。给定单模光纤中心与艾里斑中心偏差为5 μm ,章动步长 d 固定为1.2 μm ,切换章动半径 r 为0.8、1.2、1.6、2.0 μm 进行仿真。仿真结果如图3所示。

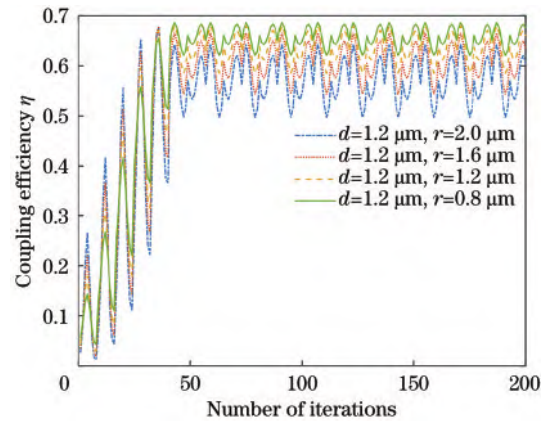


图3 章动半径 r 对耦合效率的影响

Fig. 3 Effect of nutation radius r on coupling efficiency

给定单模光纤中心与艾里斑中心偏差为5 μm ,章动半径 r 固定为0.3 μm ,切换章动步长 d 为0.4、0.8、1.2、1.4 μm 进行仿真。仿真结果如图4所示。

由仿真分析的结果可以得知:章动半径 r 对于系统稳态精度影响较大,章动半径 r 增加,系统稳态震荡明显增加;章动步长 d 对于耦合的快速性影响较大,步长 d 增加,到达稳态需要迭代的次数明显减少。通过上述研究,本文在设计参数自调节控制器时进行如下考虑:

1) 在激光章动初始阶段,即功率较低以及功率变化率较小时,采用较大章动半径结合大章动步长,防止因为抖动导致无法接收光斑。

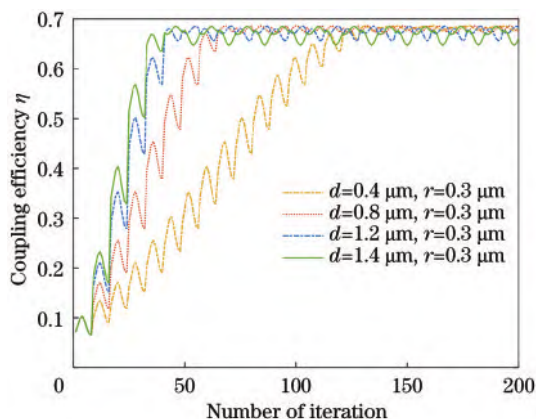


图4 章动步长 d 对耦合效率的影响

Fig. 4 Effect of nutation step length d on coupling efficiency

2) 在激光章动中期阶段,即功率中等以及功率变化率较大时,采用中等章动半径结合中等章动步长,防止局部最优影响,调节光斑快速向艾里斑移动。

3) 在激光章动稳态阶段,即功率较高以及功率变化率基本稳定时,采用较小章动半径结合较小章动步长,提升系统的稳态精度,保持持续修正能力。

3.2 模糊控制器设计

模糊控制是一种基于模糊逻辑的控制方法,它能够应对非线性、不确定性和模糊性较强的系统^[16]。由激光章动算法仅以实时耦合能量为反馈量可以得到,实时耦合能量 P 及能量变化率 P_t 与模糊控制自调节算法依据偏差 E 和偏差变化率 E_c 调节参数相适应^[17-18]。结合对激光章动耦合系统响应速度快、抗干扰能力强等要求,以及系统自身硬件的特点,模糊控制自调节算法较为适用。模糊控制系统主要有三个步骤:模糊化、模糊推理和解模糊化。

3.2.1 模糊化

模糊化步骤包括确定模糊论域、模糊集合和隶属度函数。

引理 1^[19]:若对论域 U 中的任一元素 x ,都有一个数 $\mu_A(x) \in [0, 1]$ 与之对应,则称集合 A 为 U 上的模糊集, $\mu_A(x)$ 为 x 相对于 A 的隶属度,具体可表示为

$$A = \{\mu_A(x) | x \in U\}, \quad (8)$$

式中:隶属度 $A(x)$ 越接近于 1,表示 x 属于 A 的程度越高;隶属度 $A(x)$ 越接近于 0,表示 x 属于 A 的程度越低。

根据引理 1,本文选取耦合能量 P ,能量变化率 P_t 的模糊论域为 $(0, 0.8)$, $(-0.15, 0.30)$;章动半径 r ,章动步长 d 的模糊论域为 $(0, 0.8)$, $(0, 1.8)$,所对应的模糊集合 $P = \{S, M, L\}$,表示 {小,中,大}; $P_t = \{S, L\}$,表示 {小,大}; $r, d = \{VS, S, M, L, XL\}$,表示 {非常小,小,中等,大,非常大}。

典型的隶属度函数有如高斯型、S 形、梯形以及三角形等。三角形函数的形状可以通过其斜率来描述,其计算简洁并便于在线调节。因此,本文选择使用三

角形隶属度函数。

3.2.2 模糊推理

模糊推理表示根据模糊规则和模糊化的能量值以及能量变化率进行模糊推理,确定输出控制行为。根据章节 2.1 的结论,定制模糊规则,具体内容如表 1 所示。

表 1 模糊规则

Table 1 Fuzzy rules

Control parameter	P_t	P		
		S	M	L
r	S	XL	M	VS
	L	L	M	S
d	S	XL	M	VS
	L	L	M	S

3.2.3 解模糊化

本文采取重心法将模糊量转化为隶属度函数输出结果,即取隶属度函数曲线与横坐标轴所围成图形的重心为最终输出值。以章动半径 r 为例,输出章动半径 r 为

$$r = \frac{\int_0^{0.8} r \cdot \mu(r) dr}{\int_0^{0.8} \mu(r) dr}, \quad (9)$$

式中: $\mu(r)$ 为 r 的隶属度。 $\mu(r)$ 具体可表示为

$$\mu(r) = \begin{cases} 0 & r < a \\ (r-a)/(b-a) & a \leq r < b \\ (c-r)/(c-b) & b \leq r < c \\ 0 & r \geq c \end{cases} \quad (10)$$

式中: a, c 分别为三角形隶属函数的底部端点横坐标; b 为三角形的顶部横坐标。根据解模糊化结果得出的参数,代入式 (6)~(7) 中,进行下一周期的章动迭代。

4 仿真实验

为验证提出的基于模糊控制的参数自调节章动耦合算法性能,利用 MATLAB 进行仿真实验,与传统的章动耦合算法进行对比验证,仿真实验原理图如图 5 所示。

激光器产生的光束由发射透镜发出后,经扰动 FSM 和耦合 FSM 反射两次,重新由耦合透镜聚焦耦合进入单模光纤中,扰动 FSM 的作用是引入一定规律的扰动,而耦合 FSM 由控制器控制对扰动进行补偿,保证耦合效率。光功率计对耦合进单模光纤的激光进行测量,作为反馈输入至控制器中,经控制器计算后输出控制量至驱动器,由驱动器驱动耦合镜对扰动进行补偿。根据实验室星地激光通信系统实际参数,在仿真过程中设定系统参数如表 2 所示。

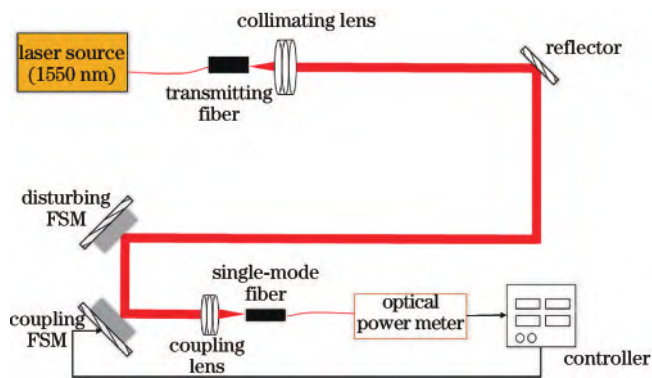


图 5 仿真实验原理图

Fig. 5 Simulation experiment schematic diagram

表 2 耦合系统参数设定

Table 2 Coupling system parameter setting

Parameter type	Value
Light wavelength λ /nm	1550
Coupled lens focal length f /mm	710
Optical fiber mode field radius ω_0 / μm	5.2
Coupling lens diameter D /cm	0.15

4.1 无扰动情况下控制器性能验证

在无扰动情况下,取实验室多次星地激光通信实验中波前校正后的波前残差结果的前 24 项泽尼克多项式系数构造模拟畸变波前,通过改变泽尼克多项式中的倾斜项来等效模拟 FSM 的校正,计算迭代优化的模拟波前的耦合效率。引入光斑的相位分布图如图 6 所示,在光纤端面不同位置对应的耦合效率分布图如图 7 所示。

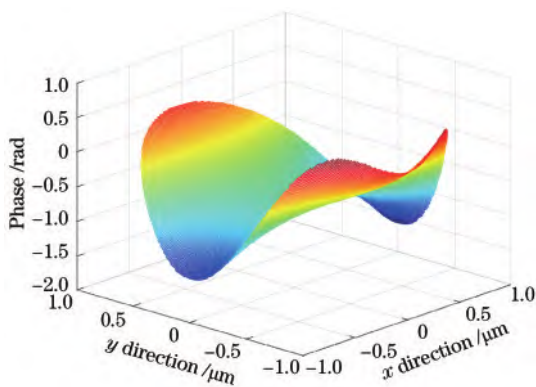


图 6 引入光斑的相位分布图

Fig. 6 Phase distribution map of introducing optical spot

2019 年,哈尔滨工业大学的李昊^[20]在多次仿真实验后得出结论:在参数选取过程中,当章动半径 r 适当小于章动步长 d 时,耦合效果更佳,本文参考了文献[12]和[20-22]提出的参数选择方法后,选取 3 组传统激光章动控制器与参数自调节控制器进行耦合效果对比,计算到达稳态后的平均耦合效率 η 、标准差 σ 、收敛次数。统计结果如表 3 所示。

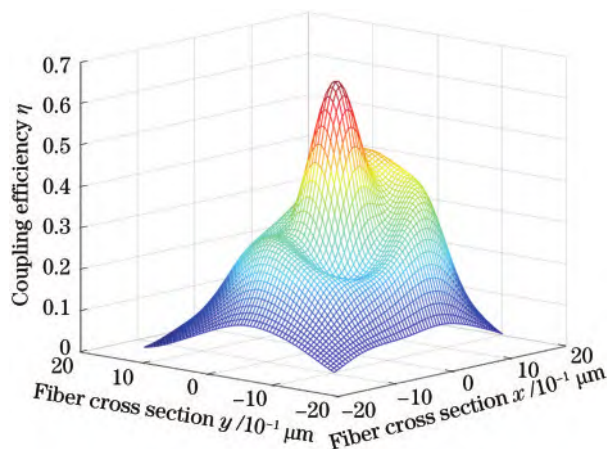


图 7 光纤端面耦合效率分布图

Fig. 7 Distribution map of fiber end face coupling efficiency

表 3 无扰动下耦合性能对比

Table 3 Comparison of coupling performance without disturbance

Combined parameter selection / μm	Coupling efficiency η	Standard deviation σ	Number of iteration
$r=0.25, d=0.60$	0.681	0.0043	89
$r=0.20, d=0.50$	0.683	0.0020	105
$r=0.15, d=0.40$	0.685	0.0019	130
Proposed	0.687	0.0001	81

仿真结果如图 8 所示。综合仿真结果可知,基于模糊控制的参数自调节章动耦合算法相较于传统章动耦合算法在耦合性能方面有明显提高,表现为以下几个方面:

- 1) 耦合效率提升,对准精度高。在稳态情况下,参数自调节章动耦合算法的平均耦合效率最高为 0.687,并且标准差最小为 0.0001。
- 2) 耦合速度提升,参数自调节章动耦合算法达到稳态的迭代次数为最少的 81 次。

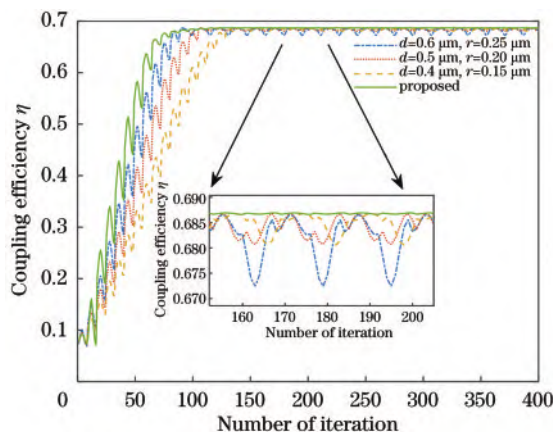


图 8 无扰动耦合性能对比

Fig. 8 Comparison of coupling efficiency without disturbance

由上述两方面可知:在无扰动情况下,参数自调节章动耦合算法的耦合效率、耦合精度、耦合速度均优于

传统激光章动耦合算法。

4.2 有扰动情况下控制器性能验证

对于光纤耦合系统而言,由于在实际应用环境中扰动多为动态扰动,所以系统对动态扰动的抑制能力比对静态误差的校正能力更为重要。实验中引入频率在 1~20 Hz 范围内,峰峰值设置为 20 μrad 的正弦扰动,比较参数自调节章动耦合算法和传统激光章动耦合算法的耦合性能。

参考了文献[13]和[23-25]的参数选择思路,选取了在扰动条件下耦合效果较好的 8 组传统激光章动控制器参数,与参数自调节控制器进行扰动状态下耦合效果对比。8 组控制器的参数设定如表 4 所示。

实验结果由图 9~12 的一系列图形曲线表示,为方便比较,将同一频率下参数自调节章动耦合算法和传统激光章动耦合算法的耦合效率,及未校正的耦合效率曲线放在同一张图中,横坐标为时间。

图 9~12 分别为 1、5、10、15 Hz 扰动下参数自调节章动耦合算法和传统激光章动耦合算法的耦合性能对比,在未校正状态下,耦合效率波动为 0.807。从

表 4 耦合效果较好的 8 组传统控制器参数

Table 4 8 sets of controller parameters with good coupling effect

Parameter group	Controller parameter / μm
4	$d=0.80, r=0.50$
5	$d=1.00, r=0.50$
6	$d=1.20, r=0.60$
7	$d=1.40, r=0.60$
8	$d=1.60, r=0.70$
9	$d=1.80, r=0.70$
10	$d=2.00, r=0.80$
11	$d=2.20, r=0.80$

图 9~12 中可以看出,对比传统激光章动算法,参数自调节章动耦合算法对 4 种频率的扰动均有着最好的抑制效果。

将 1~20 Hz 的扰动分为低频扰动(1~5 Hz)、中频扰动(5~15 Hz)、高频扰动(15~20 Hz),分别统计 3 种频率状态扰动、不同带宽下,参数自调节章动耦合算法以及 8 组不同参数的传统激光章动耦合算法到达稳态后的平均耦合效率 η 以及标准差 σ ,统计结果如表 5 所示。

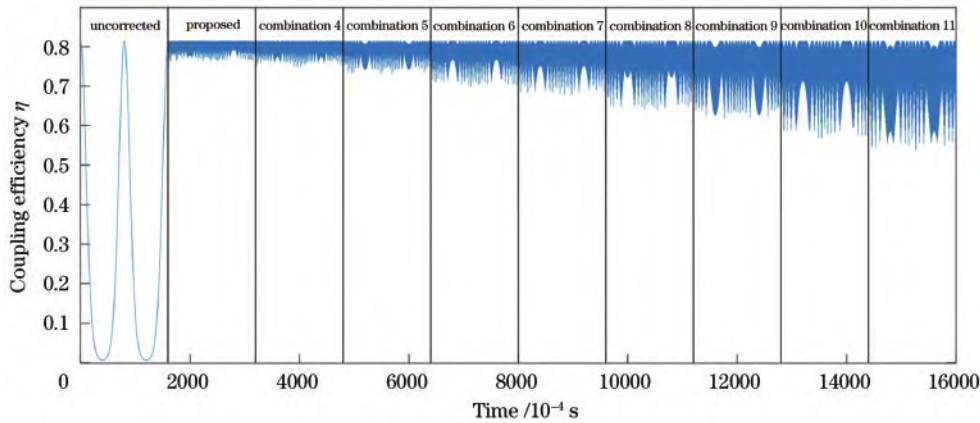


图 9 1 Hz 扰动下耦合性能对比

Fig. 9 Comparison of coupling performance under 1 Hz disturbance

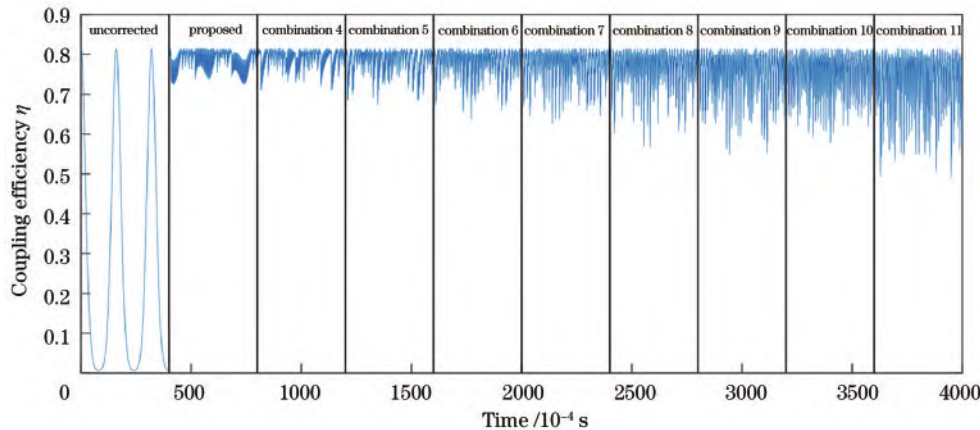


图 10 5 Hz 扰动下耦合性能对比

Fig. 10 Comparison of coupling performance under 5 Hz disturbance

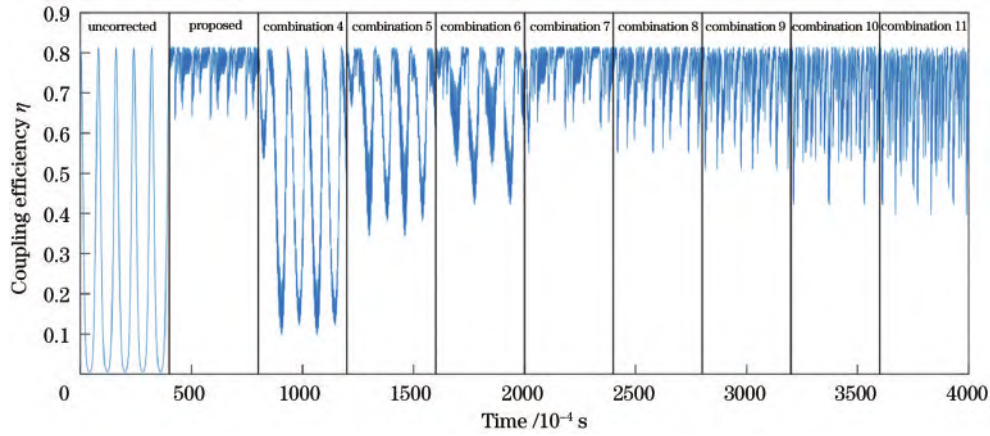


图 11 10 Hz 扰动下耦合性能对比

Fig. 11 Comparison of coupling performance under 10 Hz disturbance

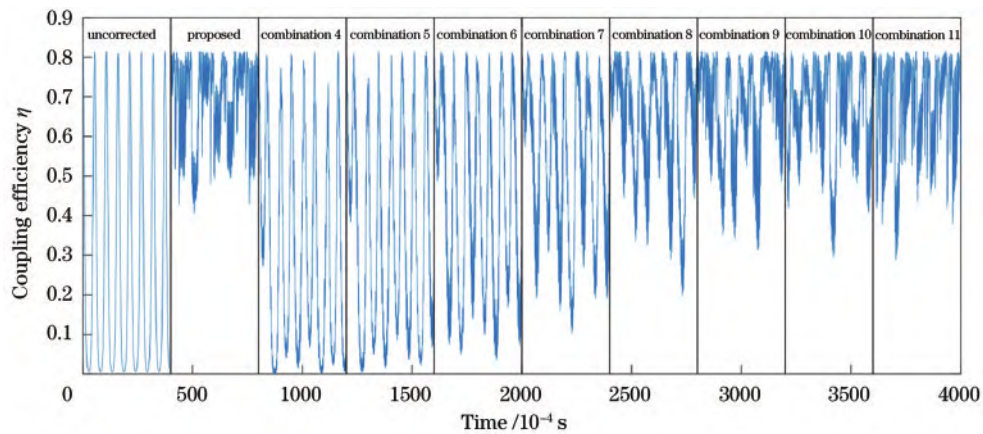


图 12 15 Hz 扰动下耦合性能对比

Fig. 12 Comparison of coupling performance under 15 Hz disturbance

表 5 不同扰动下抑制效果对比

Table 5 Inhibition effect under different disturbances

Controller	Parameter	Self-adjusting	4	5	6	7	8	9	10	11
1-5 Hz	η	0.796	0.794	0.790	0.783	0.777	0.768	0.759	0.750	0.738
	σ	0.015	0.017	0.022	0.028	0.034	0.040	0.051	0.055	0.068
5-15 Hz	η	0.729	0.496	0.591	0.648	0.699	0.718	0.721	0.715	0.704
	σ	0.080	0.193	0.150	0.124	0.094	0.085	0.085	0.091	0.101
15-20 Hz	η	0.628	0.270	0.305	0.341	0.397	0.469	0.519	0.572	0.628
	σ	0.161	0.265	0.280	0.255	0.246	0.218	0.200	0.173	0.162
Bandwidth /Hz		20	9	11	13	15	16	18	19	20

从表格 5 中可知,相较于传统激光章动算法,参数自调节章动耦合算法在耦合效率、耦合稳定性方面有着明显的优势。原因如下:

参数组 4~6 在低频扰动下耦合效率较高,标准差小,有着较好的抑制效果,但对参数组 15~20 Hz 的高频扰动基本没有抑制效果,抑制带宽低;参数组 7~8 对于中频,低频扰动有一定抑制效果,但抑制带宽仍旧偏低。参数组 9~11 对于高频扰动抑制效果较好,但对于低频扰动的抑制效果较差,耦合效率较低,耦合效率抖动大。参数自调节控制器在低频、中频、高频扰动下均有着最高的耦合效率以及最小的标准差,

扰动抑制带宽达到了 20 Hz。综上所述,与传统激光章动算法相比,参数自调节章动耦合算法有着优越的性能。

5 结 论

在分析了传统激光章动算法参数对于耦合效果的影响后,结合模糊控制算法设计了参数自调节光纤章动耦合算法,并且通过引入带有残差的光斑以及外部扰动来模拟真实情况进行仿真实验。仿真结果表明:在无干扰的情况下,参数自调节章动耦合算法在耦合效率、耦合精度以及耦合速度方面均优于传统激光章

动算法,其中耦合效率最高为 0.687,并且标准差最小为 0.0001;到达稳态时的迭代次数为最小的 81 次。在有外部扰动条件下,参数自调节光纤章动耦合算法的扰动抑制带宽达到 20 Hz,并在 1~20 Hz 的扰动下,相较于 8 组传统激光章动算法,所提算法实现了最高的耦合效率以及最小的耦合效率抖动。相较于传统激光章动算法,参数自调节章动耦合算法耦合效率最大提升幅度高达 130%,标准差最大降低幅度达到 39%,同时带宽最大提升幅度达到 120%,参数自调节光纤章动耦合算法成功解决了传统激光章动耦合算法中常见的耦合速度与稳定性的权衡难题,提升了系统对不同频率干扰抑制的稳定性,表现出更优越的性能,为激光通信系统轻量化和高精度定位提供了新的技术路径,对提高空间激光通信链路的稳定性和通信质量具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 高世杰, 吴佳彬, 刘永凯, 等. 微小卫星激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1171-1181.
Gao S J, Wu J B, Liu Y K, et al. Development status and trend of micro-satellite laser communication systems [J]. Chinese Optics, 2020, 13(6): 1171-1181.
- [2] Guimar F P, Fernandes M A, Nascimento J L, et al. Coherent free-space optical communications: opportunities and challenges[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(10): 3173-3186.
- [3] Watanabe K, Koyama T, Koga H, et al. Robotic alignment technique of search control for laser beam communication[C]//2022 61st Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers (SICE), September 6-9, 2022, Kumamoto, Japan. New York: IEEE Press, 2022: 258-263.
- [4] Khallaf H S, Uysal M. Comprehensive study on UAV-based FSO links for high-speed train backhauling[J]. Applied Optics, 2021, 60(27): 8239-8247.
- [5] Cheng Y X, Yang X Q, Zhang Y F, et al. 50 m/187.5 Mbit/s real-time underwater wireless optical communication based on optical superimposition[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(2): 020601.
- [6] Zhao L, Hao Y, Chen L, et al. High-accuracy mode recognition method in orbital angular momentum optical communication system[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(2): 020601.
- [7] 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): 0706003.
Wu J L, Ke X Z, Yang S J, et al. Correction of alignment error in coupling space light into single-mode fiber by multi-dimensional coupler[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0706003.
- [8] 高皓, 杨华军, 向劲松. 一种实现空间光-单模光纤的自动耦合方法[J]. 光电工程, 2007, 34(8): 126-129.
Gao H, Yang H J, Xiang J S. Auto-coupling method for making space light into single-mode fiber[J]. Opto-
- Electronic Engineering, 2007, 34(8): 126-129.
- [9] 刘永凯, 吕福睿, 高世杰, 等. 地基大口径望远镜动态目标跟踪中压电式快速反射镜迟滞效应的补偿[J]. 光学精密工程, 2022, 30(23): 3081-3089.
Liu Y K, Lü F R, Gao S J, et al. Compensation of hysteresis effect of piezoelectric fast steering mirror in dynamic target tracking of ground-based large aperture telescope system[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(23): 3081-3089.
- [10] 余子昊, 王栎皓, 汪洋, 等. 卫星激光通信快速反射镜研究进展及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(15): 1500003.
Yu Z H, Wang L H, Wang Y, et al. Research progress and development trend of fast steering mirror for satellite laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(15): 1500003.
- [11] Swanson E A, Bondurant R S. Using fiber optics to simplify free-space lasercom systems[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1218: 70-82.
- [12] 高建秋, 孙建锋, 李佳蔚, 等. 基于激光章动的空间光到单模光纤的耦合方法[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0801001.
Gao J Q, Sun J F, Li J W, et al. Coupling method for making space light into single-mode fiber based on laser nutation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0801001.
- [13] 朱世伟. 基于能量反馈的单模光纤耦合算法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019.
Zhu S W. Research on single mode fiber coupling algorithm based on energy feedback[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [14] Toyoshima M. Maximum fiber coupling efficiency and optimum beam size in the presence of random angular jitter for free-space laser systems and their applications[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2006, 23(9): 2246-2250.
- [15] 马烈. 大气湍流对空间光至单模光纤耦合效率概率分布影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Ma L. Study on the effect of atmospheric turbulence on the probability distribution of coupling efficiency from space light to single-mode fiber[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [16] Wang Q, Cao J D, Liu H. Adaptive fuzzy control of nonlinear systems with predefined time and accuracy[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 30(12): 5152-5165.
- [17] 欧阳鑫川, 杨博文, 万金银, 等. 基于模糊控制的自适应激光功率稳定系统研究[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0101003.
Ouyang X C, Yang B W, Wan J Y, et al. Self-adaptive laser power stabilization system based on fuzzy control[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0101003.
- [18] 刘章文, 周志强, 李正东. 基于模糊控制的波前校正技术[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 030101.
Liu Z W, Zhou Z Q, Li Z D. Wavefront correction technology based on fuzzy control[J]. Laser & Optoelectronics

Progress, 2017, 54(3): 030101.

- [19] 沈艺, 吴庆宪, 王玉惠, 等. 基于正规化设计的无人直升机的模糊非脆弱控制[J]. 电光与控制, 2020, 27(8): 12-18.
Shen Y, Wu Q X, Wang Y H, et al. Fuzzy non-fragile control of unmanned helicopter based on normalized design[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(8): 12-18.
- [20] 李昊. 卫星光通信空间光到单模光纤的双镜式自适应耦合技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Li H. Dual-mirror adaptive coupling technology from space light to single-mode fiber in satellite optical communication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [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.
Zhao Z, Chen M, Liu X N, et al. Compensation algorithm for reducing the influence of random vibration on fiber coupling in satellite laser communication[J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(12): 47-51.
- [22] 陈果, 吴浩瀚, 赵明. 基于光电探测器的激光章动定位算法[J]. 光通信技术, 2020, 44(12): 42-46.
Chen G, Wu H H, Zhao M. Laser nutation positioning algorithm based on photodetector[J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(12): 42-46.
- [23] Zhao Y, Han J F, Meng X S, et al. Research on nutation coupling method for space laser communication[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 12060: 120601G.
- [24] Li B, Liu Y T, Tong S F, et al. Adaptive single-mode fiber coupling method based on coarse-fine laser nutation [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 7909412.
- [25] Zhang L, Yu X N, Zhao B Q, et al. Method for 10 Gbps near-ground quasi-static free-space laser transmission by nutation mutual coupling[J]. Optics Express, 2022, 30(19): 33465-33478.