

降低随机振动对卫星激光通信光纤耦合影响的补偿算法

赵卓, 谌明, 刘向南*, 杨成武, 李晓亮

(北京遥测技术研究所, 北京 100094)

摘要: 为了补偿卫星平台随机振动引起的空间光-单模光纤耦合效率损失, 对比分析了基于章动算法和随机并行梯度下降 (SPGD) 算法的参数选取对算法稳定性和收敛速度的影响, 并在典型卫星振动谱条件下对 2 种算法的补偿效果进行了评估。仿真结果表明: 章动算法补偿后的平均耦合效率为 81.26%, 均方根误差为 7.2×10^{-4} ; SPGD 算法补偿后的平均耦合效率为 80.72%, 均方根误差为 1.9×10^{-3} 。相比于 SPGD 算法, 在最优情况下章动算法的均方根误差降低了 62.1%, 其稳定性更好。

关键词: 卫星激光通信; 随机振动; 光纤耦合; 章动; 随机并行梯度下降

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2020)12-0047-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.12.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Compensation algorithm for reducing the influence of random vibration on fiber coupling in satellite laser communication

ZHAO Zhuo, CHEN Ming, LIU Xiangnan*, YANG Chengwu, LI Xiaoliang

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to compensate for the coupling efficiency loss of space optical-single mode fiber caused by random vibration of satellite platform, the influence of parameter selection based on nutation algorithm and random parallel gradient descent (SPGD) algorithm on the stability and convergence speed of the two algorithms is compared and analyzed. The compensation effects of the two algorithms are evaluated under typical satellite vibration spectrum conditions. The simulation results show that the average coupling efficiency of nutation algorithm is 81.26%, and the root mean square error is 7.2×10^{-4} ; the average coupling efficiency of SPGD algorithm is 80.72%, and the root mean square error is 1.9×10^{-3} . Compared with SPGD algorithm, the root mean square error of nutation algorithm is reduced by 62.1% in the optimal case, and its stability is better.

Key words: satellite laser communication; random vibration; optical fiber coupling; nutation; stochastic parallel gradient descent

0 引言

随着卫星激光通信技术的不断发展, 将光纤器件应用于卫星激光通信系统已成为提高接收灵敏度、扩展通信速率和增强系统集成度的重要途径之一^[1-2]。其中, 采用单模光纤对空间激光信号进行耦合接收的技术受到了研究人员的广泛关注^[3-4]。然而, 空间光-单模光纤的耦合接收过程易受卫星平台振动、对准误差等

收稿日期: 2020-05-03。

基金项目: 民用航天资助项目资助; 中国航天科技集团有限公司自主研发项目资助。

作者简介: 赵卓(1993—), 男, 硕士研究生, 现就读于北京遥测技术研究所仪器科学与技术专业, 主要从事空间激光通信光学系统设计方面的研究, 并对光电晶体偏转器件的仿真设计和章动耦合算法仿真等开展相关研究, 参与多项民用航天共用技术课题的研究。

*通信作者: 刘向南(E-mail: 18310224565@163.com)。



因素的影响, 严重降低了光纤耦合效率及其接收稳定性。因此, 在卫星平台随机振动条件下如何实现空间光-单模光纤的高效耦合并稳定接收是卫星激光通信系统面临的一项难题。目前, 国内外研究人员已经对空间光-单模光纤的耦合效率的提升方法进行了研究。其中, Swanson 等人^[5]提出一种通过驱动单模光纤对准聚焦光斑改善系统耦合效率的方案。Weyrauch 等人^[6]提出了一种基于随机并行梯度下降 (SPGD) 算法的自适应光纤耦合系统来校正大气湍流引起的波前畸变。但是, 针对卫星平台随机振动的耦合效率补偿算法的研究相对较少。

本文基于空间光-单模光纤耦合的理论模型和卫星平台振动特点, 研究典型卫星平台振动对空间光-单模光纤耦合效率的影响, 仿真分析章动算法和 SPGD 算法对耦合效率损失补偿的优化迭代过程, 对

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

比 2 种算法的参数选取对算法稳定性和收敛速度的影响, 评估 2 种算法对耦合效率损失的补偿性能和稳定性。

1 理论模型

1.1 卫星平台振动模型

目前, 美国宇航局等研究机构分别对 Landsat-4、OLYMPUS 和 ETS-VI 等卫星平台的振动特性进行了研究^[7-9]。其中, 由欧空局 OLYMPUS 卫星在轨微振动测试得到的功率谱密度 $S(f)$ 被广泛应用, 其公式表示为^[7]:

$$S(f) = \frac{160}{1+f} \quad (1)$$

其中, f 为振动频率。

根据式(1)的功率谱密度函数, 有学者设计了相应的滤波器, 采用高斯白噪声滤波的方式将频域功率谱密度转化为时域信号, 并以此模拟卫星平台振动^[10]。该方法得到的振动信号可以更加真实、有效地模拟卫星平台的随机振动。其传递函数为:

$$G(s) = \frac{160}{0.002337s^3 + 0.05292s^2 + 0.3991s + 1} \quad (2)$$

其中, s 为传递函数中的空间变量。根据上述的卫星平台振动谱可知, 典型的卫星振动主要集中在 0~50 Hz, 幅值小于 200 μrad 。因此, 要想建立稳定的卫星激光通信链路, 实现高效、稳定的空间光-单模光纤的激光信号接收, 必须对卫星平台振动进行有效地抑制和补偿。

1.2 随机振动条件下的空间光耦合模型

在卫星激光通信链路中, 信号光束经过远距离传输后被目标终端接收, 经由光学系统聚焦后在焦平面处形成聚焦光斑, 调整位于后焦平面处的单模光纤端面与光斑对准, 实现空间光束与单模光纤的耦合以进行后续处理。此时, 入瞳处的耦合效率表达式为^[11]:

$$\langle \eta \rangle = \frac{\left| \iint E_A^*(r_a) F_A(r_a) dS \right|^2}{\iint |E_A(r_a)|^2 dS \iint |F_A(r_a)|^2 dS} \quad (3)$$

其中, E_A 为入瞳处的光场分布, E_A^* 为 E_A 的共轭, F_A 为单模光纤的后向传输模场分布, r_a 为入射光瞳面上的入射光与光瞳中心的距离, S 为单模光纤模场面积。

受卫星平台振动的影响, 在空间光束耦合接收过程中将引入随机抖动, 使得接收到的信号光与单模光纤之间产生标准差为 σ_j 的横向随机偏移, 根据文献[12]可知, 可用 $p(r_j, \Delta r)$ 表示当光纤端面随机偏移 r_j 时的

概率密度函数, Δr 为聚焦光斑与随机抖动中心的静态偏差。该函数服从 Rician 分布, 其表达式为:

$$p(r_j, \Delta r) = \frac{r_j}{\sigma_j^2} \exp\left(-\frac{\Delta r^2 + r_j^2}{2\sigma_j^2}\right) I_0\left(\frac{\Delta r \cdot r_j}{\sigma_j^2}\right) \quad (4)$$

此时, 光纤端面的后向传输模场分布可用含有随机偏移 r_j 的表达式 $F_A(r, r_j)$ 表示:

$$F(r, r_j) = \sqrt{\frac{2}{\pi \omega_a^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_a^2}\right) \exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda L} \cos(\varphi - \psi) r \cdot r_j\right] \quad (5)$$

其中, ω_a 为后向传输模场的模场半径, r 为单模光纤半径, λ 为光束波长, L 为透镜焦距, φ 为 r_a 方向与 X 轴方向的夹角, ψ 为 r_j 与 X 轴方向的夹角。

将式(4)、式(5)代入式(3)中, 化简后可以得到耦合效率为:

$$\langle \eta \rangle = 8\beta^2 \left| \int_0^1 \exp\left[-\beta^2 \left(\frac{2\sigma_j^2}{\omega_0^2} + 1\right) \rho^2\right] I_0\left(\frac{2\Delta r \beta \rho}{\omega_0}\right) \rho d\rho \right|^2 \quad (6)$$

其中, I_0 表示第一类修正贝塞尔函数, ω_0 为单模光纤半径, ρ 为归一化入瞳口径半径, β 为耦合参数。

2 单模光纤耦合补偿算法

根据空间光-单模光纤耦合的模场匹配原理, 本文设计了基于快反镜和光电探测器的空间光-单模光纤耦合方案, 如图 1 所示。空间光经过快反镜进入耦合透镜, 经耦合透镜汇聚后耦合进入单模光纤; 以光电探测器接收到的光功率作为控制信号, 利用快反镜驱动聚焦光斑在耦合透镜后焦平面搜寻耦合效率的最大位置, 从而实现高效、稳定的空间光-单模光纤的动态接收。在实际应用中, 需采用适当的算法以获得更高的耦合效率和提高耦合系统的稳定性。本文对目前常用的章动算法和 SPGD 算法在光纤耦合方案中的应用分别进行了仿真研究。

2.1 章动算法

章动算法的工作原理如图 2 所示, 通过控制快反

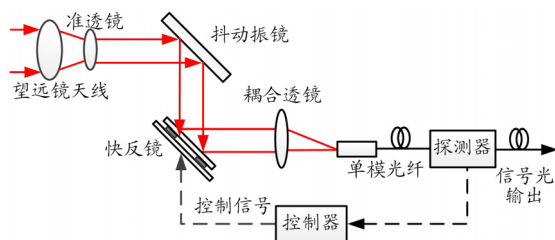


图 1 空间光-单模光纤耦合系统组成示意图

镜使聚焦在光纤端面上的光斑围绕一个扫描中心进行周期性的圆周扫描, 由光电探测器确定扫描过程中耦合效率最大的位置。控制器以固定步长移动扫描中心并进行下一次扫描。进行多次扫描之后, 最终

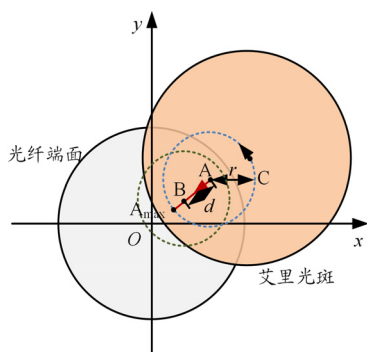


图2 章动算法扫描示意图

收敛到全局最优位置, 使得空间光的耦合效率达到最大^[13]。由章动圆周运动的对称性可知, 当系统不存在抖动时, 单模光纤的输出功率应为一个恒定值; 若通信过程中存在随机抖动, 将使光斑的圆周扫描发生平移, 此时单模光纤的输出功率会发生周期性变化。

章动算法的具体实现流程可以概述为: 初始扫描中心位置点A、章动深度 r 、收敛步长 d 和采样点数 N ; 以光纤端面为二维坐标系的零点, 点A为扫描中心, 点AC间距离为章动深度 r , 扫描单周共取 N 个采样点。单周扫描完成后, 比较所有采样点的光功率值, 提取最大光功率点的方向为章动收敛方向; 移动扫描中心点A, 沿章动收敛方向以固定收敛步长 d 移动到点B, 以点B作为扫描中心再次进行圆周扫描。重复上述步骤, 直至耦合效率趋向最优, 从而实现闭环控制。

2.2 SPGD 算法

SPGD 算法是在并行扰动随机近似算法的基础上提出的优化控制技术方案, 以耦合进单模光纤内的光功率作为 SPGD 控制算法的性能指标 J , 通过最大化性能指标的方式实现补偿^[14]; 利用光电探测器对光功率进行实时探测, 控制器对施加于快反镜的驱动电压进行迭代运算, 使快反镜产生偏转, 驱动聚焦光斑移动, 最终使耦合效率达到最优。在 SPGD 算法中需要对扰动幅度 δ 和增益系数 γ 进行设置, 以权衡算法的收敛性能及稳定性。

SPGD 算法的具体实现流程可以概述为: 产生一组均值为零且服从伯努利分布的随机扰动电压 δu , 将施加在快反镜上的驱动电压表示为 $u^+ = u_n + \delta u$, 测量单模光纤输出光功率 J^+ ; 再施加驱动电压 $u^- = u_n - \delta u$, 测量单模光纤输出光功率 J^- ; 计算光功率指标的改变量 $\delta J = (J^+ - J^-)/2$, 调整快反镜电压为 $u_{n+1} = u_n + \gamma \delta J \delta u$, 其中 δu 为 SPGD 算法的扰动幅度, n 代表迭代次数。重复上述步骤, 直至耦合效率趋于最优, 从而实现闭环控制。

3 仿真分析

3.1 章动算法仿真

本文首先对章动补偿算法进行了仿真分析, 主要研究章动深度和收敛步长对章动算法的收敛速度和稳定性的影响。

图3为当初始误差为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 时, 不同章动深度对抖动误差补偿迭代过程中耦合效率的影响曲线。其中, 章动深度 r 分别选取 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。可以看出, 不同章动深度的迭代过程均在20次迭代后趋于稳定, 选取的章动深度越小, 收敛过程中的耦合效率波动越小。但在实际章动应用中, 章动深度不宜选取过小。这是因为单模光纤纤芯直径仅为 $9\text{ }\mu\text{m}$, 若章动深度选取太小, 容易被卫星平台的随机抖动噪声所掩盖, 导致无法准确判断随机抖动误差。

图4为在相同的初始误差情况下, 当章动深度 r 为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$, 收敛步长 d 分别选取 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.25\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 时的耦合效率变化曲线。可以看出, 收敛步长的选取对算法的收敛性和收敛速度均有一定影响。收敛步长 d 越大, 耦合效率收敛至稳定状态所需迭代次数越少, 但达到稳定状态时的平均耦合

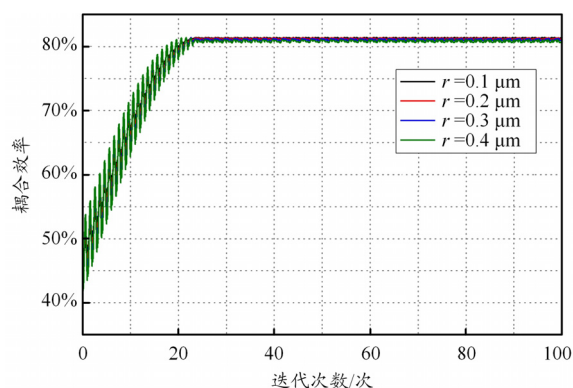


图3 不同章动深度初始误差补偿迭代曲线

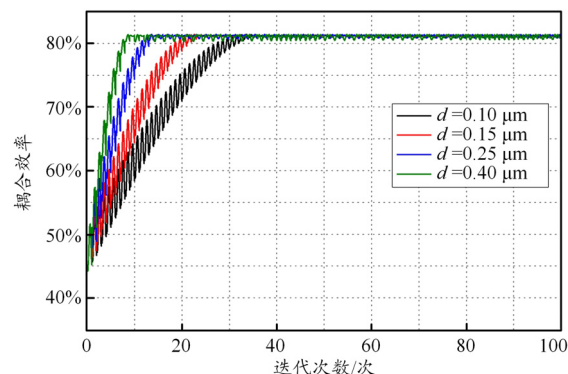


图4 不同收敛步长初始误差补偿迭代曲线

效率越低, 且耦合效率的波动越大。当收敛步长 d 为 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 需要 40 次迭代才能到达稳定状态, 对应稳定状态下的平均耦合效率为 81.15%。而当收敛步长 d 为 $0.4 \mu\text{m}$ 时, 仅需要 10 次迭代就能到达稳定状态, 但此时的平均耦合效率仅为 80.75%。因此, 为了获得高效、稳定的平均耦合效率, 收敛步长不宜选取太大。

3.2 SPGD 算法仿真

在 SPGD 算法中, 对算法的收敛性和收敛速度产生影响的参数主要包括增益系数 γ 和扰动幅度 δ 。图 5 是在初始误差为 $1 \mu\text{m}$ 的情况下, 在选取不同增益系数时 SPGD 算法对初始误差的补偿迭代变化曲线。可以看出, 增益系数越大, SPGD 算法迭代至稳定状态所需的迭代次数越少。当增益系数 γ 为 4 时, 需要 70 次迭代才稳定在最大耦合效率附近, 而当增益系数 γ 为 10 时, 仅需要 20 次迭代即实现耦合效率的稳定。然而, 若增益系数过大, 在迭代过程中有可能会产生较大的增益控制电压, 将造成聚焦光斑偏离光纤端面, 从而引起耦合功率的剧烈波动甚至耦合失效。因此, 应选取适当的增益系数在加快算法迭代速度的同时避免出现算法失效。

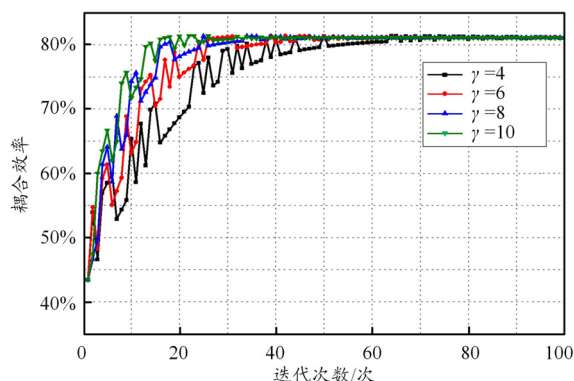


图5 不同增益系数 SPGD 算法补偿迭代曲线

基于上述分析, 本文选取 SPGD 算法的增益系数 γ 为 6, 仿真分析了不同扰动幅度 δ 对补偿算法的影响如图 6 所示。可以看出, 在相同的初始误差情况下, 扰动幅度 δ 越大, 算法的收敛速度越快, 但是到达稳定状态的平均耦合效率越低。当扰动幅度 δ 为 $0.5 \mu\text{m}$ 时, 仅需要 8 次迭代耦合效率就会收敛至稳定状态, 但是平均耦合效率仅 79.25%; 而当扰动幅度 δ 为 $0.2 \mu\text{m}$ 时, 虽然需要 60 次迭代才能收敛至稳定状态, 但是此时的平均耦合效率可以达到 81.11%。因此, 需要选取适当的扰动幅度, 使得在平均耦合效率较高的情况下保证一定的收敛速度。

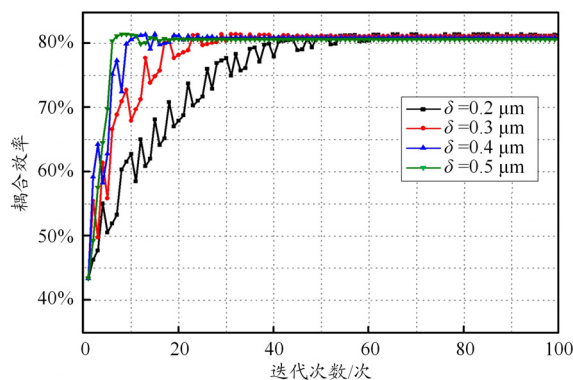


图6 不同扰动幅度 SPGD 算法补偿迭代曲线

3.3 卫星平台随机振动补偿性能仿真

由前文的分析可知, 随机振动是影响光纤耦合效率的重要因素。为了研究章动算法和 SPGD 算法对不同幅度随机振动引起的光纤耦合损失的补偿效果, 本文仿真了 2 种算法对在不同随机振动条件下, 补偿耦合损失后所达到的耦合效率以及所需要的迭代次数, 如图 7 所示。图中曲线为 100 次迭代过程的平均。仿真曲线表明: 随着归一化随机振动标准差 σ/ω_0 的增大, 2 种算法均呈现耦合效率下降且迭代次数增加的变化规律。当 $\sigma/\omega_0 \leq 0.3$ 时, 经过 2 种算法补偿后的耦合效率均在 80.91% 以上, 且迭代次数均少于 30 次, 两者差距不大。但是, 当 $\sigma/\omega_0 \geq 0.7$ 时, 章动算法补偿后的耦合效率明显高于 SPGD 算法的耦合效率, 且所需迭代次数更少。当 $\sigma/\omega_0 = 1.0$ 时, 章动耦合算法补偿后的耦合效率为 79.38%; 而 SPGD 算法仅为 77.82%。

为了更好地模拟卫星平台振动对耦合效率的影响和上述 2 种算法的补偿效果, 由式 (2) 得到的典型卫星平台的模拟振动信号引起的耦合效率损失如图 8 所示, 在未采用补偿算法的 0~20 s 时间内, 受卫星平台振动的影响, 空间光-单模光纤的耦合效率无法保持稳定, 此时的平均耦合效率仅为 48.28%, 均方根误

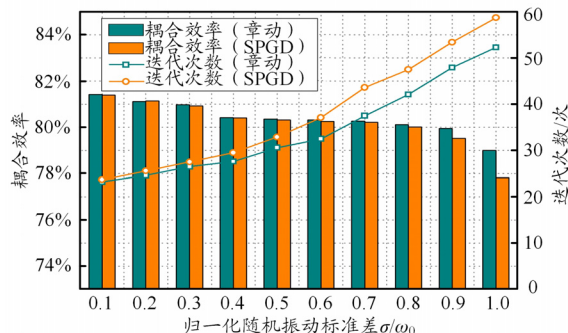


图7 不同随机振动情况下

章动算法和 SPGD 算法补偿后耦合效率和迭代次数曲线

差为 0.203。这表明卫星平台振动对空间光-单模光纤耦合效率影响较大。随后在 20~40 s 的时间段, 分别采用如表 1 所示参数的 SPGD 算法和章动算法对卫星平台振动引起的耦合效率损失进行补偿。由图 8 可知, 章动算法在 22 次迭代后耦合效率即进入稳定状态, 而 SPGD 算法在 35 次迭代后才能进入稳定状态。由表可知, 章动算法补偿后的平均耦合效率为 81.26%, 均方根误差为 7.22×10^{-4} ; 而 SPGD 算法补偿后的平均耦合效率为 80.96%, 均方根误差为 1.91×10^{-3} 。因此, 综合评估 2 种算法的耦合效率补偿效果、收敛速度和稳定性可知, 在各自的最优条件下, 章动算法的收敛速度更快, 收敛至稳定状态后的平均耦合效率更高, 耦合效率的稳定性更好。

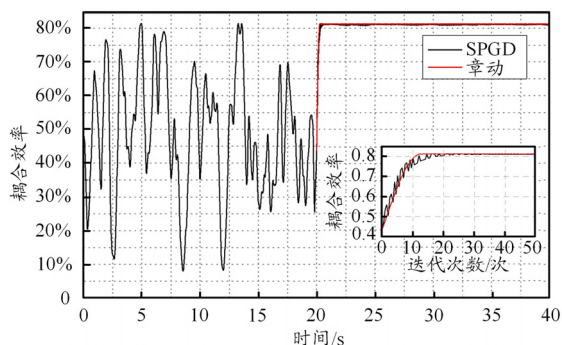


图 8 章动算法和 SPGD 算法补偿前后的耦合效率变化曲线

表 1 章动算法和 SPGD 算法补偿后的平均耦合效率和均方根误差

算法	参数选取	迭代次数	平均耦合效率	均方根误差
章动算法	章动深度: $0.2 \mu\text{m}$	22	81.26%	7.2×10^{-4}
	收敛步长: $0.15 \mu\text{m}$			
SPGD 算法	增益系数: 6	35	80.72%	1.9×10^{-3}
	扰动幅度: $0.3 \mu\text{m}$			

4 结束语

结合卫星平台随机振动特点, 本文分析了卫星平台振动引起的随机振动对空间光-单模光纤耦合效率的影响。为了补偿随机振动对空间光-单模光纤耦合效率的影响, 分别探讨了基于章动算法和 SPGD 算法这 2 种补偿算法的章动深度、收敛步长与增益系数、扰动幅度 2 组主要参数选取对算法稳定性和收敛速度的影响, 给出了相应的选取建议。根据卫星平台的典型随机振动特性, 对比分析了采用章动算法和 SPGD 算法对卫星平台随机振动的补偿效果。由仿真结果可知: 在典型卫星振动条件下, 2 种补偿算法均存

在最优参数使其收敛速度和耦合效率达到各自的最佳值; 2 种算法相比, 章动算法的收敛速度更快, 收敛至稳定状态后的平均耦合效率更高, 耦合效率的稳定性更好, 更适合卫星激光通信系统的应用。

参考文献:

- [1] 曾智龙, 刘兴, 孙晖, 等. 空间激光通信最新进展及发展建议[J]. 光通信技术, 2017, 41(6): 1-5.
- [2] 刘向南, 李英飞, 向程勇, 等. 激光测距通信一体化技术研究及深空应用探索[J]. 深空探测学报, 2018, 5(2): 147-153, 167.
- [3] 吴世奇, 林翔翔, 牟内, 等. 空间光-多模光纤的单模耦合效率分析[J]. 光通信技术, 2019, 43(1): 32-36.
- [4] VORONTSOV M A, WEYRAUCH T, BERESNEV L A, et al. Adaptive array of phase-locked fiber collimators: analysis and experimental demonstration [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 269-280.
- [5] SWANSON E A, BONDURANT R S. Using fiber optics to simplify free-space lasercom systems[C]//Free-Space Laser Communication Technologies, January 14-19, 1990, Los Angeles, United States, Los Angeles: SPIE, 1990: 70-82.
- [6] WEYRAUCH T, VORONTSOV M A, GOWENS J, et al. Fiber coupling with adaptive optics for free-space optical communication[C]//International Symposium on Optical Science and Technology, July 29-30, 2001, San Diego, United States, San Diego: SPIE, 2002: 177-184.
- [7] WITIG M, HOLTZ L, TUNBRIDGED E L, et al. In-orbit measurements of microaccelerations of ESA's communication satellite Olympus [C]//Free-Space Laser Communication Technologies, January 14-19, 1990, Los Angeles, United States, Los Angeles: SPIE, 1990: 205-214.
- [8] TOYOSHIMA M, TAKAYAMA Y, KUNIMORI H. In-orbit measurements of spacecraft microvibrations for satellite laser communication links [J]. Opt. Eng., 2010, 49(8): 578-578.
- [9] LEE S, ALEXANDER J W, JEGANATHAN M. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the International Space Station and ground [C]//Symposium on High-Power Lasers and Applications, January 22-23, 2000, San Jose, United States, San Jose: SPIE, 2000: 152-157.
- [10] 陈纯毅, 杨华民, 佟首峰, 等. 空间光通信卫星平台振动实时模拟[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(16): 3834-3837.
- [11] 吴子开, 陈莫, 刘超, 等. 基于光栅螺旋扫描和 SPGD 算法的单模光纤耦合方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 82-90.
- [12] MA J, ZHAO F, TAN L Y, et al. Plane wave coupling into single-mode fiber in the presence of random angular fitter [J]. Appl. Opt. 2009, 48(27): 5184-5189.
- [13] DENG K, WANG B Z, ZHAO G H, et al. Principle and performance analysis of coherent tracking sensor based on local oscillator beam nutation [J]. Optics Express, 2014, 22(19): 23528-23538.
- [14] LI F, GENG C, HUANG G, et al. Experimental demonstration of coherent combining with Tip/Tilt control based on adaptive space-to-fiber laser beam coupling[J]. IEEE Photonics Journal, 2017(99): 1-1.