

大规模光学相控阵分级 SPGD 算法及优化研究

韩荣磊^{1,2}, 孙建锋^{1,3*}, 侯培培¹, 董芳¹, 许玲玲^{1,2}, 张正伟¹, 姜玉鑫^{1,2}, 任伟杰^{1,2}, 从海胜^{1,2}, 张龙坤¹, 李超洋¹¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;³中国科学院上海光学精密机械研究所航天激光工程部, 上海 201800

摘要 随机并行梯度下降 (SPGD) 算法是一种应用广泛的最优化算法, 在光学相控阵的多光束相位调控中具有重要作用。常规的 SPGD 算法在光学相控阵单元数目较大的应用场景下存在着迭代步数多、收敛速度慢等缺陷。为此提出了一种分级 SPGD 算法, 将多光束进行分级, 通过在多级使用 SPGD 算法对光束的调控来实现快速收敛和稳定维持。介绍了该算法的理论模型和流程, 运用数值仿真的方式与传统算法进行了性能比较, 结果表明, 分级 SPGD 算法能够在大规模光学相控阵中显著提高收敛速度。搭建了光学相控阵实验系统进行分级 SPGD 算法的原理和可行性验证, 在不同光束数目条件下实现了分级 SPGD 算法的闭环锁相, 验证了算法的优越性, 结果显示分级算法在 32 路光束时可以将迭代次数降低到常规算法的 59.6%。

关键词 激光光学; 光学相控阵; 分级随机并行梯度下降算法; 相位调控

中图分类号 TN929.1 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL220690

1 引言

近 20 年来, 空间激光通信技术发展迅速, 对太空的开发逐渐深入, 星地和星间都进行了一系列的试验验证。世界很多国家都渴望建立激光通信网络来满足全球信息化的发展要求。在空间通信组网的过程中, 光学相控阵^[1]通过替代传统机械转台, 实现激光终端轻量化小型化, 可以快速实现不同终端的链接切换。基于光学相控阵的空间激光通信网络将是未来发展的必然趋势。

在光学相控阵技术中, 需要保证同一激光源分成的多路激光束具有相同的相位, 然后再进行相位调控达到所需的目的。为此需设置监测端对多光束相位进行监控, 并使用移相器进行调节。考虑到光束数目较多, 直接计算相位不现实, 适宜使用迭代算法进行计算补偿, 但算法需要经过多次迭代才能使光学相控阵的所有光束达到相位一致的状态。在光学相控阵激光通信的实际应用中, 相控阵的发射光束要时刻保持相位锁定, 因此迭代算法需要较快的收敛速度和更高的锁相带宽, 从而提高对环境中的相位干扰的抑制能力。目前在相位控制领域有多种迭代算法, 如遗传算法、模拟退火算法、随机并行下降梯度 (SPGD) 算法^[2]等, 都可以通过数次迭代将多光束的相位进行锁定。这几种迭

代算法中, 遗传算法的参数较多, 实现较为复杂; 模拟退火算法的收敛速度较慢^[3]; 而 SPGD 算法的原理简单, 易于实现, 同时在收敛速度和收敛效果方面有更大的优势^[4], 因此 SPGD 算法在光学相控阵、自适应光学、相干合束等多光束相位控制领域中逐渐得到广泛的应用^[5-12]。其中, 文献[5]基于 SPGD 算法实现了 6 阵元光学相控阵的快速锁相; 文献[6]报道了 SPGD 算法对液晶光学相控阵相位控制电压的优化, 提高了偏转性能; 文献[7]基于 SPGD 算法实现了 16 路光纤相控阵系统的相干合成和 500 kHz 的光束扫描, 此外, 该团队基于 SPGD 算法对 64 阵元的硅基光学相控阵进行了噪声补偿, 并分析了 SPGD 算法的收敛时间和补偿效果^[8]。但是, SPGD 算法存在着单元数越多收敛越慢的问题, 在大规模的光学相控阵中, SPGD 算法也无法达到很快的锁相速度。为了实现大数目阵元光束的快速相位锁定, 需要对算法进行优化改进。很多研究团队在 SPGD 算法的速度优化中做了诸多工作, 提出了如自适应增益 SPGD 算法 (AdmSPGD)、AdaDelSPGD 等优化方案^[13-17], 对 SPGD 算法的步长、增益等系数进行了相应优化, 提高了收敛速度。其中, 文献[15]中基于 AdmSPGD 算法的 19 路光纤相控阵光束锁相的仿真结果显示速率提高了 62.6%。文献[17]仿真了基于 AdaDelSPGD 的 7 路光纤相控阵的光

收稿日期: 2022-03-22; 修回日期: 2022-04-18; 录用日期: 2022-05-12; 网络首发日期: 2022-05-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB0408302)、国家自然科学基金 (91938302)、中国科学院战略性先导科技专项 (XDB43030400)、中国科学院重点部署项目 (ZDRW-KT-2019-1-01-0302)

通信作者: *sunjianfengs@163.com

束相位锁定,收敛速度提升了 44.4%。在使用 SPGD 算法的具体实验中,美国陆军实验室实现了 21 路光纤阵列的相位锁定^[18],2019 年国内团队实现了 60 路光纤激光阵列的锁相^[19]。目前国内外最大规模的相位控制阵列实验为国防科技大学基于 SPGD 算法的 107 路光纤激光阵列的相位锁定^[20]。随着光束数目的增多,结构变得更加复杂,对算法的性能要求也就更高。现如今,光学相控阵越来越广泛地应用于激光通信和激光雷达的研究^[21-25],对应的装置拥有较大的光学口径,进而需要较多的阵元数目。在未来阵元数目达到 10^3 及以上的量级时,仅仅通过优化 SPGD 算法的参数,没有改变所有阵元基于同一个评价参量进行控制的本质,对性能的提升非常有限,因此需要针对大规模阵元的情况对 SPGD 算法进行更深层次的优化。

为了提高大规模阵元光学相控阵多光束锁相的速度,本文基于常规 SPGD 算法的原理和收敛性提出了一种分级 SPGD 算法。不同于对 SPGD 算法的参数进行优化,而是通过将多个阵元光束进行分级,加入多级的微扰相位,在每一级将局部的光束进行相位锁定,通过监测每级光束合束功率的变化以及总合束功率的变化,进行相应的相位调节。在相控阵的分级控制方面,文献[26]报道了基于级联多抖动法的 16 光束阵列的相位锁定,文献[27]报道了基于 SPGD 算法的 16 路级联光纤激光阵列的相位锁定。但在上述级联方案中,在原有的各路光束中使用的相位调制器的基础上,还增加了用于第二级相位控制的相位调制器,且级数越多,增加的控制器件越多,结构越复杂。本文提出的分级 SPGD 算法则在不增加相位控制器件的情况下,由每一路的移相器同时产生多级微扰,实现阵列光束的快速锁相。本文首先介绍了分级 SPGD 算法的原理和流程,然后通过数值仿真的方法,基于不同数目的光学相控阵,分别使用常规算法和分级算法进行相位迭代控制,并进行性能比较,最后通过实验对分级 SPGD 算法的原理和可行性进行了验证。

2 算法介绍

2.1 SPGD 算法

常规 SPGD 算法的主要原理是通过通过对 N 个控制变量 u_1, u_2, \dots, u_N 施加两个方向上的微扰 du_1, du_2, \dots, du_N , 选取一个评价函数 $J = f(u_1, u_2, \dots, u_N)$ 作为性能指标,可以得到两次微扰下的评价函数为

$$\begin{cases} J_+ = f(u_1 + du_1, u_2 + du_2, \dots, u_N + du_N) \\ J_- = f(u_1 - du_1, u_2 - du_2, \dots, u_N - du_N) \end{cases} \quad (1)$$

在下次迭代时,控制变量变为

$$u_i[k+1] = u_i[k] + \gamma du_i (J_+ - J_-), i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

式中: k 表示迭代次数; γ 为增益系数。

上述原理即通过评价函数的变化量和微扰量估计出正确的迭代方向。

运用到光学相控阵中,每一路光束中有一个光学移相器,通过对这些移相器施加电压来控制相位的变化,那么这些电压信号就是 SPGD 算法中的控制变量 u_1, u_2, \dots, u_i , 评价函数选择多光束的合束功率 J , 在多次迭代后,功率 J 会逐渐趋向于极大值,此时多路光束的相位也趋于一致。算法的性能由微扰量和增益系数决定。

同时,SPGD 算法也可进行简化,令增益系数 $\gamma = \frac{1}{|J_+ - J_-|}$, 即在梯度判决时可以直接根据 $J_+ - J_-$ 的符号确定梯度方向,下一次迭代的变化量仅由微扰量决定,即

$$u_i[k+1] = u_i[k] + \frac{J_+ - J_-}{|J_+ - J_-|} du_i. \quad (3)$$

2.2 分级 SPGD 算法

分级 SPGD 算法主要思想是将所有的控制变量在空间分布上进行分组,产生多级微扰,每一级选取一个评价函数,使用 SPGD 算法进行最优化迭代。由于存在多个评价函数,且不同组之间的迭代不统一,会存在多个微扰参数和增益系数需要调节,为了降低算法的复杂度和调参的难度,我们选择上述简化 SPGD 算法。不失一般性,以 N 路光束的光学相控阵使用 M 级分级 SPGD 算法为例进行原理介绍。

如图 1(a) 图示,光学相控阵的 N 路光束经过分束镜,反射部分进入图 1(b) 的监测接收光路,用于相位同步的监测。假定每一路光束的光场表示为

$$E_n = A_n \exp\{i[\omega t + \phi_m(t) + \phi_n + p_n(t)]\}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (4)$$

式中: A_n 为每一路的振幅; $\phi_m(t)$ 为调制的信号相位; ϕ_n 为每一路的固定相位; $p_n(t)$ 为随机相位,包括由光纤抖动、环境扰动等产生的不同光束间的相位变化。

当分级算法分为 M 级时流程如下。

(1) 将 N 路光束分为 m_1 个组,各个组包含的光束数目依次为 $[x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}, \dots, x_{m_1}^{(1)}]$, 右上角标表示级数,即有 $\sum_{v=1}^{m_1} x_v^{(1)} = N$, 每个元素不小于 2。将该级的所有光束进行分束,其中反射光合为一路光,选取的评价函数为每一组内的光束合束功率,由 m_1 个探测器获取光功率,依次表示为 $P_{1,1}, P_{1,2}, \dots, P_{1,m_1}$, 那么每一个探测器的输出信号可以表示为

$$P_{1,j^{(1)}} = \beta \left| \sum E_v \right|^2, v \in x_{j^{(1)}}, j^{(1)} = 1, 2, 3, \dots, m_1, \quad (5)$$

式中: β 为探测器的响应系数。

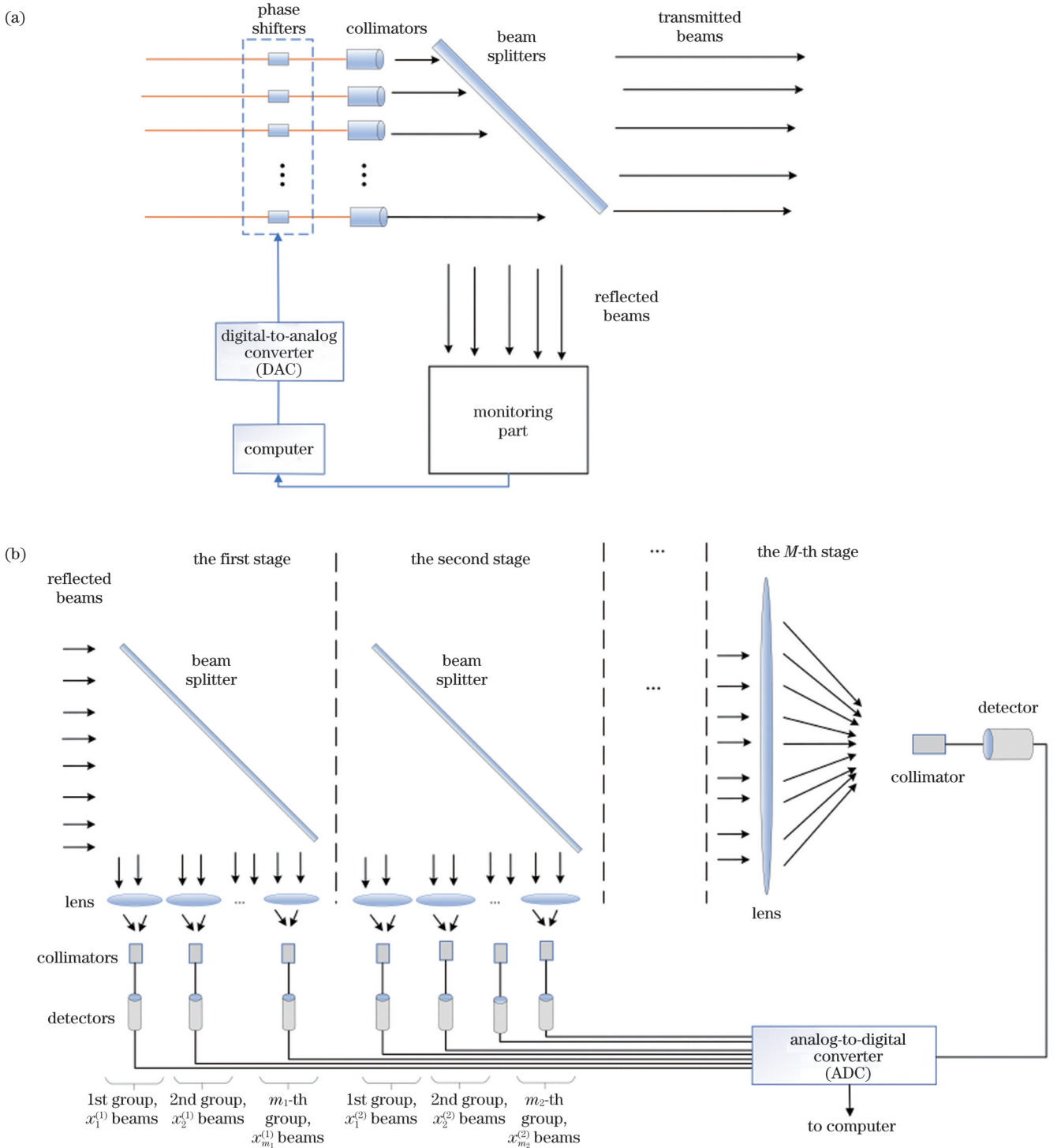


图 1 光学相控阵多光束相位控制结构图。(a) 总体结构图；(b) 监测部分

Fig. 1 Structure of phase control in optical phased array. (a) Overall structure; (b) monitoring part

透射光进入第二级。

(2) 在第二级中将第一级的所有透射光分为 m_2 个组。由于第一级有 m_1 个组，将其称为 m_1 个元素，第二级对该 m_1 个元素进行分组，各个分组包含的元素个数依次为 $[x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, x_3^{(2)}, \dots, x_{m_2}^{(2)}]$ ，各个分组包含的光束数目依次记为 $[\kappa_1^{(2)}, \kappa_2^{(2)}, \dots, \kappa_{m_2}^{(2)}]$ ，那么有 $\sum_{v=1}^{m_2} x_v^{(2)} = m_1$ ，

$\sum_{v=1}^{m_2} \kappa_v^{(2)} = N$ 。将第二级中每一组的光束都进行分束，反射光进行合束，则会形成 m_2 个合束信号光，由 m_2 个探测器获取光功率，依次表示为 $[P_{2,1}, P_{2,2}, \dots, P_{2,m_2}]$ ，那么有

$$P_{2,j^{(2)}} = \beta \left| \sum E_v \right|^2, v \in x_{j^{(2)}}^{(2)}, j^{(2)} = 1, 2, 3, \dots, m_2. \quad (6)$$

透射光进入第三级；以此类推，直到第 $M-1$ 级。

(3) 第 $M-1$ 级中存在 m_{M-2} 个第 $M-2$ 级的元素, 将这些元素分成 m_{M-1} 个组, 各个分组包含的元素个数依次为 $[x_1^{(M-1)}, x_2^{(M-1)}, \dots, x_{m_{M-1}}^{(M-1)}]$, 每个元素不小于 2, 各个分组内包含的光束数目依次为 $[\kappa_1^{(M-1)}, \kappa_2^{(M-1)}, \dots, \kappa_{m_{M-1}}^{(M-1)}]$, 则有 $\sum_{v=1}^{m_{M-1}} x_v^{(M-1)} = m_{M-2}$, $\sum_{v=1}^{m_{M-1}} \kappa_v^{(M-1)} = N$ 。将第 $M-1$ 级中每一组的光束进行分束, 反射光合为一束, 则会形成 m_{M-1} 个合束信号光, 由 m_{M-1} 个探测器获取光功率, 依次为 $[P_{M-1,1}, P_{M-1,2}, \dots, P_{M-1,m_{M-1}}]$, 那么有

$$P_{M-1,j^{(M-1)}} = \beta \left| \sum E_v \right|^2, v \in x_{j^{(M-1)}}^{(M-1)}, j^{(M-1)} = 1, 2, 3, \dots, m_{M-1} \quad (7)$$

(4) 第 M 级只有一个组, 即 $[x_1^{(M)}]$, 且有 $x_1^{(M)} = m_{M-1} \geq 2, \kappa_1^{(M)} = N$ 。该级为最后一级, 将第 $M-1$ 级的所有透射光合为一束, 由一个探测器获取光功率 $P_{M,1}$, 记为

$$P_{M,1} = \beta \left| \sum_{v=1}^N E_v \right|^2 \quad (8)$$

(5) 产生微扰相位。第一级中有 N 个微扰量对应每一路光束, 依次记为 $[\delta u_1^{(1)}, \delta u_2^{(1)}, \dots, \delta u_N^{(1)}]$ 。为了保证组内光束的一致性而不受第二级微扰的影响, 有 m_1 个微扰, 即第一级同一组内的光束的二级微扰相同, 每个微扰量依次记为 $[\delta u_1^{(2)}, \delta u_2^{(2)}, \dots, \delta u_{m_1}^{(2)}]$ 。同理, 第三级产生 m_2 个微扰相位, 直到第 M 级有 m_{M-1} 个微扰, 依次记为 $[\delta u_1^{(M)}, \delta u_2^{(M)}, \dots, \delta u_{m_{M-1}}^{(M)}]$ 。那么对于光学相控阵的每一路光束, 都产生了 M 个微扰相位。

(6) 对所有 N 路光束施加微扰相位, 那么对于单路光束, 相位项需要增加 M 个微扰量, 其光场变为

$$E_n = A_n \exp \left\{ i \left[\omega t + \phi_m(t) + \phi_n + p_n(t) + \delta u_n^{(1)} + \delta u_n^{(2)} + \dots + \delta u_n^{(M)} \right] \right\}, \quad (9)$$

对应的各级光功率依次为 $[P_{1,j^{(1)}}^+, P_{2,j^{(2)}}^+, \dots, P_{M-1,j^{(M-1)}}^+, P_{M,1}^+]$ 。

施加相反微扰后光场变为

$$E_n = A_n \exp \left\{ i \left[\omega t + \phi_m(t) + \phi_n + p_n(t) - \delta u_n^{(1)} - \delta u_n^{(2)} - \dots - \delta u_n^{(M)} \right] \right\}, \quad (10)$$

对应的各级光功率依次变为 $[P_{1,j^{(1)}}^-, P_{2,j^{(2)}}^-, \dots, P_{M-1,j^{(M-1)}}^-, P_{M,1}^-]$ 。

(7) 经过两次微扰后判决出正确的相位变化方向为

$$d\Phi_n = \frac{P_{1,j^{(1)}}^+ - P_{1,j^{(1)}}^-}{|P_{1,j^{(1)}}^+ - P_{1,j^{(1)}}^-|} \delta u_n^{(1)} + \frac{P_{2,j^{(2)}}^+ - P_{2,j^{(2)}}^-}{|P_{2,j^{(2)}}^+ - P_{1,j^{(2)}}^-|} \delta u_n^{(2)} + \dots + \frac{P_{M,1}^+ - P_{M,1}^-}{|P_{M,1}^+ - P_{M,1}^-|} \delta u_n^{(M)} \quad (11)$$

该次迭代后单光束的光场表示为

$$E_n = A_n \exp \left\{ i \left[\omega t + \phi_m(t) + \phi_n + d\Phi_n + p_n(t) \right] \right\} \quad (12)$$

(8) 回到步骤(5), 重新产生新的微扰相位, 开始下一次迭代。实时记录所有光束叠加的光信号, 即第 M 级的功率 $P_{M,1}$, 当其达到极大值时, 所有光束的相位即锁定到一致状态。

算法的全部流程如图 2 所示。在根据实际需要终止之前, 分级算法会不停执行闭环迭代操作。16 路的 3 级分级算法的一种分级示例如图 3 所示, 每 4 路光束作为一组形成第一级, 每两组第一级的光束作为第二级, 两组第二级光束作为第三级, 在每一级都根据该级对应的光信号使用 SPGD 算法进行闭环。

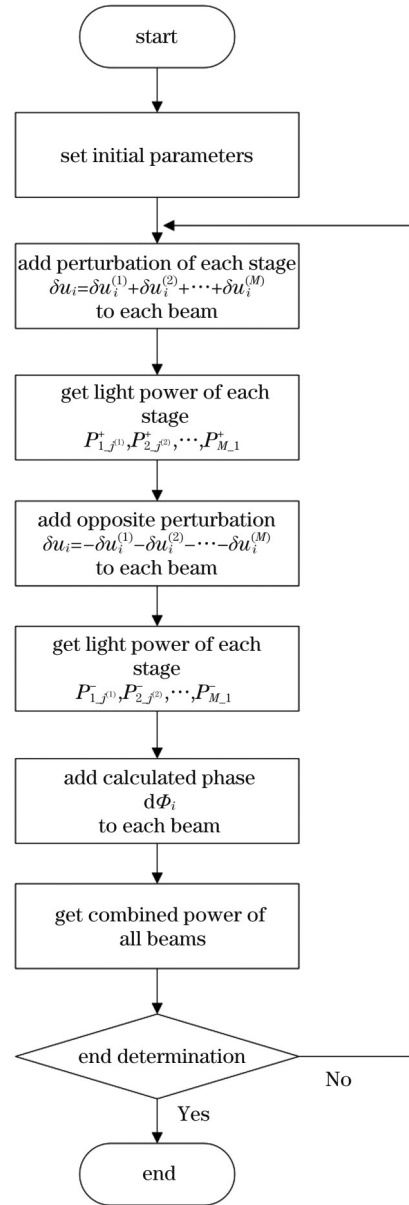


图 2 分级 SPGD 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of multi-stage SPGD algorithm

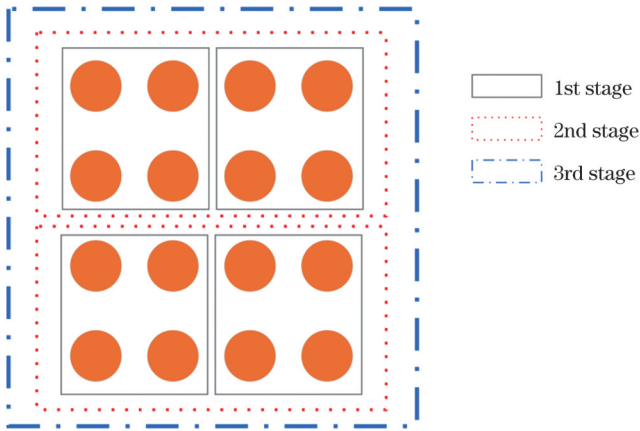


图3 二维16路光束使用3级分级SPGD的一种分组示例
Fig. 3 Grouping example of a two-dimensional 16 beams arrangement using 3-stage SPGD

3 算法分析和仿真

光学相控阵对于多光束相位调节算法的需求是在大数目阵元下更快实现相位锁定,以及具备较高的闭

环带宽。本节对于常规单级SPGD算法和分级SPGD算法的锁相性能进行分析。在分级SPGD算法中,每一级都使用SPGD算法进行迭代,基于SPGD算法的收敛性,在每一级的迭代中都会使该级的合成功率趋于极大值,因此最终所有光束合成的总功率也会收敛到极大值。由于SPGD算法具有随机和统计特性,没有固定的传递函数,因此,本节主要以仿真的形式来分析两种算法的性能表现。

3.1 迭代步数

在使用SPGD算法进行多光束锁相控制时,迭代步数是核心指标,是算法的关键。基于上述光学相控阵模型,设置单元数为64路和100路,分别使用SPGD算法和分级SPGD算法进行仿真。设置多光束的初始相位服从均值为0、标准差为 2π 的高斯分布,波长为1550 nm,对分级SPGD算法,设置为两级,分别为 8×8 和 10×10 (8×8 表示64路光束时,第一级分为8组,每组8路光束,分别组内锁相,第二级对8组光束进行锁相; 10×10 同理)。仿真得到的迭代曲线如图4所示,数据如表1所示。

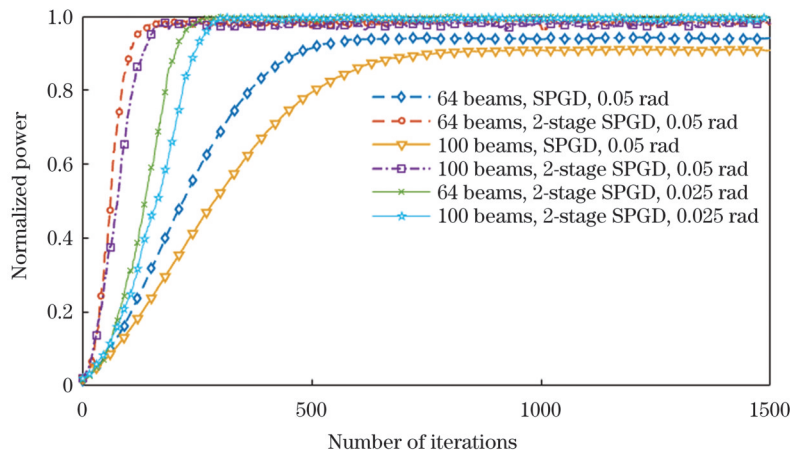


图4 SPGD算法和两级SPGD算法64/100路光束下的收敛曲线

Fig. 4 Convergence curves of conventional SPGD algorithm and 2-stage SPGD algorithm under conditions of 64/100 beams

表1 SPGD算法和两级SPGD算法在不同光束数目下的收敛数据结果

Table 1 Convergence data of conventional SPGD algorithm and 2-stage SPGD algorithm under conditions of 64/100 beams

Number of beams	Algorithm	Number of iterations	Normalized power	Standard error value
64	SPGD	634	0.940	0.0010
	2-stage SPGD	150	0.980	0.0048
	2-stage SPGD	275	0.995	0.0011
100	SPGD	937	0.910	0.0011
	2-stage SPGD	179	0.980	0.0048
	2-stage SPGD	301	0.995	0.0011

从图4中的曲线和表1中的数据可以看出,在光束路数一定时,相同步长下,两级SPGD算法的收敛速度明显快于常规SPGD算法,相比常规单级算法的迭代步数减少了76.3%(64路光束)和80.9%(100路光

束)。在100路光束时,常规SPGD的收敛变得很慢,而两级SPGD算法仍然保持着较快的收敛速度,甚至优于64路光束时常规算法的表现。从收敛到的极值来看,常规SPGD算法的归一化功率较低,在100路时

已经降至 91%，而分级算法一直维持在 98% 以上，但是由于分级算法中加入了多级微扰，导致收敛到极值后的归一化功率抖动标准差比单级 SPGD 算法的大。因此，在级数一定时，需要减小分级算法的步长。减小步长至 0.025 rad，使两级 SPGD 算法的收敛标准差达到 0.0011，迭代步数在两种情形下均增加不到一倍，相比常规单级 SPGD 的迭代步数仍然减少了 56.6% (64 路) 和 67.9% (100 路)。同时也可以看出，分级 SPGD 算法的表现比目前报道的其他优化 SPGD 算法更佳。

由对 64 路和 100 路光束的仿真可以看出分级 SPGD 算法明显提高了收敛速度。为了在更多阵元数目下进行对比，将仿真的光束数目最大增加到 1000 路。为了统一标准，通过调试步长，使不同路数的收敛效果都达到归一化功率 90% 以上且标准差最大为 1%，记录此时的迭代步数。当阵元数目很多时存在多种分级情形，我们在不同阵元数目的情况下对多种分级情形进行仿真，选取迭代步数最少的情况。结果如图 5 所示。

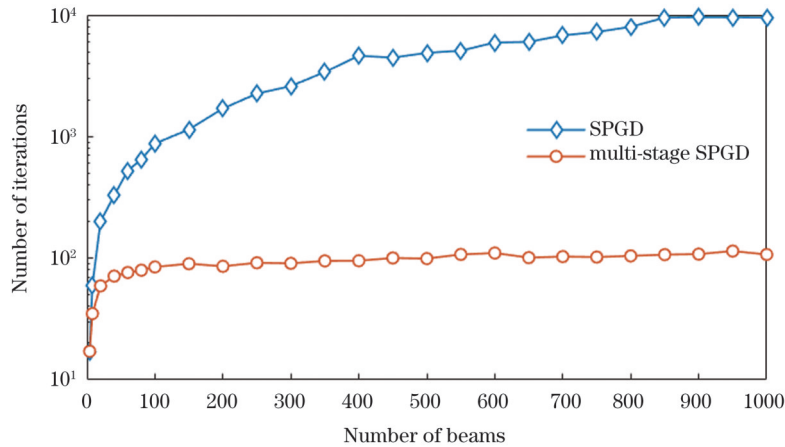


图 5 SPGD 算法和多级 SPGD 算法在不同光束数目下的迭代步数

Fig. 5 Number of iterations of conventional SPGD algorithm and multi-stage SPGD algorithm under different numbers of beams

图 5 显示了不同光束数目下单级 SPGD 算法和分级 SPGD 算法的迭代步数，可以看出在抖动标准差一定的条件下，光学相控阵的阵元数目越多，两种算法收敛到极值所需要的迭代步数也越多，但两者的增长趋势不同。在 1000 路以内，单级 SPGD 算法的迭代步数随光束数目增长较快，在 1000 路时已经达到了 9522 步，而分级 SPGD 算法的迭代步数在光束数目较少时增长迅速，但趋势逐渐减慢，在 1000 路时的迭代步数为 107.25 步，便可实现相位锁定，相比常规单级 SPGD 算法的步数减少了 98.87%。

将单级算法步数与分级算法步数的比值作为步

数比，如图 6 所示，可以看出光束的数目越多，步数比就越大，分级算法的优势也越明显，在 1000 路以内，步数比最大可达 88.92。可以看出，在阵元数目较少时，两种算法的性能差距较小，如 32 路以内的步数比在 4 以下，两者基本都能够满足光学相控阵的需要。但在阵元数目多达数百的光学相控阵规模下，常规 SPGD 算法的迭代步数多达数千步，不再能满足实际应用中对于快速锁相的需求，而分级 SPGD 算法在此情形下迭代步数依然很少。因此，分级 SPGD 算法极大地提高了收敛速度，更加具备实用性和优越性。

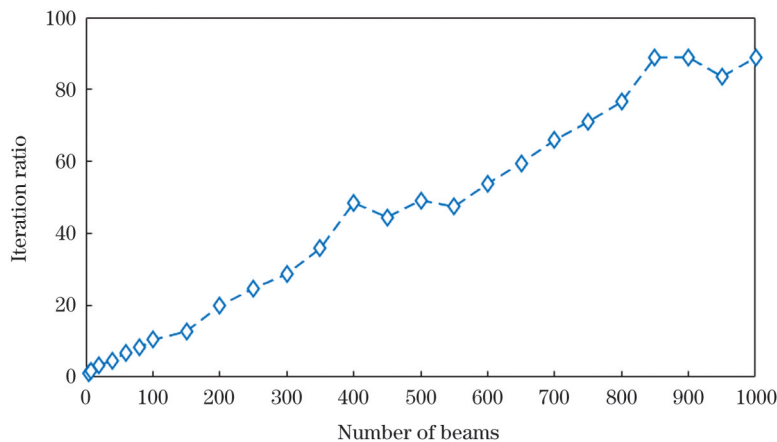


图 6 SPGD 算法和多级 SPGD 算法在不同光束数目下的迭代步数比

Fig. 6 Curve of iteration ratio of conventional SPGD algorithm to multi-stage SPGD algorithm under different numbers of beams

3.2 级数

在分级 SPGD 算法中,级数的选择十分重要,并非越大越好,这是由于每一级都存在微扰相位,级数越大,每一路光束携带的微扰相位个数就越多,在闭环后多光束叠加的功率稳定性也越差。因此需要选择最优的级数,实现闭环的快速性和稳定性之间的平衡。

图 7 为 64 路光束在不同级数下的最快迭代步数,可以看出迭代步数随着级数的增加先减小而后增大。这是由于当级数变大时,闭环收敛后光功率抖动更加剧烈,只能减小步长来补偿功率的稳定性。迭代步数在级数 $M=4$ 时取得最小值,取其为最优级数。

不同光束数目对应的最优级数各不相同。针对 4~1000 的光束数目,仿真出每一种级数下使用分级 SPGD 算法锁相收敛的迭代步数,取收敛最快的级数作为该光束数目下的最优级数。图 8 展示了光束数目在 4~1000 时仿真得到的最优级数。从图 8 的数据来看,随着光束数目的增加,最优级数也在增大,从 1 级增加到了 6 级。仿真数据显示,在闭环后归一化功率

均值大于 90% 以及抖动标准差小于为 1% 的条件下,对于 100 路光束以上的大规模光学相控阵,分级 SPGD 算法的最优级数至少 4 级,其中在 350~800 路光束时最优级数为 5 级,在 800~1000 路光束时分级 SPGD 算法的最优级数可达 6 级。在实际应用中,根据光束数目选择合适的级数可以使 SPGD 算法性能发挥到最佳。

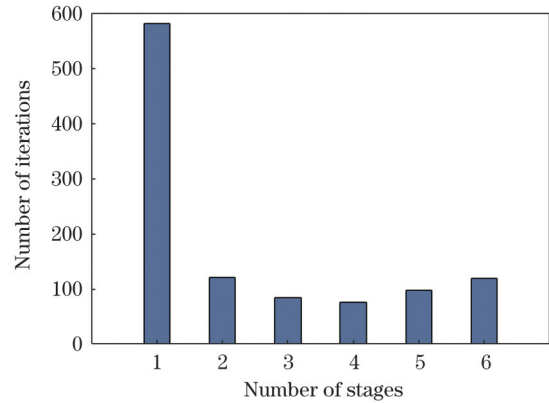


图 7 64 路光束时分级 SPGD 算法在不同级数下的迭代步数
Fig. 7 Number of iterations of multi-stage SPGD with different stage numbers for 64-beam case

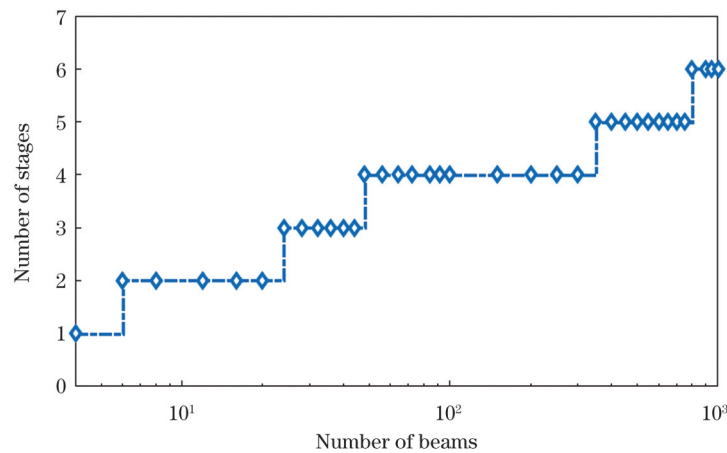


图 8 不同光束数目下的最优级数

Fig. 8 Optimal number of stages for different numbers of beams

4 验证实验

基于上述对于分级 SPGD 算法理论和仿真的描述,设计了光学相控阵系统进行实验,对分级 SPGD 算法进行原理验证,级数为两级。实验参数如表 2 所示。实验系统如图 9 所示(以 16 路为例)。

在 16 路光束相控阵系统中,激光器出射的激光经过调制器、分束器后分为 16 路激光,每一路激光经过一个电光移相器,用于相位的控制,然后通过准直器发射,形成 4×4 光束阵列。多光束阵列经过第一分束镜反射后进入监测后光路系统。在后光路系统中,光束阵列经过第二分束镜后得到两级光束,透射光束为第一级光束,反射光束为第二级光束。第一级光束通过

表 2 实验参数

Table 2 Experiment parameters

Parameter	Value
Wavelength /nm	1550
Number of beams	8/12/16/32
Number of stages	2
Loop execution speed /kHz	5.5
Emitting power per beam /mW	50

反射镜反射后通过 2×2 透镜阵列进行聚焦,每 4 路光束对应一个聚焦透镜,最终有 4 路光信号分别耦合到 4 根光纤中;第二级光束则通过单透镜聚焦,耦合到一根光纤中。第一级和第二级光束合束信号反馈值由光电探测器获取,并进入现场可编程门阵列(FPGA)控

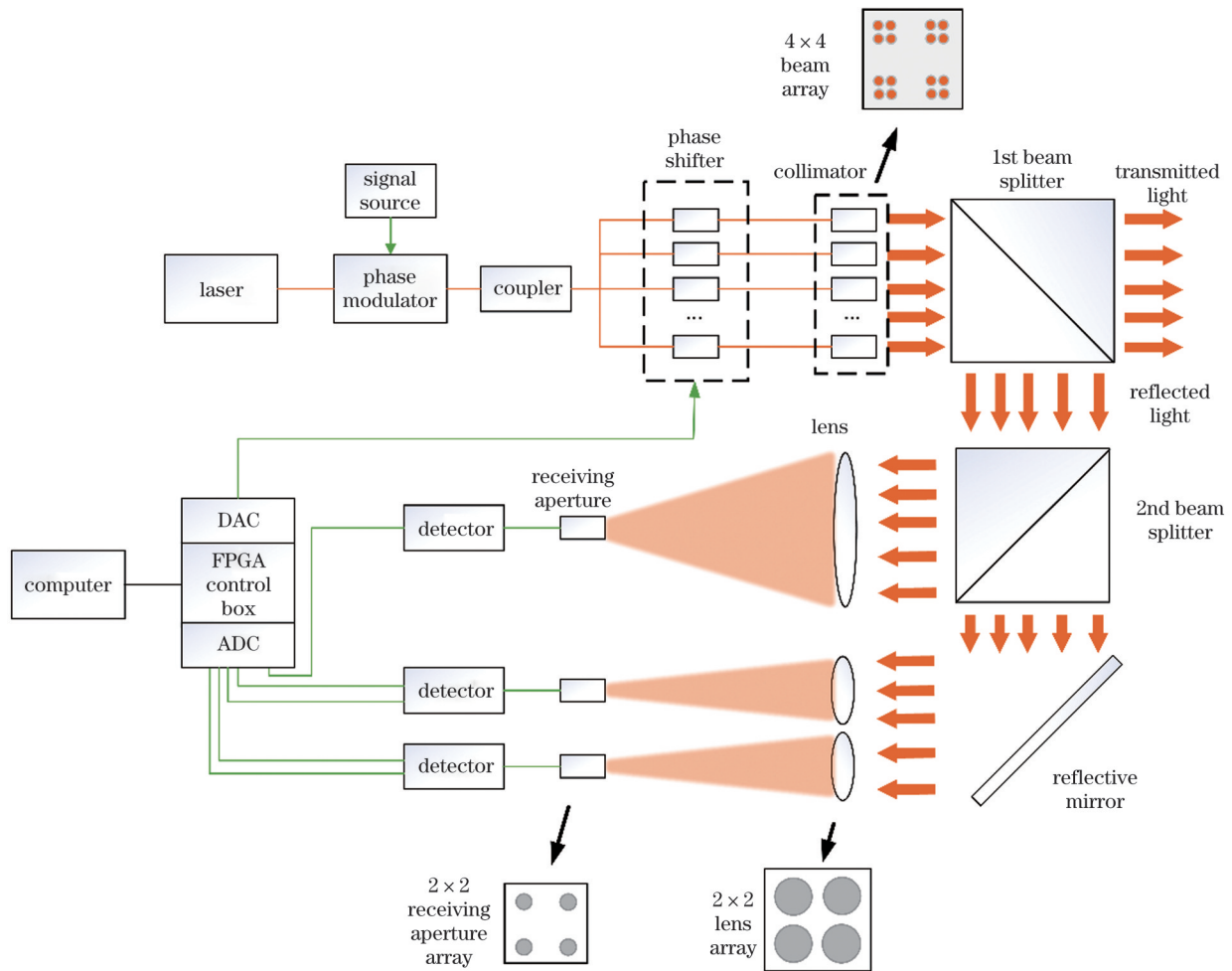


图9 基于两级SPGD算法的光学相控阵实验系统

Fig. 9 Experimental setup of optical phased array system based on 2-stage SPGD algorithm

制箱的模拟-数字转换器(ADC)采集端,作为两级SPGD算法的评价函数。控制箱的数字-模拟转换器(DAC)连接了每一个移相器,用于施加控制相位的电压信号。

首先基于上述搭建的光学相控阵系统,对两级SPGD算法进行可行性验证。算法的执行速率为5.5 kHz,迭代一步的时间为180 μ s,设置合适的两级微扰电压,闭环开启时第一级和第二级的光信号如图10所示。图10(a)~图10(d)为第一级中16路光束在透镜阵列的作用下形成的4路光信号,可以看出第一级的四组合束功率闭环后都迅速增大至稳定状态。图10(e)中第二级16路总光束的合束信号也得到了锁定,达到了稳定的高幅值状态,从而证明了分级SPGD算法的可行性,即能够实现多光束的相位锁定。

在证明了两级SPGD算法的可行性后,在相同的实验条件下使用常规单级SPGD算法进行锁相,记录其迭代步数和收敛时间,与两级SPGD算法的数据进行对比。实验测得常规单级SPGD算法进行锁相的总合束光信号上升时间为115 ms,迭代步数约为640.5步。相比较而言,两级SPGD算法闭环的

总合束光信号上升时间为91.5 ms,迭代步数约为507.5步,可见分级算法将锁相迭代步数减少了20.8%。

对8路(4 \times 2阵列)、12路(3 \times 4阵列)、32路(8 \times 4阵列)光束分别使用单级和两级SPGD算法进行锁相,光束阵列如图11所示,得到不同光束数目下的锁相迭代步数情况,如图12所示。从图12的数据可以看出,在光束数目较少时两种算法的效果相当,但随着光束数目的增多,两级SPGD算法的速度效果越来越明显,在32路时分级算法将迭代步数降至688.7步,为单级算法(1155.5步)的59.6%。由此可见,在阵元数目较多的光学相控阵中,使用分级SPGD算法可以提高多光束相位锁定速度,具有十分重要的意义。

5 结 论

在常规SPGD算法的基础上提出了性能更加优越的分级SPGD算法,能够在大规模光学相控阵的条件下,实现更加快速的收敛。分级SPGD算法的核心是对相控阵的多阵元光束进行分组,添加多级微扰,在局部相位补偿的同时,全局也可实现相位调控。本文介

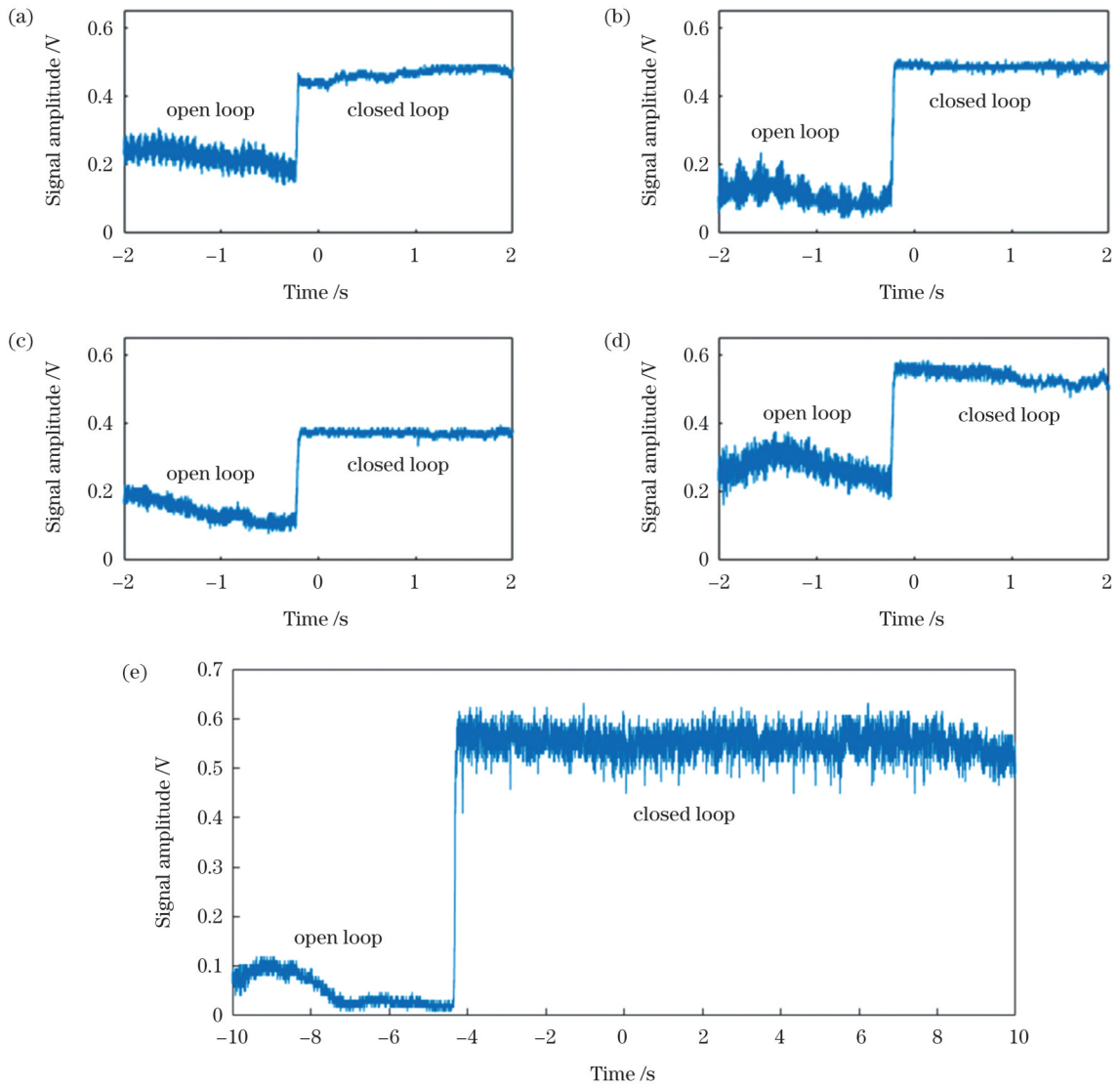


图 10 实验中第一级和第二级的监测光信号。(a)~(d)第一级四组监测光信号;(e)第二级监测光信号
Fig. 10 Monitoring signals of two stages. (a)~(d) Light signal of the 1st stage; (e) light signal of the 2nd stage

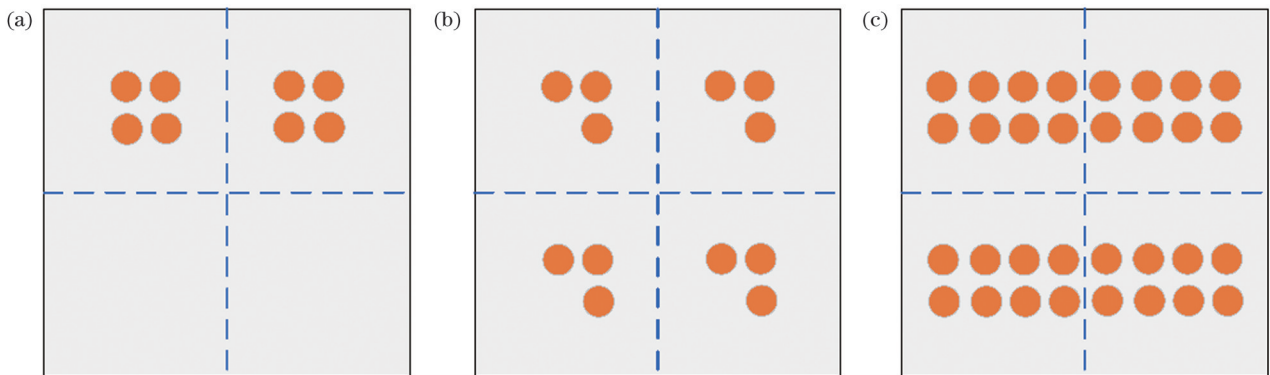


图 11 光束阵列截面图。(a)8路(4×2阵列);(b)12路(3×4阵列);(c)32路(8×4阵列)

Fig. 11 Cross section diagrams of beam arrays. (a) 8 beams (4×2 array); (b) 12 beams (3×4 array); (c) 32 beams (8×4 array)

绍了分级算法的原理和流程,并进行了仿真模拟。结果表明,使用分级 SPGD 算法更加具有优越性,并且光束数目越大,效果越明显,在 1000 路光束时,使用分级 SPGD 算法将闭环锁相步数减少了 98.87%。通过仿真给出了不同光束数目情况下分级 SPGD 算法的最优

级数。最后,搭建了光学相控阵实验系统,验证了分级 SPGD 算法的可行性。实验结果表明,在 8/12/16/32 路光束的情况下,分级 SPGD 算法都能够进行相位锁定,相比常规单级算法使用的迭代步数更少,最高可以将步数降低到单级算法步数的 59.6%。光学相控阵

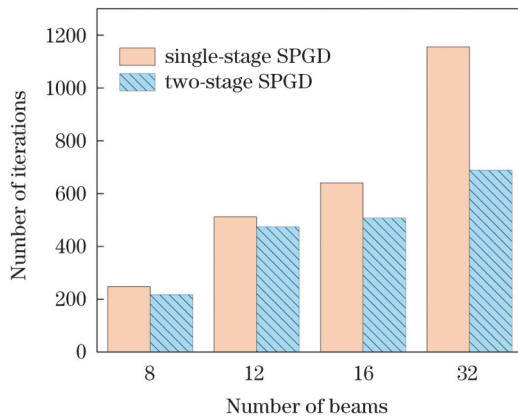


图 12 不同光束数目下的迭代步数实验结果

Fig. 12 Number of iterations for different numbers of beams in experiments

在实际应用中可以将阵元进行分配用于不同终端的同时互联,而分级 SPGD 算法的特性与之十分契合,对局部光束和整体光束都能进行相位调控,使光学相控阵的多光束可分可合,具备局部单独使用和整体使用的切换功能。本研究对于大规模光学相控阵的相位控制技术具有积极意义。

参 考 文 献

- [1] McManamon P F, Dorschner T A, Corkum D L, et al. Optical phased array technology[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(2): 268-298.
- [2] Vorontsov M A, Sivokon V P. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(10): 2745-2758.
- [3] 李兴珂, 何云涛. 相干合成中的随机并行梯度下降算法性能研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1201001.
Li X K, He Y T. Performance of stochastic parallel gradient descent algorithm in coherent combination[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1201001.
- [4] 胡栋挺, 申文, 马文超, 等. 一种快速收敛的随机并行梯度下降算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 122201.
Hu D T, Shen W, Ma W C, et al. Fast convergence stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 122201.
- [5] Huang W R, Montoya J, Kansky J E, et al. High speed, high power one-dimensional beam steering from a 6-element optical phased array[J]. Optics Express, 2012, 20(16): 17311-17318.
- [6] Li L T, Wang C Y, Zhang G P, et al. Performance optimization of liquid crystal optical phased array beam based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11205: 112051X.
- [7] 王晓斌, 刘春波, 刘如愿, 等. 一维光纤相控阵多光束快速扫描 [J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1705001.
Wang X B, Liu C B, Liu R Y, et al. High-speed multibeam steering of one-dimensional optical fiber phased array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1705001.
- [8] 王晓斌, 曹阳, 刘春波, 等. 硅基光学相控阵芯片相位噪声补偿研究[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2323001.
Wang X B, Cao Y, Liu C B, et al. Phase noise compensation of silicon-based optical phased array chip[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2323001.
- [9] Shi Y B, Si L, Feng G B, et al. Numerical and experimental study on liquid crystal optical phased array beam steering combined with stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Optik, 2016, 127(3): 1450-1454.
- [10] 张森, 张军伟, 母杰, 等. 基于随机并行梯度下降算法的相干合成动态相差控制与带宽分析[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0514003.
Zhang S, Zhang J W, Mu J, et al. Dynamical phase error control and bandwidth analysis for coherent beam combination based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0514003.
- [11] 陈波, 李新阳. 基于随机并行梯度下降算法的自适应光学系统带宽[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030101.
Chen B, Li X Y. Bandwidth of adaptive optics system based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030101.
- [12] Chang H X, Su R T, Long J H, et al. Distributed active phase-locking of an all-fiber structured laser array by a stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm[J]. Optics Express, 2022, 30(2): 1089-1098.
- [13] 方舟, 徐项项, 李鑫, 等. 自适应增益的 SPGD 算法[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 20200274.
Fang Z, Xu X X, Li X, et al. SPGD algorithm with adaptive gain [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 20200274.
- [14] 吴健, 杨慧珍, 龚成龙. 基于分段随机扰动幅值的随机并行梯度下降算法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0712001.
Wu J, Yang H Z, Gong C L. Research of stochastic parallel gradient descent algorithm based on segmentation random disturbance amplitude[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 0712001.
- [15] Che D B, Li Y Y, Wu Y H, et al. Theory of AdmSPGD algorithm in fiber laser coherent synthesis[J]. Optics Communications, 2021, 492: 126953.
- [16] Zhang H, Xu L, Guo Y F, et al. Application of AdamSPGD algorithm to sensor-less adaptive optics in coherent free-space optical communication system[J]. Optics Express, 2022, 30(5): 7477-7490.
- [17] Chen J Y, Liu J S, Han L, et al. Theory of AdaDelSPGD algorithm in fiber laser-phased array multiplex communication systems[J]. Applied Sciences, 2022, 12(6): 3009.
- [18] Weyrauch T, Vorontsov M, Mangano J, et al. Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km[J]. Optics Letters, 2016, 41(4): 840-843.
- [19] 栗荣涛, 马阎星, 奚加超, 等. 60 路大阵列光纤激光高效相干合成[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 331.
Su R T, Ma Y X, Xi J C, et al. 60-channel large array element fiber laser high efficiency coherent synthesis[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(1): 331.
- [20] 常洪祥, 常琦, 侯天悦, 等. 百束规模光纤激光相干合成[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0916002.
Chang H X, Chang Q, Hou T Y, et al. Laser coherent synthesis of 100-beam-sized fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0916002.
- [21] Leeb W R, Neubert W M, Kudiella K H, et al. Optical phased array antennas for free space laser communications[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2210: 14-29.
- [22] 闫爱民, 职业楠, 孙建峰, 等. 光学相控阵扫描技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 102801.
Yan A M, Zhi Y N, Sun J F, et al. Recent development of optical phased array scanning technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 102801.
- [23] Wang C M, Peng Z, Liu Y, et al. Radial sub-aperture coherence method used to achieve beam steering with high precision and stability[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 6331-6347.
- [24] Rhee H W, You J B, Yoon H, et al. 32 Gbps data transmission with 2D beam-steering using a silicon optical phased array[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(13): 803-806.
- [25] Wang C M, Chen W, Zhao Z W, et al. Quantitative error analysis for non-mechanical phase-controlled beam steering based on symmetrical radial sub-aperture coherence algorithm[J]. Liquid

- Crystals, 2021, 48(3): 361-367.
- [26] Ahn H K, Kong H J. Cascaded multi-dithering theory for coherent beam combining of multiplexed beam elements[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12407-12413.
- [27] Su R T, Zhang Z X, Zhou P, et al. Coherent beam combining of a fiber lasers array based on cascaded phase control[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(22): 2585-2588.

Study on Multi-Stage SPGD Algorithm of Large Scale Optical Phased Array

Han Ronglei^{1,2}, Sun Jianfeng^{1,3*}, Hou Peipei¹, Dong Fang¹, Xu Lingling^{1,2}, Zhang Zhengwei¹, Jiang Yuxin^{1,2}, Ren Weijie^{1,2}, Cong Haisheng^{1,2}, Zhang Longkun¹, Li Chaoyang¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Spaceborne Laser Engineering Department, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract

Objective In the process of space laser communication networking, optical phased array (OPA) can replace the traditional mechanical turntable to realize the lightweight and miniaturization of laser terminals, and can quickly switch links among different terminals. The space laser communication network based on optical phased array will be the inevitable trend of the future development. In OPA technology, it is necessary to ensure the same phase of all the beams split from the same laser source. Therefore, the monitoring part is set to obtain the phase of beams to do the phase locking. Considering a large number of beams, it is not practical to calculate the phase directly, so it is suitable to use iterative algorithm to calculate the compensation. At present, there are many algorithms in the field of multivariable control, and stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm has more advantages in convergence speed and effect, but with the increase of the number of OPA elements, the convergence speed of SPGD becomes significantly slower. There exist some optimized SPGD algorithms now, such as AdmSPGD, AdaDelSPGD and other schemes, which have optimized the step size, the gain parameter and other coefficients of SPGD, and improved the speed to a certain extent. In the experiments using SPGD algorithm, the largest number of beams in the array reported is written by the 107-channel fiber laser coherent synthesis based on SPGD algorithm. As the number of beams increases, the structure becomes more complex and the performance of the algorithm must be higher. Nowadays, OPA has been widely used in laser communication and lidar where there is always a large optical aperture and a large number of array elements are required. When the number of array elements reaches thousands, only optimizing the parameters of SPGD algorithm does not change the essence of control of all array elements based on one single evaluation parameter, which has limited performance improvement. Therefore, it is necessary to optimize the SPGD algorithm in a deeper level for the situation of large-scale array.

Methods In this study, based on the principle and convergence of conventional SPGD algorithm, a multi-stage SPGD algorithm for OPA with a large number of elements is proposed. Different from optimizing the parameters of SPGD algorithm, the beams of multiple array elements are divided into several stages, and there are groups in each stage. The perturbation phase of all the stages is added to the beams, then the phase locking of beams at each stage is made, and finally the phase of all the beams is locked. The corresponding phase adjustment is carried out by monitoring the change of the combined beam power of each stage and the change of the total combined beam power.

Results and Discussions It can be seen from the simulation results of two-stage SPGD and conventional single-stage SPGD algorithms under 64- and 100-beam conditions that the convergence speed of two-stage SPGD algorithm is significantly faster than that of conventional SPGD algorithm (Fig. 4). When the same standard deviation is reached, the number of iterations of the two-stage algorithm is reduced by 56.6% (64 beams) and 67.9% (100 beams) compared with single-stage SPGD (Table 1). Simulation results show that the number of iterations of single-stage SPGD algorithm increases rapidly with the increase in beam number and reaches 9522 for 1000 beams, while the number of iterations of two-stage SPGD for 1000 beams is 107.25 (Fig. 5). Using multi-stage SPGD algorithm, the number of iterations is reduced by 98.87%. The optimal number of stages for different number of beams is given (Fig. 8). In the experiment, an optical phased array system is built, and a two-stage SPGD algorithm is used to lock the phase of 16 beams. When the closed loop is on, the optical signals of the first and second stages increased rapidly to a stable state (Fig. 10), which proves that the multi-stage SPGD algorithm can realize the phase locking of beams. And the phase locking performances using single-stage SPGD and two-stage SPGD are compared under the conditions of 8/12/16/32 beams respectively. The results show that two algorithms have almost the same effect when the number of beams is small, but with the increase of the number of beams, the convergence speed of the two-stage SPGD algorithm becomes faster than that of the single-stage SPGD

algorithm. For 32 beams, the multi-stage algorithm reduces the number of iterations to 688.7, which is 59.6% of that of the single-stage algorithm (Fig. 12).

Conclusions Based on the conventional SPGD algorithm, a multi-stage SPGD algorithm with better performance is proposed, which can achieve faster convergence under the condition of large-scale OPA. The core of the multi-stage SPGD algorithm is to group the phased array beams and add multi-stage perturbation, which can realize the global phase control as well as the local phase compensation. In this paper, the principle and flow of multi-stage algorithm are introduced, and simulation is carried out. The results show that the multi-stage SPGD algorithm is more advantageous than the conventional one, and the larger the number of beams is, the more obvious the effect is. When the beam number is 1000, the multi-stage SPGD algorithm reduces the number of iterations by 98.87%, and the optimal number of stages of the multi-stage SPGD algorithm for different beam numbers is given. Finally, an OPA experimental system is built to verify the feasibility of the multi-stage SPGD algorithm. The experimental results show that the multi-stage SPGD algorithm can realize phase locking in the case of 8/12/16/32 beams, and has fewer iterations compared with the conventional single-stage algorithm. Especially, the number of iterations can be reduced to 59.6% of that of the single-stage algorithm for 32 beams. In the actual application, the elements of OPA can be divided to several groups to connect different terminals at the same time, and the multi-stage SPGD algorithm fits well with the requirements, which can adjust the phase of global and local beams. The research is of great significance to the development of phase control technology of large-scale OPAs.

Key words laser optics; optical phased array; multi-stage stochastic parallel gradient descent algorithm; phase control