

无波前探测自适应光学对光通信性能影响分析

牛超君 于诗杰 韩香娥

西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 自适应光学(AO)技术是缓解自由空间光通信(FSO)系统中大气湍流影响的有效途径之一,无波前探测能不依赖波前传感器直接对通信性能进行优化。对基于差分进化(DE)、随机并行梯度下降(SPGD)和模拟退火(SA)算法的无波前探测自适应光学技术在FSO系统中的应用过程进行模拟仿真,并对比较正前后不同湍流强度下FSO系统的耦合效率、误码率及光强起伏的变化情况,分析优化算法的畸变波前校正能力。结果表明三种算法均能有效提高FSO系统的通信性能,DE算法虽迭代速率较慢,但效果最优,尤其适合于强湍流情况。

关键词 自适应光学;无波前探测;自由空间光通信;大气湍流

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.080102

Analysis about Effect of Wavefront Sensorless Adaptive Optics on Optical Communication

Niu Chaojun Yu Shijie Han Xiang'e

School of Physics & Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract Adaptive optics (AO) technology is an effective way to alleviate the effect of turbulence on free space optical communication (FSO). A new adaptive compensation method can be used to optimize the communication performance without a wave-front sensor. The application process of the wavefront sensorless adaptive optics on FSO is simulated using the application of differential evolution (DE) algorithm, stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm and simulated annealing (SA) algorithm. Meanwhile, the wavefront correction capabilities are analyzed by comparison of the coupling efficiency, the error rate and the intensity fluctuation under different turbulence intensities before and after the correction in FSO system. The simulation results show that the three algorithms can effectively improve the communication performance of FSO systems, especially the DE algorithm with lower iteration rate but optimal effects. Therefore, DE is suitable for strong turbulence conditions.

Key words adaptive optics; wavefront sensorless detection; free space optical communication; atmosphere turbulence

OCIS codes 010.1300; 060.2605; 280.7060

1 引言

自适应光学(AO)能实现由湍流引起的波前畸变的校正,可用于自由空间光通信(FSO)系统中提高通信性能,但在大气光通信没有信标光的情况下,以及存在强闪烁现象的大气长程传输应用场景中,基于波前传感器的常规自适应光学控制技术的应用受到限制^[1]。无需波前传感的AO技术的研究由此受到研究人员的重视,该技术不需要对光束波前进行测量,只依赖接收端探测器接收到的光强计算所需优化的性能函数,利用优化算法即可直接优化。

目前国内外常用的优化算法包括随机并行梯度下降(SPGD)算法、模拟退火(SA)算法和遗传算法(GA)等。其中SPGD算法的应用较为普遍^[2-4],在通信上的应用也以SPGD为主^[5],少见关于SA算法和DE算法的

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-03-04; 网络出版日期: 2015-07-17

基金项目: 教育部博士点基金(20110203110009)

作者简介: 牛超君(1991—),女,博士研究生,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: niuchaojun123@163.com

导师简介: 韩香娥(1962—),博士,教授,主要从事光传输、散射方面的研究。E-mail: xehan@mail.xidian.edu.cn

讨论。国外已经开始了基于SPGD算法的FSO通信性能校正^[6],而国内仍然处于在优化算法在FSO中应用的可行性验证阶段,研究内容主要针对畸变波前的补偿,较少涉及优化算法对通信性能的改善情况的讨论。

本文针对大气湍流引起的FSO系统光纤耦合效率低、误码率(BER)高等实际问题,运用无波前探测的AO技术对光束畸变波前进行了校正,利用数值仿真的方法研究并比较了差分进化、随机并行梯度下降以及模拟退火这三种优化算法对湍流的抑制效果,分析比较了优化算法对FSO系统的通信性能的改善情况,为进行进一步的实验验证奠定了理论基础。

2 仿真模型

2.1 自由空间光通信系统

本文针对自由空间光通信中最基础的调制方式即开关键控(OOK)的光强调制/直接检测(IM/DD)方式开展研究,研究结果也可以扩展到其他光通信调制方式中。其系统结构如图1所示。

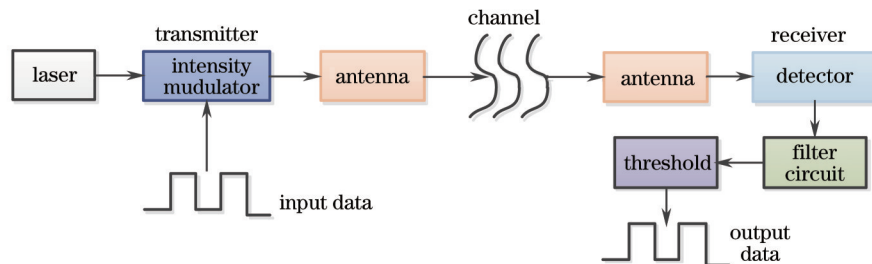


图1 IM/DD光通信系统原理图

Fig.1 Configuration of IM/DD optical communication system

2.2 湍流信道传输

大气湍流对传输光束的影响表现为光束漂移、强度起伏、光束扩展和到达角起伏,其物理本质是湍流引起传输光束波前相位的随机起伏。考虑到这一点,可以将传输路径上的大气湍流等效为简单的相位改变屏。因此可以将整个复杂的传输过程简化为真空传输改变光波振幅,相位屏改变光波的相位。

本文采用符合Kolmogorov统计规律的Zernike多项式展开法模拟大气湍流畸变波前相位屏。主要用湍流大气相干长度 r_0 来表征湍流的强弱。

2.3 无波前探测自适应光学在自由空间光通信中应用模型

光发射机发射激光信号经大气传输,由于受湍流的影响光束相位、光强均发生畸变,光接收机探测的信号较弱,当光强闪烁严重时,造成信噪比(SNR)低、误码率高从而探测不到信号。无波前探测自适应光学原理能够较好地对畸变波前进行校正,图2为无波前探测自适应光学在FSO系统中的应用模型。

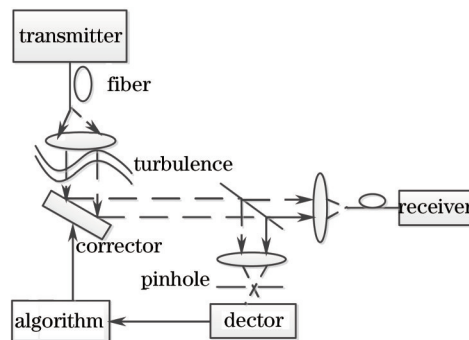


图2 FSO系统中无波前探测自适应光学技术应用模型

Fig.2 Applied model of FSO system without wavefront sensorless adaptive optics

在接收端探测器前放置相位校正器,根据探测器探测到的远场光斑计算其性能函数,利用优化算法计算波前校正器上加载的相位,从而对光束的畸变相位进行补偿,提高远场光束质量。本文采用光束的Strehl比(SR)作为性能评价函数。

3 几种优化算法的介绍

3.1 差分进化算法

差分进化算法^[7]是一种基于群体差异的启发式搜索算法,具有原理简单、受控参数少、稳健性强等特点。将 Zernike 多项式系数向量作为进化的个体,由 N_p (种群的规模)个 D (Zernike 阶数)维参数矢量 \mathbf{a}_j ($i=1,2,\dots,N_p; j=1,2,\dots,D$) 进行并行搜索。DE 的基本操作包括变异、交叉和选择三种操作。它的进化流程和交叉方式都与遗传算法大体相同,但在变异操作中使用差分策略,即利用种群中个体间的差分向量对个体进行扰动,实现个体变异。差分公式为

$$v_i(g+1) = a_{r_1}(g) + F \cdot [a_{r_2}(g) - a_{r_3}(g)], \quad (1)$$

式中 $i \neq r_1 \neq r_2 \neq r_3$, r_1, r_2, r_3 是产生的随机数,代表分别随机选择的个体, F 为缩放因子, $a_i(g)$ 表示第 g 代种群中第 i 个个体。

3.2 模拟退火算法

模拟退火算法^[8]仿照固体退火原理向着内能量逐步减小的方向在参数空间中搜索优化解。涉及到的主要运算有状态生成函数、接收准则、退温计算。第 k 次迭代时,SA 算法对波前校正器加载的扰动信号,即 Zernike 系数为

$$\Delta \mathbf{a}_i^{(k)} = \{\Delta a_1^{(k)}, \Delta a_2^{(k)}, \dots, \Delta a_N^{(k)}\}, \quad (2)$$

式中 t 为当前系统温度, $\Delta a_i^{(k)}$ 为算法在第 k 次迭代第 i 个 Zernike 多项式系数。 $\Delta a_i^{(k)}$ 之间相互独立并且服从伯努利分布,即各分量具有相同幅值及正负概率:

$$\begin{cases} P_r[\Delta a_j^{(k)}] = \begin{cases} 0.5, \Delta a_j^{(k)} = T_k \\ 0.5, \Delta a_j^{(k)} = -T_k \end{cases} \\ |\Delta a_j^{(k)}| = T_k, \quad j = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

式中 T_k 为当前退火温度, P_r 为 $\Delta a_j^{(k)}$ 取值概率。退温函数采用的是 $T_j = a \cdot T_i$, $0 < a < 1$ 。为了使算法在提高校正速度基础上能够减小陷入局部极值的概率,每迭代 20 次进行一次降温,每迭代 100 次进行一次升温。

3.3 随机并行梯度下降算法

SPGD 算法^[9]利用性能指标测量值的变化量与控制参数的变化量进行加载相位的梯度估计,以迭代方式在梯度下降方向上进行控制参数的搜索。第 k 次迭代时,Zernike 系数的计算公式为

$$\mathbf{a}^{(k+1)} = \mathbf{a}^{(k)} - \gamma \Delta \mathbf{a}^{(k)} \Delta J^{(k)}, \quad (4)$$

式中 γ 为经验参数,当 $\gamma > 0$ 时,评价函数 J 往极小化方向校正, $\gamma < 0$ 时, J 往极大化方向校正。现在常用的双向扰动 SPGD 算法收敛速度更快,其计算公式为

$$\begin{cases} \Delta J_+^{(k)} = J[\mathbf{a}^{(k)} + \Delta \mathbf{a}^{(k)}] - J[\mathbf{a}^{(k)}] \\ \Delta J_-^{(k)} = J[\mathbf{a}^{(k)} - \Delta \mathbf{a}^{(k)}] - J[\mathbf{a}^{(k)}] \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\Delta J_+^{(k)}$ 和 $\Delta J_-^{(k)}$ 分别为添加正向和负向扰动后的性能评价函数。

4 无波前探测自适应光学对通信性能的改善情况的仿真研究

首先认为大气通道中只有湍流造成的损耗,不考虑别的因素造成的损耗。其中湍流的产生是利用 15 阶 Zernike 多项式产生,并采用符合 Kolmogorov 模型的大气湍流畸变波前相位屏,共采用 4 个相位屏,相邻相位屏间距为 1.5 km,校正相位也是利用 Zernike 方法产生,因此算法直接控制的变量为 15 个 Zernike 系数,与以网格数为相位变量的区域校正法相比,控制的变量数大大减少。假设探测器是理想的,转换效率为 100%,并且通信系统的收发口径完全对准。本文涉及的数值计算中,关于湍流大气传输的参数和通信误码率仿真参数设置如表 1 所示。

光束的 SR 能够有效表征光束波前畸变程度,在波前校正中是较为常用的性能评价函数,故选用光束 SR 作为性能评价函数,它是指实际畸变波前远场光束中心光强 $I_0(x_0, y_0)$ 与理想平面波远场中心光强 $I_{\max}(x_0, y_0)$

之比,SR越大说明光束波前畸变越小,其定义形式为

表1 数值仿真参数

Table 1 Parameters of numerical simulation

Parameter of atmospheric propagation	Value
Wavelength λ /nm	1550
Aperture /mm	200
Grid of phase screen sizes	64×64
Beam waist/m	0.05
Propagation distance/km	6

$$R_s = \frac{I_0(x_0, y_0)}{I_{\max}(x_0, y_0)}. \quad (6)$$

一般情况下,FSO系统终端信号光要被耦合进单模光纤,所以单模光纤的耦合效率^[10]的提高,即进入光纤的平均能量与接收孔径平面能量的比值,对于自由空间光通信有着重要的意义。耦合效率可以表达为

$$J \propto \frac{\left| \iint A_f(r) M_0^*(r) d^2 r \right|^2}{\iint A_f(r) A_f^*(r) d^2 r \times \iint M_0(r) M_0^*(r) d^2 r}, \quad (7)$$

式中 $A_f(r)$ 是单模光纤光场强度的傅里叶变换, $M_0(r)$ 为焦面上的光场强度。可将SR简化为

$$R_s \propto |A_f(r_0)|^2, \quad (8)$$

式中 r_0 为单模光纤中心轴上的位置。

由(8)式看出,可以利用SR表征光纤的耦合效率,即远场光束SR越大,FSO系统接收端光纤耦合效率越高。

4.1 各算法参数的选取

由DE算法波前畸变校正原理可以看出,影响其校正效果的主要因素为变异过程中的缩放因子 F 、交叉过程中的交叉概率(CR)等,参考文献[2]及多次仿真发现合适的 F 选取空间为 $[0.5, 1]$, CR选取空间为 $[0.8, 1]$ 。SA算法中对校正速度和校正效果影响的是初始温度 T_0 、降温系数 a 及升温系数 b ,经多次验证发现 T_0 可取空间为 $[0.015, 0.035]$, a 的优选区间为 $[0.7, 0.95]$, b 的合适区间为 $[1.1, 1.3]$ 。SPGD算法的收敛速度和校正效果主要取决于随机扰动幅度 δ 和增益系数 γ 的大小。对于固定的 δ ,存在着最佳 γ 取值范围, γ 太小,收敛速度较慢; γ 太大,易陷入局部极值且性能指标曲线出现抖动现象。扰动幅度 δ 和增益系数 γ 的关系及其对校正效果和收敛速度的影响具体见文献[11]。本文在大量仿真结果基础上,优选出每一种算法的最佳参数。其中DE算法参数CR取1.0, F 取0.8; SA算法中 a 取0.9, b 取1.1, T_0 取0.03; SPGD算法中 δ 取0.035, γ 取350。

4.2 耦合效率的改善

由(8)式可知,可用SR表征光纤耦合效率,分别仿真了三种算法对接收端远场光束SR的校正过程,算法的迭代次数均为800次,结果如图3所示。

由图3(a)知DE算法虽然收敛较慢,但较为稳定,且最终校正效果最好,SA算法收敛最快。图3(b)中的值均是10次校正后的均值,其方差在 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 量级,具有统计意义,可以看出经校正后接收端SR都有了大幅提高,在湍流较弱时可校正接近于1,随着湍流增强校正效果变差,但仍比未校正时增加。因此,基于优化

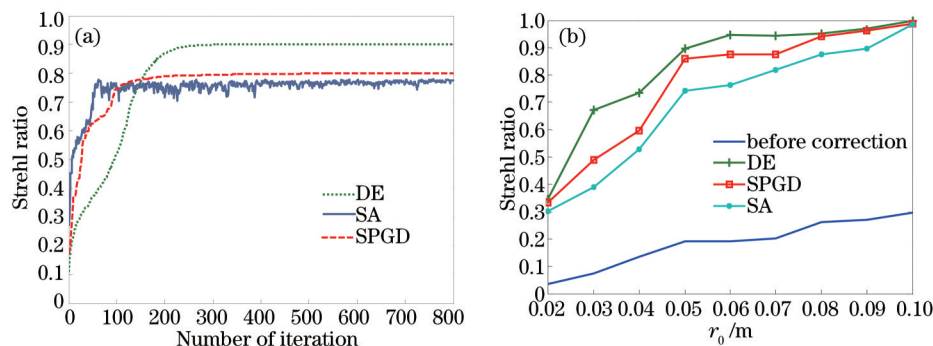


图3 校正结果。(a) $r_0=0.07$ m时SR变化; (b) 不同 r_0 下的SR
Fig.3 Correction effects. (a) SR correction with $r_0=0.07$ m; (b) SR versus r_0

算法的无波前探测自适应光学能实现FSO系统中畸变波前的有效校正。相同迭代次数下,DE算法的校正效果明显优于另外两种算法。

4.3 系统误码率的改善

一个OOK非相干解调系统误码率表示为^[12]

$$P_e = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\gamma_{\text{SNR}}}}{2} \right) + \frac{1}{2} \exp \left(-\frac{\gamma_{\text{SNR}}}{4} \right), \quad (9)$$

式中 $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为余补误差函数, γ_{SNR} 为接收端信噪比。不考虑光强起伏时,信噪比为光接收机的信号对噪声平均功率的比值。考虑光强起伏时,信噪比为光接收机的信号平均功率与噪声平均功率和光强起伏方差之和的比值。下面计算了添加与理想光功率比值为0.01的噪声功率、 $r_0 = 0.02 \sim 0.10$ m时,分别基于三种算法的无波前自适应校正前后FSO系统误码率的变化情况,结果如图4所示。

由图4可知,通过三种算法的自适应校正后误码率都有所下降,DE算法效果最好,除了在 $r_0 = 0.02$ m 较强湍流下校正后误码率为 10^{-4} 左右外,其余湍流强度下对FSO系统进行自适应校正后误码率均在 10^{-6} 以下,满足通信的要求。因此,利用优化算法对FSO系统进行校正后可增强其可靠性,极大减小系统通信中断的可能。

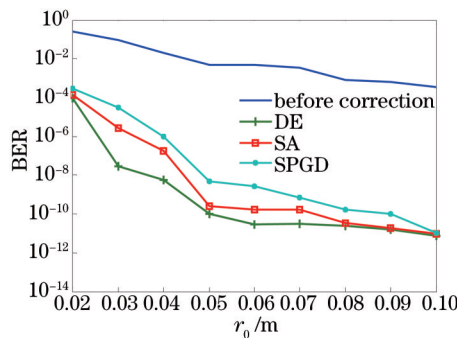


图4 不同 r_0 下算法校正前后误码率变化

Fig.4 BER versus r_0 before and after correction

4.4 光强起伏的抑制

在不同的湍流强度下,取 $r_0 = 0.01$ m 和 $r_0 = 0.07$ m 分别代表弱湍流和较强湍流,对加入基于三种优化算法的自适应光学校正前后接收端探测器处的光强起伏情况进行仿真,其强度起伏方差如表2所示,可以看出,算法校正后光强起伏均得到了一定改善,其中DE算法的效果较优。

表2 矫正前后光强起伏方差

Table 2 Variance of intensity fluctuation density before and after correction

Atmospheric coherent length	Algorithm	Variance of intensity fluctuation density before correction	Variance of intensity fluctuation density after correction
0.01 m	DE	1.9386	0.3592
	SPGD	1.9386	0.7830
	SA	1.9386	0.5802
0.07 m	DE	0.4227	0.0038
	SPGD	0.4227	0.1084
	SA	0.4227	0.0130

4.5 三种算法相位校正性能比较

由以上分析可知,基于DE算法、SPGD算法、SA算法的自适应技术均能提高FSO系统的通信性能,下面分别从迭代次数、对相同湍流强度下校正效果及不同湍流下信噪比的改善上对这三种算法进行了对比:

1) $r_0 = 0.07$ m 时,SA算法收敛较快,DE算法收敛最慢但较为稳定。从迭代速率上,DE算法最慢,迭代一次约为SPGD算法的10倍,SA算法迭代一次需SPGD算法的两倍。

2) $r_0 = 0.02 \sim 0.1$ m 时,强湍流会使校正效果不甚理想,但也能达到原光强的10倍左右。三种算法大多数情况下均可将FSO系统误码率降至 10^{-6} 以下,DE算法校正效果最优。

3) 通过校正前后光强起伏方差对比可知, $r_0=0.01$ m 和 $r_0=0.07$ m 时光强起伏均得到一定的改善, 其中 DE 算法效果最好。可以考虑在发射端进行预校正。

5 结 论

介绍了无波前探测自适应光学技术在 FSO 系统中的应用模型, 数值模拟了基于 DE、SPGD 及 SA 算法的无波前探测自适应光学技术对湍流引起的畸变波前校正过程, 从系统耦合效率、误码率及光强起伏三个方面对比分析了对 FSO 系统性能的校正效果。验证了三种算法的有效性, 并为实际应用中算法的选取提供了一定的理论依据。

参 考 文 献

- 1 Yang Huizhen, Wu Jian, Gong Chenglong. Model-based sensorless adaptive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0801002.
杨慧珍, 吴 健, 龚成龙. 基于模型的无波前探测自适应光学系统[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0801002.
- 2 Mu Jie, Jing Feng, Wang Xiao, *et al.*. Error control of piston and tilt based on SPGD in coherent beam combination[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0602002.
母 杰, 景 峰, 王 道, 等. 相干合成中基于 SPGD 算法的平移误差和倾斜误差控制[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0602002.
- 3 Chen Bo, Li Xinyang. Bandwidth of adaptive optics system based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030101.
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.
- 4 Wu Jian, Yang Huizhen, Gong Chenglong. Research of stochastic parallel gradient descent algorithm based on segmentation random disturbance amplitude[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0712001.
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.
- 5 Luo Wen, Geng Chao, Li Xinyang. Simulation and experimental study of single-mode fiber coupling efficiency affected by atmospheric turbulence aberration[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0606001.
罗 文, 耿 超, 李新阳. 大气湍流像差对单模光纤耦合效率的影响分析及实验研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0606001.
- 6 Thomas Weyrauch, Mikhail A Vorontsov. Free-space laser communications with adaptive optics: Atmospheric compensation experiments[J]. Journal of Optical and Fiber Communications Reports, 2004, 1(4): 355-379.
- 7 Yang Qiwen, Cai Liang, Xue Yuncan. A Survey of differential evolution algorithms[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 21(4): 506-513.
杨启文, 蔡 亮, 薛云灿. 差分进化算法综述[J]. 模式识别与人工智能, 2008, 21(4): 506-513.
- 8 Liu Ying, Ma Jianqiang, He Ting, *et al.*. Hybrid simulated annealing-hill climbing algorithm for fast aberration correction without wavefront sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 213-219.
刘 莹, 马剑强, 何 挺, 等. 模拟退火-爬山混合算法用于无波前传感器快速像差校正[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 213-219.
- 9 M A Vorontsov, GW Carhart. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient descent optimization. Opt Lett, 1997, 22(12): 907-909.
- 10 Li Zhaokun. Research of Adaptive Optics for Atmospheric Turbulence Compensation in Free Space Optics Communication [D]. Jilin: Jilin University, 2014.
李兆坤. 自适应光学在自由空间光通信大气补偿中的应用研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2014.
- 11 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(8): 1355-1360.
杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析[J]. 光学学报, 2007, 27(8): 1355-1360.
- 12 Wu Yunyun, Li Xinyang. Research and simulation about effect of adaptive optics on atmospheric optical communication [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(s1): s100212.
武云云, 李新阳. 自适应光学对大气激光通信质量的影响研究与仿真[J]. 光学学报, 2011, 31(s1): s100212.

栏目编辑: 史 敏