

基于自适应模拟退火算法的光学模式转换技术

李路遥 闫连山 叶佳 郑春雨 潘炜 罗斌

西南交通大学信息科学与技术学院信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031

摘要 模式转换技术是光学模分复用系统的关键技术之一,用于实现任意模式之间的相互转换,是模分复用系统实现信道接入、交换及分插复用的基础。采用纯相位空间光调制的方式实现光学模式转换,通过改变加载于空间光调制器上的相位全息图,控制不同模式的产生。对相位全息图产生算法进行了改进,采用自适应的模拟退火算法,结合图形处理器并行计算,与传统的模拟退火算法相比,运算效率提升7倍以上。并搭建了模式转换系统实验平台,得到的实验结果验证了算法的有效性。

关键词 光通信; 模分复用; 模式转换; 空间光调制器; 模拟退火

中图分类号 O438.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1206004

Mode Conversion Technology Based on Adaptive Simulated Annealing Algorithm

Li Luyao Yan Lianshan Ye Jia Zheng Chunyu Pan Wei Luo Bin

Center for Information Photonics and Communications, School of Information Science and Technology,
Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

Abstract The mode conversion technology is one of the key technologies of the mode division multiplexing, which can realize the transformation between arbitrary optical modes. Moreover, it is the basis for the realization of channel access, switching and multiplexing. A spatial light modulator is used to achieve different mode distributions. The algorithm to generating phase hologram for mode conversion is improved based on spatial light modulator. By using the adaptive simulated annealing algorithm with graphics processing unit parallel computing, a more than seven fold increase in the computational efficiency of the simulated annealing algorithm is obtained. Finally, a mode conversion platform is established, and the experiment is carried out to prove the effectiveness of the proposed method.

Key words optical communications; mode division multiplexing; mode conversion; spatial light modulator; simulated annealing

OCIS codes 060.5060; 060.4230; 060.4510

1 引 言

随着云计算、大数据等技术的广泛应用,以及通信骨干网业务量的不断增加,提高光纤通信系统传输容量的各种复用技术得到了业界的广泛关注。模分复用技术(MDM)利用光纤中的不同模式作为独立信道传输数据信息,与传统的复用技术相结合可以提高系统容量^[1]。MDM技术的实现建立在大量的不同阶数光场模式之上,因此研究如何实现任意光纤模式的相互转换是实现多模传输的关键问题之一。目前成熟的模式转换技术主要包括蚀刻玻璃法、相位板法、长周期光纤光栅法、平面光波导(PLC)耦合器法、光子灯笼法及空间光调制法等^[2-9]。空间光调制器(SLM)由于其可重构性,在不改变光路结构的情况下即能实现模式重

收稿日期: 2016-07-08; **收到修改稿日期:** 2016-08-05

基金项目: 国家杰出青年基金(61325023)、国家自然科学基金(61335005)

作者简介: 李路遥(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤模分复用方面的研究。

E-mail: 315655835@qq.com

导师简介: 闫连山(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光子学与通信、光纤传感与检测方面的研究。

E-mail: lsyan@home.swjtu.edu.cn(通信联系人)

设,完成灵活的系统重构,因此本文主要研究基于 SLM 的模式转换技术。

目前空间光调制器以纯相位型居多,通过设计 SLM 中液晶板上加载的相位信息便可在远场得到不同的场分布。相关研究人员已经提出了二进制的相位全息图^[2],并使用模拟退火算法对初始的二进制相位全息图进行优化^[8],实现了基模高斯光束到部分高阶模式的转换。Lan 等^[10]在 2015 年提出了一种高精度任意模式转换技术,针对不同的输入模式利用模拟退火的全局搜索特性对 SLM 上的相位全息图进行设计,实现了任意模式之间的高精度转换。但是由于模拟退火算法的时间消耗随着相位全息图的分辨率增加呈现指数性增长,在进行高分辨率全息图的设计时,算法的时耗过长。本文针对基于 SLM 的光学模式转换问题,提出了一种改进型的模拟退火算法。该算法能根据算法运行状态的不同,自适应地控制单次循环内扰动的相位点数和相位全息图的退火范围,结合图形处理器(GPU)并行计算方式,算法效率提升超过 7 倍。

2 模式转换原理

模式转换系统以 SLM 为核心,构建了一个完整的 4- f 空间滤波系统^[9,11]。如图 1 所示,P1-P4 代表四个不同的光学平面,整个系统包括两个透镜 L1,L2(焦距均为 f)、输入光纤(少模或多模)、输出光纤(少模或多模)及 SLM。其中 $\varphi_i(r_0, \theta_0)$ 为输入的光场复振幅, $\varphi_f(r_f, \theta_f)$ 为 P2 平面上的光场复振幅, $t(r_f, \theta_f)$ 为 SLM 传递函数, $\varphi'_f(r_f, \theta_f)$ 为 P3 平面上光场复振幅, $\varphi_o(r, \theta)$ 为转换完毕后输出光场复振幅。根据透镜的傅里叶变换(FFT)性质,P1 面上出射的模式复振幅 $\varphi_i(r_0, \theta_0)$ 经过透镜 L1 的傅里叶变换作用,在 P2 面上复振幅满足^[12]

$$\varphi_f(r_f, \theta_f) = \text{FFT}[\varphi_i(r_0, \theta_0)]。 \quad (1)$$

经过传递函数为 $t(r_f, \theta_f)$ 的 SLM 相位调制后成为 $\varphi'_f(r_f, \theta_f)$,两者关系为

$$\varphi'_f(r_f, \theta_f) = \varphi_f(r_f, \theta_f) \cdot t(r_f, \theta_f)。 \quad (2)$$

SLM 调制后的 $\varphi'_f(r_f, \theta_f)$ 经过 L2 的傅里叶变换后,在 P4 平面上得到远场的光斑的复振幅分布 $\varphi_o(r, \theta)$ 为

$$\varphi_o(r, \theta) = \text{FFT}[\varphi'_f(r_f, \theta_f)]。 \quad (3)$$

$\varphi_D(r, \theta)$ 为目标模式 LP _{m} 的场分布表达式,具体形式为^[13]

$$\varphi_D(r, \theta) = L_{n-1}^m(\omega^2 r^2) \cdot (\omega r)^m \cdot \exp(-\omega^2 r^2 / 2) \begin{cases} \cos(m\theta) \\ \sin(m\theta) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 m, n 为对应的模式数, $L_n^m(x)$ 为广义拉盖尔多项式, r, θ 为对应圆柱坐标, $\cos(m\theta)$ 和 $\sin(m\theta)$ 代表两个简并解, ω 定义为

$$\omega = \sqrt{k \cdot NA / a}, \quad (5)$$

式中 a 为光纤直径, NA 为光纤数值孔径, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为输入光波长。

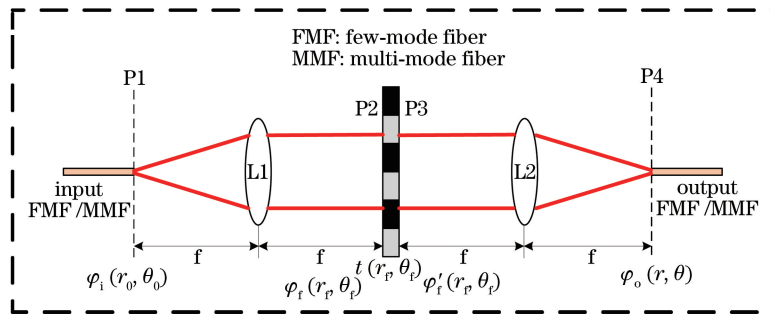


图 1 4- f 模式转换系统原理图

Fig. 1 Schematic of 4- f mode conversion system

因此 SLM 的传递函数可以由目标模式的傅里叶逆变换与输入模式的傅里叶变换之比得到,并且 SLM 是纯相位调制,对上述比值取相位,即

$$\phi(r_f, \theta_f) = \arg \left\{ \frac{\text{IFFT}[\varphi_D(r, \theta)]}{\text{FFT}[\varphi_i(r_0, \theta_0)]} \right\}, \quad (6)$$

便可得到加载于 SLM 上的相位全息图^[13]。

3 针对光学模式转换问题的自适应模拟退火算法

采用上述方法得到的相位全息图,忽略了理想的 SLM 传递函数中的幅度信息,因此在转换精度上存在失真。需要使用一种全局优化算法对初始的相位全息图进行优化,利用相邻像素点的像素变化弥补丢失的幅度信息,使用纯相位的调制方法实现高精度的光学模式转换。

模拟退火(SA)算法最早由 Kirkpatrick 于 1983 年提出,是一个寻找目标函数的全局最优解的算法。SA 算法不依赖对初值解的选取,能够在任意的初始条件下寻找目标的最优解,在初始温度足够大的情况下一定可以找到全局最优解^[14-16]。

SA 算法由两层循环控制,外循环进行的是降温过程,给定一个初始的温度 T_0 和小于 1 的温度衰减因子 α ,使用变量 k 表示外循环的循环次数, T_k 表示第 k 次循环中的系统温度,每一次外循环后系统根据降温系数进行降温,因此 T_k 满足

$$\begin{cases} T_k > 0 \\ \lim_{k \rightarrow \infty} T_k = 0 \\ T_k = \alpha^k T_0 \end{cases} \quad (7)$$

在内循环中,SA 算法可由当前解产生新解,并可分别计算相对应的目标函数值。在求取最小值问题中,若目标函数值减小,则认为新解比当前解效果好,而若目标函数值增大,则按照传统的优化算法,新解应当是被抛弃的,系统会将当前解作为目标函数最小值对应的自变量作为最终的输出结果,从而陷入了局部最优解。若在 SA 算法中加入判断条件,便对可能变差的解进行概率性接收,这个接收概率与当前温度相关。按照 Metropolis 接收准则:

$$P = \begin{cases} \exp\{-[f(\omega_{\text{new}}) - f(\omega_{\text{old}})]/t_k\}, & f(\omega_{\text{new}}) - f(\omega_{\text{old}}) > 0 \\ 1, & f(\omega_{\text{new}}) - f(\omega_{\text{old}}) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中 $f(x)$ 为目标函数, ω_{new} 为新解, ω_{old} 为当前解,将 SA 算法引入模式转换系统中,则可将相位全息函数 $\phi(r_f, \theta_f)$ 对应 SA 算法中每次循环的解,新解的目标函数可用转换模式与理想模式的相关系数代替,即^[8]

$$\eta = \frac{\left| \iint \varphi_o(r, \theta) \cdot \varphi_D(r, \theta) ds \right|}{\iint |\varphi_o(r, \theta)|^2 ds \cdot \iint |\varphi_D(r, \theta)|^2 ds} \quad (9)$$

式中 η 代表模式转换系统的转换效率, η 越大转换精度越高,因此优化算法的目标就是寻找一组最优的相位全息函数使得转换效率 η 达到最大值^[13,17],具体算法如下。

1) 在算法执行开始阶段,初始解设置为对应目标场的二进制相位函数并设置初始温度和温度衰减因子。

2) 在每次内循环中随机改变相位函数中一个像素的值,在 0 或 π 之间转换,即像素点为 0 则用 π 代替,像素点为 π 则用 0 代替。

3) 像素值反转后得到新的相位函数,代入目标函数中求得转换效率的值。

4) 依据判断准则计算概率接收或拒绝时当前的像素值的改变量。

5) 内循环结束后进行降温操作,重复上述过程,最终计算出符合要求的相位全息函数。

采用模拟退火的方法对初始的二进制相位全息图进行优化可以实现高精度的任意模式转换,但是算法的运行时间根据相位全息图分辨率不同需要几十分钟到几个小时不等。因此提出了一种自适应的改进 SA 算法,对原始 SA 算法中相位退火范围和单次扰动规则进行改动,定义单次扰动数量为

$$\begin{cases} f_{\text{num}} = \max\{1, \text{round}(\kappa T_0)\} \\ f_{\text{bound}} = \max\{\omega_D, \text{round}(\epsilon T_0 \cdot N)\} \end{cases} \quad (10)$$

式中 f_{num} 为单次扰动点数, f_{bound} 为 SA 扰动的邻域范围,round() 为取近似整数, ω_D 为目标模式的模场半径, κ 和 ϵ 是自定义的自适应强度, N 为需要优化相位区域的横向或纵向点数。(10)式将扰动点数与扰动领域区间与退火温度联系在一起,温度较高时扰动区间大,扰动点数多,可以方便算法快速搜索收敛区间,而随着温度降低,算法的扰动点数减少,区间缩小,进入细节优化阶段,此时可进一步提高优化结果。表 1 给出了

基于模拟退火方法产生的任意模式转换结果图,输入模式分别为 $LP_{12}, LP_{02}, LP_{23}, LP_{01}, LP_{51}$,输出模式分别为 $LP_{11}, LP_{22}, LP_{04}, LP_{15}, LP_{32}$ 。

表 1 基于模拟退火任意模式转换结果图
Table 1 Results of mode conversion based on SA

Output mode	Input mode				
	LP_{12}	LP_{02}	LP_{23}	LP_{01}	LP_{51}
LP_{11}					
LP_{22}					
LP_{04}					
LP_{15}					
LP_{32}					

表 2 与表 3 分别为不同输入输出间对应的模拟退火产生的相位全息图以及不同模式间相互转换的效率。通过采用 SA 对简单二进制相位进行优化,可以明显提高模式之间的转换效率,在以上 25 组模式转换实验中,最高转换效率达到 98.01%,最低转换效率为 70.47%,这是由于 SLM 工作在纯相位模式下,未对输入模式进行调幅操作,因此不可避免地产生误差。

表 2 模拟退火产生的任意模式转换相位全息图
Table 2 Phase holograms of mode conversion based on SA

Output mode	Input mode				
	LP_{12}	LP_{02}	LP_{23}	LP_{01}	LP_{51}
LP_{11}					
LP_{22}					
LP_{04}					
LP_{15}					
LP_{32}					

仿真的硬件配置参数如下:CPU 为 AMD7650,GPU 为 GTX750,RAM 为 4G。退火参数配置如下:初始温度 $T_i=10$,温度衰减因子 $\alpha=0.95$,自适应强度 $\kappa=1$,自适应强度 $\epsilon=0.1$ 。输入光场为基模高斯光 LP_{01} ,远场目标光场为 LP_{15} 。将改进算法并行化后经过 GPU 加速,对相位板分辨率为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}, 256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}, 512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 分别进行仿真实验,仿真结果如表 4 所示。从表中可以看到自适应的 SA 算法在算法的计算时间和最终的模式转换效率上比原始的 SA 有了较大提升。图 2 对比了自适应 SA 与原始 SA 算法的性能。由图可知,随着 N 的增加,加速效果越来越明显。 $N=512$ 时自适应 SA 的算法收敛时间比原始 SA 并行计算缩短近乎 1 倍,而转换效率上由原来的 96.9% 提升到 97.3%。相

比未经并行加速的 SA 算法,运算时间上缩短了 7 倍以上。

表 3 模拟退火模式转换效率

Table 3 Efficiency of mode conversion based on SA

Output mode	Input mode				
	LP ₁₂	LP ₀₂	LP ₂₃	LP ₀₁	LP ₅₁
LP ₁₁	89.73	93.67	87.98	98.01	80.61
LP ₂₂	81.89	92.72	95.30	94.23	76.82
LP ₀₄	82.85	95.14	86.82	94.34	74.13
LP ₁₅	92.79	85.91	85.05	87.58	70.47%
LP ₃₂	94.51	87.10	83.17	94.30	82.92

表 4 不同分辨率下算法性能对比

Table 4 Performance comparison of algorithms under different resolutions

N	Indicator	Not parallel	SA with parallel computing	Improved SA with parallel computing
128	Conversion efficiency	0.968	0.968	0.970
	Algorithm convergence time /s	954	212	148
256	Conversion efficiency	0.968	0.968	0.972
	Algorithm convergence time /s	8295	1695	830
512	Conversion efficiency	0.951	0.969	0.973
	Algorithm convergence time /s	26325	5850	3250

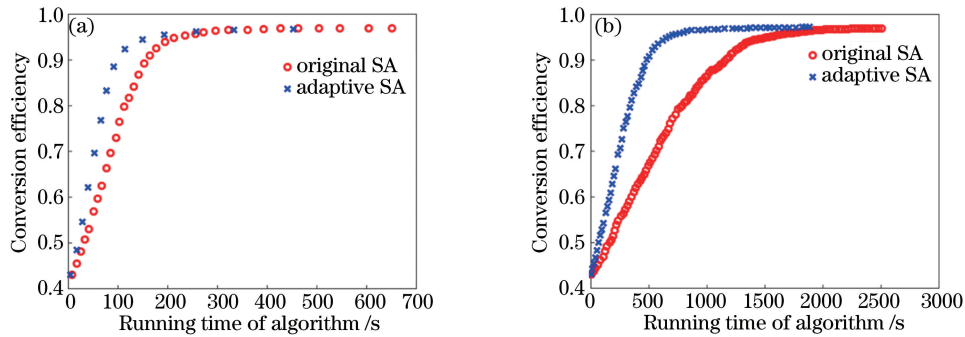


图 2 自适应 SA 与原始 SA 算法性能对比。(a) $N=128$; (b) $N=256$

Fig. 2 Performance comparison of adaptive SA and original SA. (a) $N=128$; (b) $N=256$

4 实验验证

基于空间光调制器的光学模式转换方法搭建了一整套模式转换系统,实验光路图见图 3,模式转换系统实验平台见图 4。在 SLM 上加载对应相位信息,得到对应输出模式场分布,验证了算法有效性。实验系统包括 1550 nm 激光器、两个透镜、光阑、光纤耦合器、光束分析仪、德国 HOLOEYE 公司生产的 PLUTO 空间光调制器、偏振控制器、平移台、导轨及旋转台等。激光器的输出基模高斯光(LP₀₁模式)经过偏振控制器的作用将偏振态平行于空间光调制器液晶板的长轴,光纤耦合器将光纤内的激光耦合到自由空间中,透镜 1 的焦距为 200 mm,透镜 2 的焦距为 100 mm,光纤耦合器等效焦距为 7.5 mm。光纤耦合器的输出位于透镜 1 的前焦面,SLM 位于透镜 1 的后焦面及透镜 2 的前焦面,因此透镜 1、透镜 2 与 SLM 组成 4- f 空间滤波系统。经过变换的高斯光照射在 SLM 上,通过 SLM 控制器的驱动软件,改变加载的相位图可以实时地对入射光进行不同的相位调制,光场经过 SLM 调制后通过透镜 2 聚焦成像,并经过光阑滤波,在 CCD 上可以观测到转换模式光场分布。

图 5 为通过模式转换系统得到的模场分布以及其对应的理想分布,图 5(a)为 CCD 观测得到的光场,对应模式分别为 LP₅₁、LP₀₇、LP₃₃及 LP₅₃,与图 5(b)中的理想场分布对比,光场能量分布基本一致,对称性较好,高阶衍射分量较小。可见采用模拟退火进行模式转换中的相位优化,产生的模式分布与理想模式有很高的相似性。

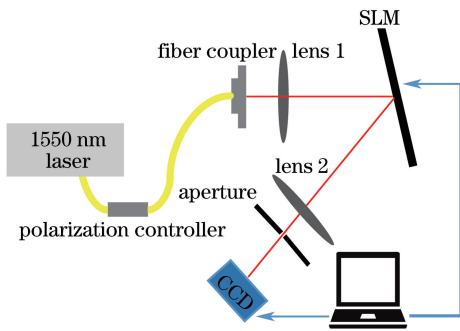


图 3 实验光路图

Fig. 3 Diagram of experimental setup

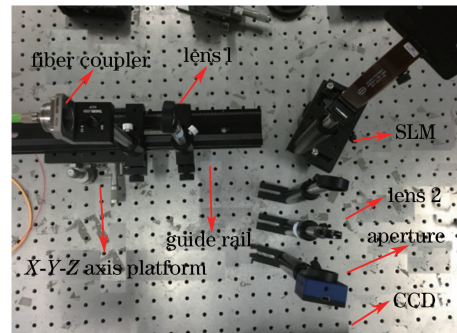


图 4 模式转换系统实验平台

Fig. 4 Experimental platform of mode conversion

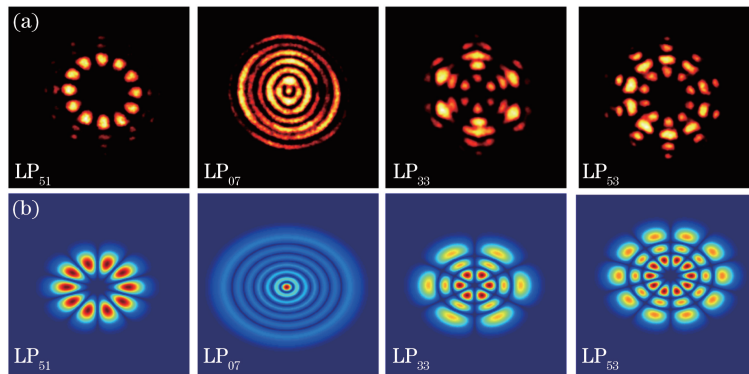


图 5 各个模式的(a)实验结果和(b)理想分布

Fig. 5 (a) Experimental results and (b) ideal distributions of target mode

5 结 论

通过对任意模式转换中的模拟退火算法进行改进,保持了原始 SA 算法的基础框架,确保算法可在全局范围内寻优。通过将原始的 SA 算法中单点扰动和固定搜索区间与温度结合,在不同温度下自适应改变扰动点数和搜索区间。并结合 GPU 并行计算方法对其加速,算法的效率得到极大提高。并搭建了模式转换实验平台,基于纯相位空间光调制器实现了基模高斯光到多种高阶模式的转换。

参 考 文 献

- 1 Essiambre R J, Ryf R, Fontaine N K, *et al.* Breakthroughs in photonics 2012: Space-division multiplexing in multimode and multicore fibers for high-capacity optical communication[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 0701307.
- 2 Koebele C, Salsi M, Sperti D, *et al.* Two mode transmission at 2×100 Gb/s, over 40 km-long prototype few-mode fiber, using LCOS-based programmable mode multiplexer and demultiplexer[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16593-16600.
- 3 Ip E, Bai N, Huang Y K, *et al.* $88 \times 3 \times 112$ Gb/s WDM transmission over 50 km of three-mode fiber with inline few-mode fiber amplifier[C]. *37th European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC)*, 2011, Th.13.C: Th.13.C2.
- 4 Ryf R, Randel S, Gnauck A H, *et al.* Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, 2011, PDPB: PDPB10.
- 5 Giles I, Obeysekera A, Chen R, *et al.* All fiber components for multimode SDM systems[C]. *Photonics Society Summer Topical Meeting Series*, 2012: 212-213.
- 6 Uematsu T, Saitoh K, Hanzawa N, *et al.* Low-loss and broadband PLC-type mode (de) multiplexer for mode-division multiplexing transmission[C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, 2013, OTh1B: OTh1B. 5.
- 7 Leon-Saval S G, Fontaine N K, Salazar-Gil J R, *et al.* Mode-selective photonic lanterns for space-division multiplexing

- [J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 1036-1044.
- 8 Carpenter J, Thomsen B C, Wilkinson T D. Degenerate mode-group division multiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(24): 3946-3952.
- 9 Du Yanlong, Wang Yurong, Meng Xiangfeng, *et al.* Gabor in-line phase-shifting digital holography based on $4f$ system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 060902.
杜延龙, 王玉荣, 孟祥峰, 等. 基于 $4f$ 系统的 Gabor 同轴相移数字全息[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 060902.
- 10 Lan M, Gao L, Yu S, *et al.* An arbitrary mode converter with high precision for mode division multiplexing in optical fibers[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 62(5): 348-352.
- 11 Li Can, Tian Fengchun, Chen Jianjun, *et al.* A denoising method for the $4f$ system based on phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optical Technique*, 2011, 37(1): 14-18.
李 灿, 田逢春, 陈建军, 等. 基于液晶纯相位光调制器的 $4f$ 系统去噪方法[J]. *光学技术*, 2011, 37(1): 14-18.
- 12 Stepniak G, Maksymiuk L, Siuzdak J. Increasing multimode fiber transmission capacity by mode selective spatial light phase modulation[C]. 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), 2010: P6. 03.
- 13 Lan Mingying. Research on the key technologies of mode control for mode division multiplexing in optical fiber communications[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
兰名荣. 模分复用光纤通信系统中模式控制关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- 14 Amagai Y, Shoji K, Toyama F, *et al.* Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, 42(3): 671-680.
- 15 Yang Ruoli, Gu Jifa. An efficient simulated annealing algorithm for global optimization[J]. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 1997, 17(5): 29-35.
杨若黎, 顾基发. 一种高效的模拟退火全局优化算法[J]. *系统工程理论与实践*, 1997, 17(5): 29-35.
- 16 Qi Yuefeng, Li Cailing, Jiang Peng, *et al.* Spectral shape multiplexing technology of fiber Bragg gratings using simulated annealing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0906004.
齐跃峰, 李彩玲, 江 鹏, 等. 利用模拟退火算法研究光纤布拉格光栅的光谱形状复用技术[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0906004.
- 17 Wang Jiazhou, Pang Hui, Zhang Man, *et al.* Design method for multi-wavelength diffractive optical element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1005002.
王佳舟, 庞 辉, 张 满, 等. 一种适用于多波长的衍射元件设计方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1005002.