

引用格式: YAN Xu, ZHANG Wenrui, CAO Changqing, et al. Atmospheric Turbulence Compensation Technology for Space Optical Communication Based on Detector Array (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10):1006001

闫旭, 张文睿, 曹长庆, 等. 基于探测器阵列的空间光通信大气湍流补偿技术(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(10):1006001

# 基于探测器阵列的空间光通信大气湍流补偿技术 (特邀)

闫旭, 张文睿, 曹长庆, 冯喆珺

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

**摘要:**星地相干光通信系统中,为了补偿大气湍流随机扰动造成的信号光波前畸变,提出了一种基于双探测器阵列和随机并行梯度下降算法的波前相干补偿技术。以区域光强度比作为光束评价标准,搭建了信号光波前补偿与解调一体的光通信仿真系统,并利用 65 阶 Zernike 多项式模拟大气湍流波前畸变。仿真系统采用正交相移键控调制方式,数据传输速率为 10 Gbps。仿真结果表明,当误码率为  $10^{-9}$  时,通信系统所要求的每比特光子数降低为原来的 65.6%,当每比特光子数为 14 时,误码率降低为原来的 2.6%。基于双探测器阵列的波前补偿技术可以补偿信号光波前畸变,降低光通信系统的误码率,为星地光通信链路的信号传输提供保障。

**关键词:**光学工程;波前补偿;自适应算法;光通信;零差检测;相移键控

中图分类号:TN929.12

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215010.1006001

## Atmospheric Turbulence Compensation Technology for Space Optical Communication Based on Detector Array (Invited)

YAN Xu, ZHANG Wenrui, CAO Changqing, FENG Zhejun

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In the satellite-to-earth coherent optical communication system, in order to compensate for the wavefront distortion of signal light caused by the random disturbance of atmospheric turbulence, a wavefront coherent compensation technology based on a dual detector array and a stochastic parallel gradient descent algorithm is proposed. Taking the regional light intensity ratio as the beam evaluation standard, an optical communication simulation system integrating signal light wavefront compensation and demodulation is built, and the 65-order Zernike polynomial is used to simulate atmospheric turbulence wavefront distortion. The simulation system adopts quadrature phase shift keying modulation, and the data transmission rate is 10 Gbps. The results show that when the bit error rate is  $10^{-9}$ , the number of photons per bit required by the communication system is reduced to 65.6%, and when the number of photons per bit is 14, the bit error rate is reduced to 2.6%. The wavefront compensation technology based on the dual detector array can compensate the signal light wavefront distortion, reduce the optical communication system error, and provide a guarantee for the signal transmission of the satellite-to-ground optical communication link.

**Key words:** Optical engineering; Wavefront compensation; Adaptive algorithms; Optical communication;

基金项目:陕西省自然科学基金(No.2020JM-206),国防基础研究基金(No.61428060201),111项目(No.B17035),中央高校基本科研业务费专项基金(No.YJS2105)

第一作者:闫旭(1995—),男,博士研究生,主要研究方向为光通信。Email: yanxu\_xy@163.com

导师(通讯作者):曹长庆(1977—),男,副教授,博士,主要研究方向为光电检测技术、光电信息处理与系统。Email: chqcao@mail.xidian.edu.cn

收稿日期:2021-08-20;录用日期:2021-08-27

<http://www.photon.ac.cn>

Homodyne detection; Phase shift keying

OCIS Codes: 060.2605; 010.1330; 010.3310; 010.7350

## 0 引言

自由空间相干光通信因其传输速率高、保密性好、传输距离远而受到广泛关注<sup>[1-3]</sup>。在卫星-地面相干光通信的下行链路中,大气湍流使光信号波前产生畸变,显著降低了光束的相干性,严重影响光通信系统的灵敏度。波前补偿技术可以通过重构信号光的畸变波前来进行高精度的波前补偿,恢复光通信系统性能<sup>[4-6]</sup>。

波前传感器是最常用的波前补偿设备<sup>[7-8]</sup>,但其受衍射极限的限制,探测精度与探测的动态范围相互制约。而基于随机并行梯度下降算法(Stochastic Parallel Gradient Descent, SPGD)的无波前传感器自适应光学(Adaptive Optics, AO)技术不受闪烁效应等畸变条件的限制,可以在强湍流条件下工作,并且 SPGD-AO 技术的系统结构更简单,应用成本更低<sup>[9-10]</sup>。

SPGD 算法是一种多维无约束最优化问题的数值计算方法。传统光通信中的 SPGD 算法是将信标光入射至电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)探测器表面,根据 CCD 表面光强度的分布计算光束评价价值,然后反馈调整补偿量。CCD 响应带宽较小,以光强度的直接探测方式为主,容易受到背景光的干扰。相干探测技术可以滤除背景噪声,并且灵敏度高、响应速度快,已被广泛应用于远距离信号传输领域。将其应用在波前探测领域,不仅可以将信号光的波前补偿与信号探测解调相结合,还可以简化系统结构。然而,利用单探测器无法获取波前细节信息,并且利用单个探测器阵列也只能获得调制后的信号光波前的相位分布,无法从中提取畸变相位噪声。本文在现有研究基础上,提出利用双探测器阵列和 SPGD 算法的大气湍流波前恢复方案,并分析了大气湍流基本原理和 SPGD 算法的理论基础,仿真验证了所设计波前畸变补偿方案的性能。该方案利用两个探测器分别接收差分混频信号,再将输出电信号合并后计算波前相位分布信息,不仅具有更高的波前补偿精度和响应速度,而且可以将信号光波前补偿与信号解调相结合,提高光通信系统的灵敏度<sup>[11]</sup>,降低光通信系统的结构复杂性。

## 1 原理

首先分析了大气湍流基本原理,利用 Zernike 多项式拟合畸变波前,并阐述了 SPGD 算法原理;然后设计了利用双探测器进行波前补偿的理论模型,并选取合适的评价参数,以在相干体制中利用 SPGD 算法补偿波前畸变。

### 1.1 大气湍流基本原理

远距离传输的信号光可视为平面波,通过大气湍流后的波前相位可扩展为 Zernike 多项式的正交组合<sup>[12]</sup>

$$\varphi(x, y) = \sum_{k=1}^l a_k Z_k(x, y) \quad (1)$$

式中,  $l$  为重构所用的模式数,  $a_k$  为第  $k$  阶 Zernike 多项式的系数,  $Z_k(x, y)$  为第  $k$  阶 Zernike 多项式,其极坐标表示为

$$Z_k(r, \theta) = R_n^m(r) \Theta_n^m(\theta) \quad (2)$$

$$R_n^m(r) = \sum_{k=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)!} r^{n-2k} \quad (3)$$

$$\Theta_n^m(\theta) = \begin{cases} \sqrt{2(n+1)} \cos(m\theta) & m: \text{odd number} \\ \sqrt{2(n+1)} \sin(m\theta) & m: \text{even number and } m \neq 0 \\ \sqrt{2(n+1)} & m = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $R_n^m$  为圆径向多项式,  $\Theta_n^m$  为三角函数。由式(1)~(4)可以模拟生成经过大气湍流后的畸变波前。

### 1.2 SPGD 算法原理

SPGD 算法实现的原理为<sup>[13-18]</sup>:  $J$  是  $N$  维控制变量  $u$  的函数,即  $J = f(u_1, u_2, \dots, u_n)$ ;第  $x$  次迭代的同时对

所有控制变量施加微扰电压  $\delta u^{(x)} = \{\delta u_j^{(x)}\}, (j = 1, 2, \dots, n)$ , 各  $\delta u^{(x)}$  相互独立且满足高斯分布。当添加正向扰动时,性能评价参数的变化为

$$\delta J_+^{(x)} = f[u_1^{(x)} + \delta u_1^{(x)}, u_2^{(x)} + \delta u_2^{(x)}, \dots, u_n^{(x)} + \delta u_n^{(x)}] \quad (5)$$

当添加负向扰动时,评价参数为

$$\delta J_-^{(x)} = f[u_1^{(x)} - \delta u_1^{(x)}, u_2^{(x)} - \delta u_2^{(x)}, \dots, u_n^{(x)} - \delta u_n^{(x)}] \quad (6)$$

最终得到第  $x$  次迭代的性能评价函数差为

$$\delta J = \delta J_+^{(x)} - \delta J_-^{(x)} \quad (7)$$

根据梯度原理,第  $x + 1$  次迭代时施加的电压信号为

$$u^{(x+1)} = u^{(x)} + \beta \delta J^{(x)} u^{(x)} \quad (8)$$

式中,  $\beta$  为增益系数(收敛步长)。不断执行迭代过程,直到满足系统要求。

### 1.3 利用双探测器进行波前补偿的理论模型

在接收端,通过接收望远镜和透镜聚焦到探测器表面上的信号光与本振光混合以实现相干检测。接收到的信号光可视作平面光波,本振光为高斯光束。经过干涉,传统单探测器的输出电流经过高通滤波后可表示为

$$I = \frac{R}{2} \sqrt{P_s P_{L_0}} \cos(\varphi_k + \varphi) \quad (9)$$

其中,  $R$  为检测器响应度,  $P_s$  为信号光功率,  $P_{L_0}$  为本振光功率,  $\varphi_k$  为调制信号相位,  $\varphi$  为大气湍流带来的波前畸变相位分布。

根据式(9)进行波前相位重构时,有两种思路:

1) 直接进行相位畸变测量。传统单一探测器无法获得相位  $\varphi_k + \varphi$  的分布,即使利用探测器阵列进行相位分布探测,  $\varphi_k + \varphi$  中的调制相位  $\varphi_k$  与相位畸变  $\varphi$  均为未知量,因此无法直接获取相位畸变分布。

2) 利用信号光的波前强度分布补偿波前相位。对多周期光信号检测可以求出包络强度,从而计算信号光强度分布。然而,多周期需要耗费较长时间,不能对每帧信号进行波前分布估计,并且包络估计较为复杂。因此,利用单探测器阵列较难进行波前补偿。

当采用双探测器阵列方案时, I 支路探测器用来接收直接混频信号, Q 支路将信号光进行  $90^\circ$  相移后混频,两支路对应探测单元的输出电流可分别表示为

$$I_I = \frac{R}{4} [P_s + P_{L_0} + 2\sqrt{P_s P_{L_0}} \cos(\varphi_k + \varphi)] \quad (10)$$

$$I_Q = \frac{R}{4} [P_s + P_{L_0} + 2\sqrt{P_s P_{L_0}} \sin(\varphi_k + \varphi)] \quad (11)$$

将每个探测器阵列元素的输出电信号进行高通滤波,再对相同位置元素进行平方求和,则输出功率可表示为

$$P_k = \frac{R^2}{4} r P_s P_{L_0}, k = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

式中,  $r$  为跨阻放大率,  $N$  为探测器阵列元素总数。输出功率消去了相位对波前强度探测的影响,可以直接反应光强度信息。

当信号光无波前畸变和发生波前畸变时,探测器阵列接收到信号光后重构的光强度归一化分布分别如图 1(a) 和(b) 所示,  $N_x, N_y$  为探测器单元的相对位置坐标。

采用中心区域光强度作为评价函数,即

$$S = I(x_0, y_0) / I_0(x_0, y_0) \quad (13)$$

当波前畸变不同时,光强中心占比不同,即波前畸变越微弱,光强中心占比越高。在波前补偿过程中,中心光强度占比最大时,可近似认为信号光波前畸变补偿效果最好。结合 SPGD 算法与评价函数,可以补偿畸变波前。

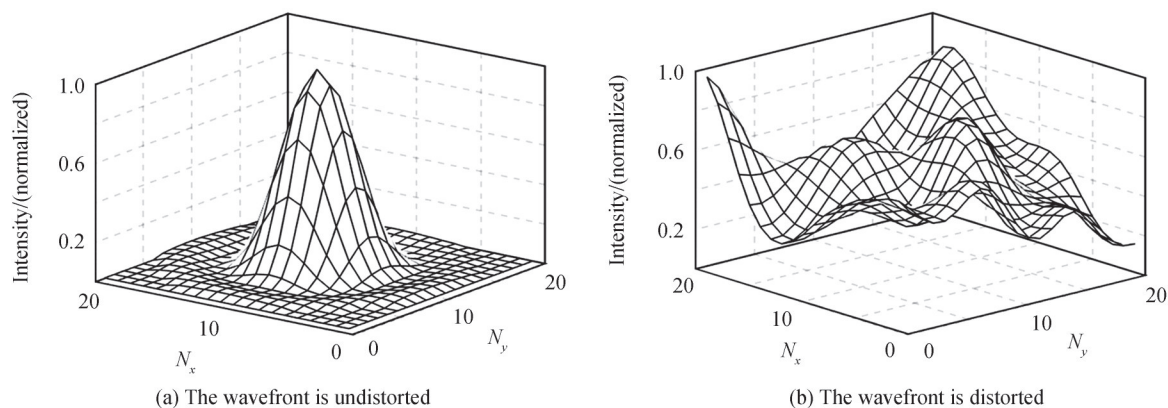


图1 光强度归一化分布  
Fig.1 Normalized light intensity distribution

## 2 仿真实验

仿真模拟了星地下行链路的相干光通信,利用65阶Zernike多项式模拟大气湍流波前畸变,信号光波长为1550 nm,采用正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制方式,传输速率为10 Gbps,接收到的信号光功率为-50 dBm,不考虑激光器线宽与器件噪声。系统结构如图2所示,接收到的信号光经过接收望远镜、波前补偿器与本振光进行90°混频,将混频后的光束分别入射到两个探测器阵列上,输出电信号通过DSP模块进行波前补偿与信号解调。传统的光通信系统中,信号光与信标光互相独立,信标光通过透镜聚焦到CCD阵列/波前传感器上进行波前恢复,用来实现大气湍流补偿,信号光用来实现数据信息解码;远距离信号传输多采用相位调制技术,解调分为I/Q支路,其中I支路计算调制相位的余弦值,Q支路计算调制相位的正弦值,由两路信号可以解调出信号的调制相位信息。信标光与信号光之间面临着光束隔离、杂散光抑制等问题,并且独立的波前补偿自适应模块占用了额外的空间,所设计的波前补偿系统直接利用信号光和I/Q支路计算波前畸变信息,不需要信标光和独立的自适应模块,缩小了通信终端的空间,降低了系统结构复杂度。

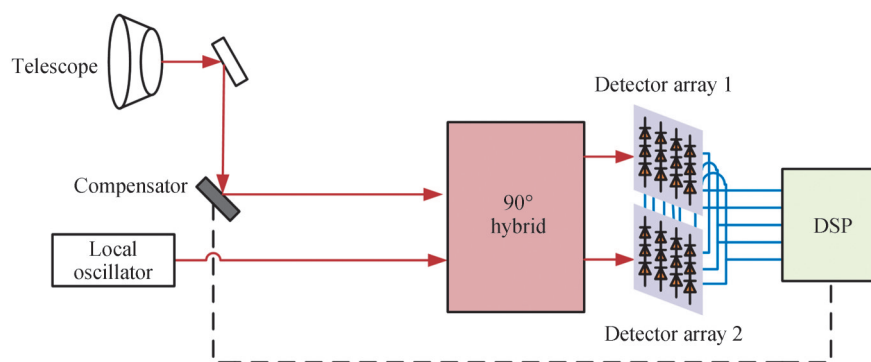


图2 波前畸变补偿系统结构  
Fig. 2 Structure diagram of wavefront distortion compensation system

利用SPGD算法进行大气波前畸变补偿的流程框图如图3所示。首先初始化系统,信号光束随机生成双向扰动变量 $\pm\Delta u$ ,将其分别施加在原波前上,此时两个探测器阵列上会有相应的光强度分布。将两个探测器阵列相对应的光强度进行求和,生成新的光强度分布。由于波前存在畸变,因此在新的光强分布上,区域光强度比值会小于理论值。比较 $+\Delta u$ 、 $-\Delta u$ 扰动的区域光强比值,选择比值较大的进行下一轮迭代,直到满足系统要求。由于随机并行梯度下降算法是一种盲算法,尚不知道梯度的方向,因此均值取为0;标准差的选取由算法所要求的补偿后的波前相位补偿残差 $\zeta$ 确定,保证 $3\sigma \leq \zeta$ 。本文要求的补偿残差为0.6 rad,因此标准差取为0.2。

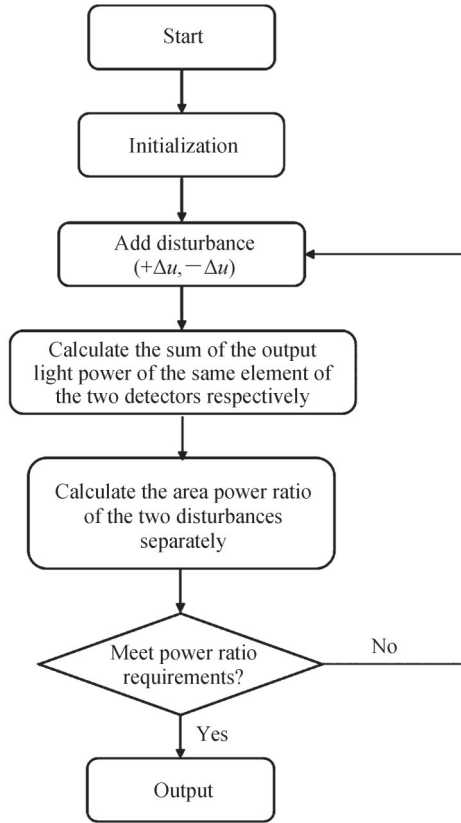


图3 SPGD算法进行波前畸变补偿流程

Fig. 3 Flow chart of SPGD algorithm for wavefront distortion compensation

### 2.1 不同步长下的补偿性能分析

在SPGD算法中,收敛步长越大,系统的收敛速度越快,然而其收敛的中心光强比( $J$ )较低,补偿效果较差;收敛步长越小,系统的收敛速度慢,但具有较高的 $J$ 值。对增益系数的选取依靠对波前补偿系统的探测精度与收敛速度,当收敛步长分别为0.5、0.8、1.0、1.5时,SPGD算法的收敛曲线如图4所示。当步长为0.5时,其收敛速度小于其他曲线,在迭代约1000次后(A点),增速开始放缓,在2000次时 $J$ 达到最大值0.78;当步长等于0.8和1时,两者收敛速度相近,其中在2000次时,步长为0.8的曲线 $J$ 值稍高于步长为1的曲线。当步长为1.5时,曲线的收敛速度较快,当迭代次数超过500后(B点),其增长速度减慢,在迭代次数为2000时,该曲线的 $J$ 值小于其它曲线。本文要求在迭代1000次时曲线收敛并且 $J$ 值达到最高,因此选取收敛步长为0.8,其中 $J$ 值标准定为0.749。

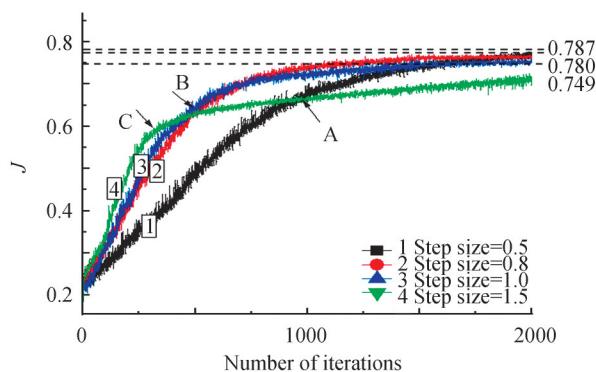


图4 不同步长条件下SPGD算法的收敛曲线

Fig. 4 Convergence curve of SPGD algorithm under different step size

## 2.2 不同大气湍流强度条件下的补偿性能分析

信号光波前的畸变程度随大气湍流强度变化,进而影响补偿性能。大气湍流的大小由 $D/r_0$ 计算,其中 $D$ 是接收孔径的直径, $r_0$ 是大气相干长度。在相干光通信系统中,接收孔径通常小于1 m。当 $D/r_0 < 2$ 时认为湍流较弱;如果 $2 \leq D/r_0 < 10$ ,则为中等湍流,当 $D/r_0 \geq 10$ 时为强湍流<sup>[5]</sup>。在不同大气湍流强度下,SPGD算法的收敛曲线如图5所示,设置步长为0.8。

从图5中可以看出,大气湍流越弱,初始的中心光强比越大,此时算法可以较快达到极值。在1 000次迭代之后, $\frac{D}{r_0} = 1, 2, 5$ 的收敛曲线可以达到较高值。而在强湍流条件下,由于波前畸变较为严重,收敛曲线尚未达到极值,此时可以提高收敛补偿或者增加迭代次数。

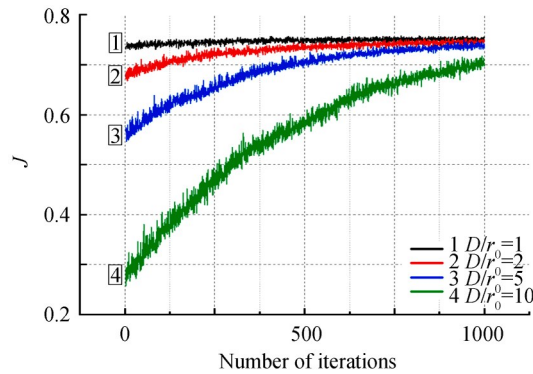


图5 不同大气湍流强度条件下SPGD算法的收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of SPGD algorithm under different atmospheric turbulence intensities

## 2.3 误码性能分析

误码率(Bit Error Rate, BER)是光通信系统的重要参数,远距离光通信常用QPSK调制模式,其误码率可以表示为

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{\gamma\eta N_p}) \quad (13)$$

式中, $\eta$ 为量子效率,在仿真中该值设置为1, $N_p$ 为单比特数据所包含的光子数, $\gamma$ 为混频效率。

混频效率定义为相干检测中两个光场实际混合产生的IF信号功率与理想状态下的IF信号功率之比。则混频效率可表示为<sup>[19]</sup>

$$\gamma = \frac{\left| \iint E_s E_{L_o} e^{i\Delta\psi(r,\varphi)} dA \right|^2}{\iint (E_s)^2 dA \cdot \iint (E_{L_o})^2 dA} \quad (14)$$

式中, $A$ 为信号光混频面积, $E_s$ 是探测器表面的信号光光场分布, $E_{L_o}$ 是探测器表面的本振光光场分布, $\Delta\psi(r,\varphi)$ 是信号光和本振光之间的相位差。

传统基于CCD的SPGD算法与所设计的双探测器阵列SPGD算法的误码性能曲线如图6所示。从图中可以看出,在相同 $N_p$ 下,大气湍流强度越高,补偿前的误码率越高,其原因是高湍流强度下信号光波前畸变程度较为严重,导致误码率较高。

传统基于CCD的SPGD算法可以降低光通信的误码率,说明其具有一定的波前补偿效果。在不同的大气湍流强度下,当 $N_p$ 相同时,所设计的波前补偿技术误码率小于传统SPGD算法,说明其具有更好的波前补偿效果。在强湍流( $D/r_0 = 10$ )条件下,由式(13)和(14)可得,补偿前的混频效率 $\gamma = 0.54$ ,补偿后提升至 $\gamma = 0.82$ ,当 $N_p = 14$ 时,畸变波前的误码率为 $4.9 \times 10^{-5}$ ,补偿后的误码率为 $1.26 \times 10^{-6}$ ,降低为原来的2.6%。当误码率为 $10^{-9}$ 时,畸变波前所要求的每比特光子数为33.83,补偿后的为22.21,降低为原来的65.6%。因此,所设计的自适应补偿算法提高了光通信系统性能。

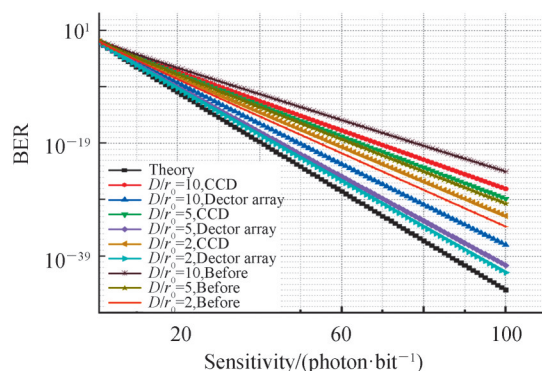


图6 BER与 $N_p$ 之间的关系曲线  
Fig. 6 The relationship curve between BER and  $N_p$

### 3 结论

本文基于双探测器阵列和SPGD算法设计了光通信中的大气湍流相干补偿系统。该系统将光通信信号解调与波前畸变补偿相结合,降低了光通信系统结构的复杂度。仿真分析了畸变补偿过程的收敛特性和光通信系统的误码性能,结果表明,当 $N_p = 14$ 时,误码率降低为原来的2.6%。设计的波前补偿系统可以有效降低光通信系统的误码率,保障星地链路数据传输的稳定性。

#### 参考文献

- [1] GAO Duorui, XIE Zhuang, MA Rong, et al. Development status and trend analysis of satellite laser communication (invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50 (4): 0406001.  
高铎瑞,谢壮,马榕,等.卫星激光通信发展现状与趋势分析(特邀)[J].光子学报,2021,50(4): 0406001.
- [2] CHEN Mo, LIU Chao. Performance verification of adaptive optics for satellite-to-ground coherent optical communications at large zenith angle[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 4230-4242.
- [3] CAO Jingtai, ZHAO Xiaohui, LIU Wei, et al. Performance analysis of a coherent free space optical communication system based on experiment[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 15299-15312.
- [4] FARRELL T C. Fast simulation of Strehl loss due to phase aberration for the sizing of adaptive optics in laser communications system design[J]. Applied Optics, 2014, 53(1): 64-70.
- [5] LIU Wei, YAO Kainan, CHEN Lu, et al. Performance analysis of coherent free space optical communications with sequential pyramid wavefront sensor[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 100: 332-341.
- [6] LIU Chao, CHEN Sanqiu, LI Xinyang, et al. Performance evaluation of adaptive optics for atmospheric coherent laser communications[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15554-15563.
- [7] HU Lejia, HU Shuwen, GONG Wei, et al. Learning-based Shack-Hartmann wavefront sensor for high-order aberration detection[J]. Optics Express, 2019, 27(23): 33504-33517.
- [8] SAITA Y, SHINTO H, NOMURA T. Holographic Shack - Hartmann wavefront sensor based on the correlation peak displacement detection method for wavefront sensing with large dynamic range[J]. Optica, 2015, 2(5): 411-415.
- [9] CAO Jingtai, ZHAO Xiaohui, LI Zhaokun, et al. Stochastic parallel gradient descent laser beam control algorithm for atmospheric compensation in free space optical Communication [J]. Optik, 2014, 125 (20): 6142-6147.
- [10] YANG Hhuihen, LI Xinyang, JIANG Wenhan. Applications of adaptive optics technology in atmospheric laser communications system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44 (10): 61-68.  
杨慧珍,李新阳,姜文汉.自适应光学技术在大气光通信系统中的应用进展[J].激光与光电子学进展,2007,44(10): 61-68.
- [11] BASHIR M S. Free-space optical communications with detector arrays: a mathematical analysis[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(2): 1420-1429.
- [12] HOU Xi, WU Fan, YANG Li, et al. Comparison of annular wavefront interpretation with Zernike circle polynomials and annular polynomials[J]. Applied Optics, 2006, 45(35): 8893-8901.
- [13] WANG Rui. Performance analysis of horizontal laser communication adaptive correction and research on wavefront detection method [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019.  
王蕊.水平激光通信自适应校正性能分析及波前探测方法研究[D].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2019.

- [14] MA Huimin, LIU Haiqiu, ZHANG Jinghui, et al. Numerical comparison of adaptive optics correction based on stochastic parallel gradient descent and phase conjugate in scintillation conditions[J]. *Optik*, 2020, 208: 164528.
- [15] WU Kenan, SUN Yang, HUAI Ying, et al. Multi-perturbation stochastic parallel gradient descent method for wavefront correction[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2933-2944.
- [16] YANG Huizhen, LI Xinyang, GONG Chenglong, et al. Restoration of turbulence-degraded extended object using the stochastic parallel gradient descent algorithm: numerical simulation[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3052-3062.
- [17] SHUAI Xue, DENG Wanxia, CHEN Shanyong. Intelligence enhancement of the adaptive wavefront interferometer[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11084-11102.
- [18] YU Zhang, TIAN Xiaobo, LIANG Rongguang. SPGD and Newton iteration mixed algorithm used in freeform surface metrology[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 129: 106050.
- [19] YAN Xu, ZHANG Wenrui, ZENG Xiaodong, et al. Tracking error compensation technology for coherent tracking system [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 95: 70-75.