

# 基于数字相位恢复算法的正交相移键控 自由空间相干光通信系统

管海军<sup>1,2</sup>, 刘云清<sup>1\*</sup>, 张凤晶<sup>3</sup>

- (1. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;  
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
3. 空军航空大学 航空作战勤务学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 近年来, 大气湍流所引起的信号相位扰动以及光强闪烁对自由空间相干光通信系统性能的影响逐渐成为研究人员关注的焦点。为了提高系统性能, 本文对自由空间相干光通信系统进行了研究。在假设大气湍流所引入的光强闪烁以及相位抖动分别服从对数正态以及高斯分布的条件下, 本文提出了基于数字相位恢复算法(CPR)的正交相移键控(QPSK)自由空间相干光通信系统, 该系统采用了二阶联合的相位恢复算法结构。仿真结果表明: 该结构可以极大地降低相位噪声对系统产生的影响, 且其误符号率比只采用一阶M次方的相位恢复算法的系统低3个数量级。因此, 该系统的提出对于自由空间光通信性能的提升有着较大意义。

**关键词:** 自由空间光通信; 相干探测; 大气湍流; 相位调制

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20191205.1131

## Coherent free-space optical communication system with quadrature phase-shift keying modulation using a digital phase recovery algorithm

GUAN Hai-jun<sup>1,2</sup>, LIU Yun-qing<sup>1\*</sup>, ZHANG Feng-jing<sup>3</sup>

- (1. *College of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*  
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
3. *College of Aviation Operations Service, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China*)

**Abstract:** In recent years, the dilemma regarding the limited performance of coherent free-space optical(CF-

收稿日期: 2019-04-04; 修订日期: 2019-06-04

基金项目: 国家自然科学基金( No. 60505201 ); 吉林省科技发展计划青年科研基金( No. 20160520175JH)

Supported by National Natural Science Foundation of China( No. 60505201 ); Jilin Youth Research Foundation for Science and Technology Development( No. 20160520175JH)

SO) communication with phase modulation caused by the phase fluctuations and intensity scintillations associated with atmospheric turbulence has gradually become the focus of research. In order to improve system performance, a CFSO communication system with quadrature phase-shift keying modulation(QPSK) is studied in this paper. With consideration of log-normal amplitude fluctuations and Gaussian distribution conditions, a two-stage joint carrier phase recovery(CPR) algorithm is proposed. With this scheme, the simulation results show that the phase noise of the system can be greatly reduced and its symbol error rate is three orders lower than that of the single-stage  $M$ -th power CPR algorithm. Therefore, the two-stage joint CPR algorithm holds significant improvement in CFSO communication systems.

**Key words:** free-space optical communications; coherent detection; atmospheric turbulence; phase modulation

## 1 引言

近年来,激光技术得到了较大的发展和广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。其中,自由空间激光通信技术由于具有速率高、安全性好等优点,逐渐成为了研究热点<sup>[5-8]</sup>。与传统的直接探测型自由空间光通信系统相比,自由空间相干光通信系统的系统结构虽然稍微复杂,但其仍然具有以下其他系统所无法比拟的优势:首先,其具有较高的探测灵敏度;其次,其光电转化过程是线性的。由于光信号的幅度与相位信息都能被转化到电域,因此自由空间相干光通信系统可以兼容诸如  $M$  级相移键控(MPSK)、正交幅度调制(QAM)等高阶调制格式。然而由于大气湍流所引起的信号相位扰动(噪声)的影响,其通信链路的性能会大大降低<sup>[9-12]</sup>。在自由空间相干光通信系统中,相位噪声主要是由光信号经过大气湍流时所产生的波前畸变、激光器所固有的线宽以及频偏和相偏、接收端产生加性噪声,这 3 方面因素而引入的。因此,如何抑制相位噪声同步载波相位是系统设计的关键所在。

随着高速数字信号处理技术(DSP)的发展,数字相位恢复算法为自由空间相干光通信系统提供了较为合理的解决方案。在设计相位恢复算法时,需要考虑两个参数:一个是系统的线宽容忍度,另一个是硬件复杂度。前者决定了算法的可靠性,而后者则直接影响了系统的实时性。前馈算法虽然受到了广泛的关注,但其对硬件有着较

高的要求<sup>[13-14]</sup>。在这些前馈算法中当属维特比-维特比相位估计(VVPE)算法最为经典<sup>[15]</sup>。VVPE 算法的计算步骤简单、易于实现,但其同时存在精确度较低的情况。

为了解决以上问题,本文首先提出了一种基于数字相位恢复算法的正交相移键控自由空间相干光通信方案。该方案利用二阶联合相位恢复算法有效地克服了大气所引入的信号相位抖动。其中第一阶算法用来进行粗校正,而第二阶算法则用来进行精校正。

## 2 系统结构与相干接收原理

### 2.1 系统结构

本系统结构如图 1 所示。系统在发射端使用了一个马赫-曾德尔调制器(MZM)来调制激光光束。调制器的同向(I路)和正交(Q路)支路被用来发送两个伪随机序列。调制后的光信号经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后被送入发射天线。

在相干接收端,首先将受到大气链路影响的接收光信号送入 EDFA 中进行放大,然后将其送入零差同向-正交(IQ)接收机中进行信号探测。在这一过程中,假设偏振控制器可以保证本振激光器(LO)发出的本振光的偏振态(SOP)与接收到的光信号的偏振态保持一致。接收到的信号光与本振光在  $2 \times 4$  个  $90^\circ$  光混频器中进行混频,其输出的光信号被两个平衡探测器(BD)转化为电信号。平衡探测器所输出的电域 I 路和 Q 路信号被送入高速 DSP 芯片进行数字相位恢复。

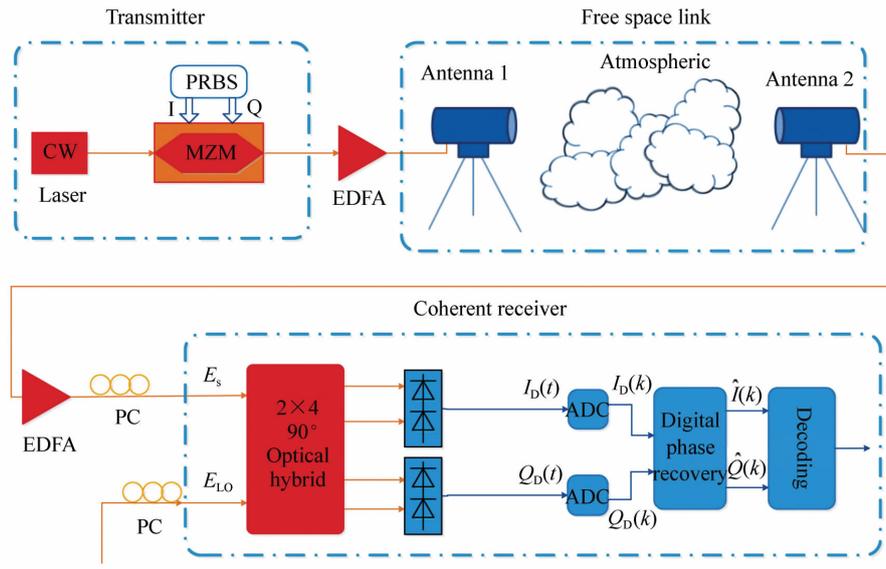


图1 系统结构模型

Fig.1 System structure model

2.2 相干接收原理

如上文所述,相干探测的第一步就是将信号光与本振光进行混频。为了全面地评估大气湍流所带来的影响,需要同时考虑服从对数正态分布的幅度扰动(闪烁)以及服从高斯分布的相位扰动(畸变)。因此,在接收端接收信号与本振光信号可以分别被表示为:

$$E_r(\mathbf{r}, t) = E_s \exp [(\chi(\mathbf{r}) + j\phi(\mathbf{r})) \cdot \exp [j(\omega_s t + \theta_s(t) + \theta_{ns}(t))] ] ,$$

$$E_{LO}(t) = E_l \exp [j(\omega_l(t) + \theta_{nl}(t))] , \quad (1)$$

其中, \$E\_s\$ 和 \$E\_{LO}\$ 分别代表信号光与本振光的振幅, \$\omega\_s\$ 和 \$\omega\_l\$ 则分别代表信号光与本振光的角频率。\$\exp(\chi(\mathbf{r}))\$ 和 \$\exp(j\phi(\mathbf{r}))\$ 分别代表湍流所引入的服从对数正态分布的幅度扰动以及服从高斯分布的相位扰动<sup>[16]</sup>。在弱湍流条件下,对数正态方差 \$\sigma\_\chi^2\$ 可由闪烁指数 \$\sigma\_1^2\$ 来表示:

$$\sigma_\chi^2 = \frac{1}{4}(1 + \sigma_1^2)$$

$$\sigma_1^2 = \sigma_r^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2)$$

认为相位 \$\phi(\mathbf{r})\$ 服从均值为零的高斯分布。在 Kolmogorov 湍流谱条件下,由大气湍流所引起的相位畸变可以通过 Zernike 多项式模式补偿法进行补偿<sup>[17]</sup>。由文献 [17] 可知,相位畸变信号在经过 J 阶 Zernike 多项式补偿后,其残余相位方差

可以表示为

$$\sigma_\phi^2 = C_J \left( \frac{D}{r_0} \right)^{5/3} , \quad (3)$$

这里 \$r\_0\$ 为大气相干长度<sup>[18-19]</sup>, \$D\$ 是系统的接收孔径。对于平面波来讲, \$r\_0\$ 可由波数 \$k\$、折射率结构常数 \$C\_n^2\$ 以及传播距离 \$L\$ 表示为 \$r\_0 = 1.68 (C\_n^2 L k^2)^{-3/5}\$<sup>[20]</sup>。

假设系数 \$C\_J = 1.0299\$, 表示接收端未采取任何模式补偿<sup>[21]</sup>。本文假设接收孔径远远小于大气相干长度,即 \$D \ll r\_0\$, 此时系统可以保证接收端所收到的光束实时地空间相干。因此,接收端受到的信号可以被表示为

$$E_r(t) = E_s \exp(\chi(t) + j\phi(t)) \exp [j(\omega_s - \omega_l) t + \theta_s(t) + \theta_{ns}(t)] , \quad (4)$$

其中, \$\theta\_s(t)\$ 为调制相位,其值可以为 \$0, \pi/2, \pi\$ 或 \$-\pi/2\$。\$\theta\_{ns}(t)\$ 为本振光的载波相位,这里假设一个符号区间相位差 \$\theta\_{ns}(t+T) - \theta\_{ns}(t)\$ 服从方差为 \$\sigma\_p^2 = 4\pi\Delta f T\$ 的高斯分布,其中 \$\Delta f\$ 代表发射激光器与本振激光器的联合线宽<sup>[22]</sup>。

对于零差相干接收机 (\$\omega\_s = \omega\_l\$) 来讲,接收信号与本振光在 \$2 \times 4\$ 个 \$90^\circ\$ 光混频器中完成混频,这一过程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & j \\ 1 & -1 \\ 1 & -j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_s(t) \\ E_{LO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_s(t)/2 + E_{LO}/2 \\ E_s(t)/2 + jE_{LO}/2 \\ E_s(t)/2 - E_{LO}/2 \\ E_s(t)/2 - jE_{LO}/2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$E_1$  和  $E_3$  表示由平衡探测器所转化出的同相电信号,  $E_2$  和  $E_4$  表示由平衡探测器所转化出的正交电

$$\begin{aligned} I_D(t) &= RE_1 E_s(t) \cos[\theta_s(t) + \theta_n(t)] + n_1(t) \\ Q_D(t) &= RE_1 E_s(t) \sin[\theta_s(t) + \theta_n(t)] + n_Q(t) \end{aligned}, \quad (6)$$

其中,  $R$  表示平衡探测器的响应度,  $E_s(t)$  为经过大气湍流影响的接收信号强度。  $\theta_n(t)$  表示载波与本振光之间的总相位噪声, 其包括了激光器线宽和大气湍流引起的相位噪声。系统中的散粒噪声和热噪声可以视为加性高斯白噪声(AWGN)。式中  $n_1(t)$  和  $n_Q(t)$  表示加性噪声, 其包含了接收端热噪声、放大器自发辐射(ASE)噪声和散粒噪声。经模数转换后可得到复信号:

$$E(k) = I_D(k) + jQ_D(k). \quad (7)$$

此后, 采样信号  $I_D(t)$  和  $Q_D(t)$  被送入 DSP 中进行相位噪声估计。在估计出相位噪声后, 系统会将噪声从信号中减去并实现相位恢复。其具体过程将在下一节中给出。

### 3 相位恢复算法

#### 3.1 一阶相位恢复算法

在本节中, 主要应用  $M$  次方的相位恢复算法进行相位恢复。算法结构如图 2 所示。

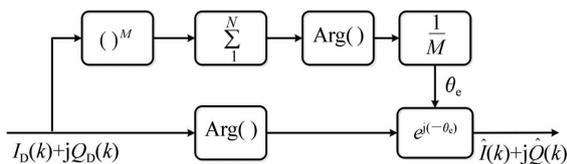


图 2 一阶  $M$  次方的相位恢复算法结构

Fig. 2 Structure of the single-stage  $M$ -th power phase recovery algorithm

对于 QPSK 来说,  $M = 4$ 。在运算过程中接收信号的调制数据信息  $\theta_s(t)$  ( $= 0, \pi/2, \pi, -\pi/2$ ) 会被 4 次方算法  $(\cdot)^4$  去掉, 这是由于无论  $\theta_s(t)$

的值为多少,  $4\theta_s(t) = 4\pi m$  ( $m$  为整数)。因而  $E^4(k) \propto \exp[j4\theta_n]$ , 可以通过  $1/4 \cdot \arg(\cdot)$  的运算获取完整相位噪声  $\theta_n(t)$  的信息。光载波相位  $\theta_s(t)$  的变化速度远远低于试验中所用到的符号速率(10G symbol/s)。因此, 可以通过在多个符号区间对载波相位求平均来求取较为精确的载波相位。系统首先将  $N$  个相邻符号的复振幅  $E^4(k)$  进行累加并求平均, 然后将得到的结果除以 4, 以求出相位噪声  $\theta_e \in (-\pi/4, \pi/4)$ 。这一过程可以表示为:

$$\theta_e = \frac{1}{4} \text{Arg} \left\{ \sum_{n=1}^N [E(k)]^4 \right\}. \quad (8)$$

随后系统利用估计出的相位噪声对采样信号  $I_D(t)$  和  $Q_D(t)$  进行相位恢复, 以获得质量较好的信号。这一过程可以表示为

$$\hat{I}(k) + j\hat{Q}(k) = [I_D(k) + jQ_D(k)] \cdot e^{j(-\theta_e)}. \quad (9)$$

#### 3.2 二阶联合相位恢复算法

为了进一步提高相位恢复精度, 本小节设计了二阶联合相位恢复算法。该算法结构如图 3 所示, 即首先将接收信号送入一阶  $M$  次方的相位恢复算法进行粗校正, 然后将得到的信号送入第二阶盲相位搜索算法进行精校正。

正如图 3 所示, 第二阶盲相位搜索算法采用纯前馈结构, 其主要步骤是首先利用多个噪声测试相位对同一个接收到的信号进行校正, 然后求校正后的结果与各标准星座点之间的欧氏距离并取距离最小的结果作为输出。这一算法的具体过程如下:

首先选取  $B$  个噪声测试相位  $\phi_b$  对接收到的

信号  $r_k$  进行相位校正。这里  $\phi_b$  可以表示为:

$$\phi_b = \frac{b}{B} \cdot \frac{\pi}{2}, \quad (10)$$

式中,  $b$  为大小在  $-B/2$  到  $B/2$  间的一个整数。

由前文可知,  $B$  的取值越大, 该算法的校正精度越高, 但同时系统的复杂度也随之增加。对于本文的系统, 假设  $B = 8$ 。

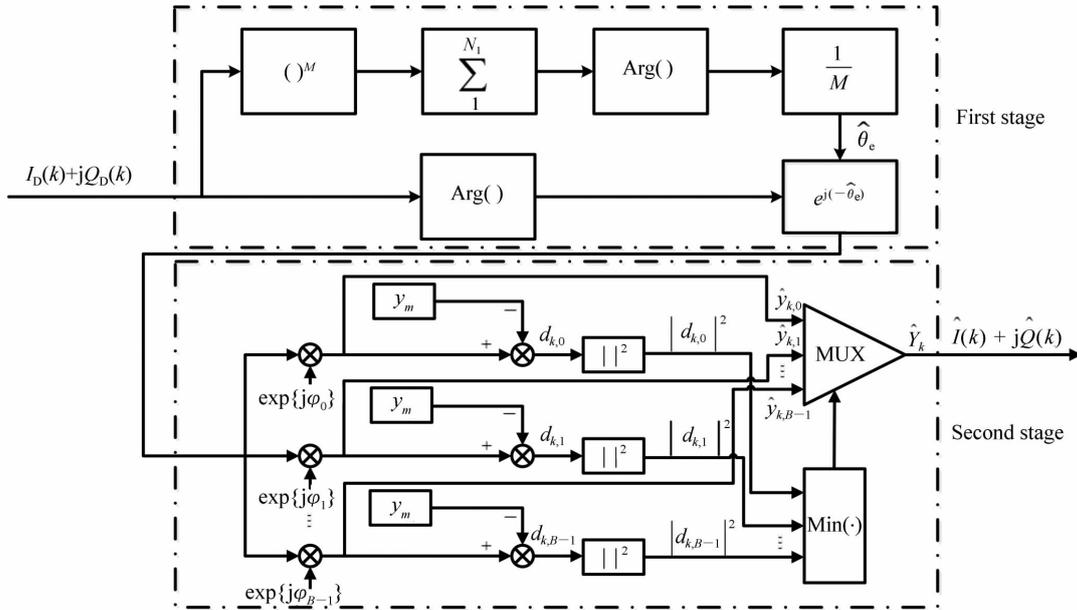


图3 二阶联合相位恢复算法结构

Fig. 3 Structure of the two-stage joint phase recovery algorithm

随后, 该算法会对校正后的信号进行判断。判断的具体规则是对比各信号与理想符号之间的欧氏距离  $|d_{k,b}|^2$ , 找出所得结果中最小的那一组所对应的校正信号  $\hat{y}_{k,b}$  作为输出。这样就能获得质量更好的输出信号了。

### 4 实验仿真结果

本文使用 MATLAB 以及专业仿真软件 VPI transmission maker 对前文所提出的系统进行仿真验证。这里假设数据速率为 20 Gbps (10G symbol/s)、发射与接收平均功率分别为 10 dBm 和 -20 dBm、第一阶相位恢复算法的平滑长度  $N = 10$ 。仿真参数如表 1 所示。

图 4 (a) 是当激光器联合线宽为 100 kHz 时接收端所收到的、未经校正的星座图。图 4 (b) 和图 4 (c) 分别为经过单阶和双阶校正后的星座图。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数设置	Value
波长	1 550 nm
接收口径 $D$	5 cm
折射率结构常数 $C_n^2$	$1.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$
相干长度 $r_0$	24.5 cm
传输距离 $L$	1 000 m
里托夫方差 $\sigma_R$	0.17
相位方差 $\sigma_\phi$	0.07 rad

图 5 则是当激光器联合线宽为 100 kHz、接收端本振光与发射端载波间频偏为 20 MHz 时, 未经校正、单阶和双阶校正星座图。由这两组图片可知, 无论是单阶相位校正系统还是双阶相位校正系统都能对激光器所产生的联合线宽噪声以及频偏噪声起到较好的抑制作用。可见, 相比于单阶校正系统, 双阶校正系统对信号的改善作用更为明显。

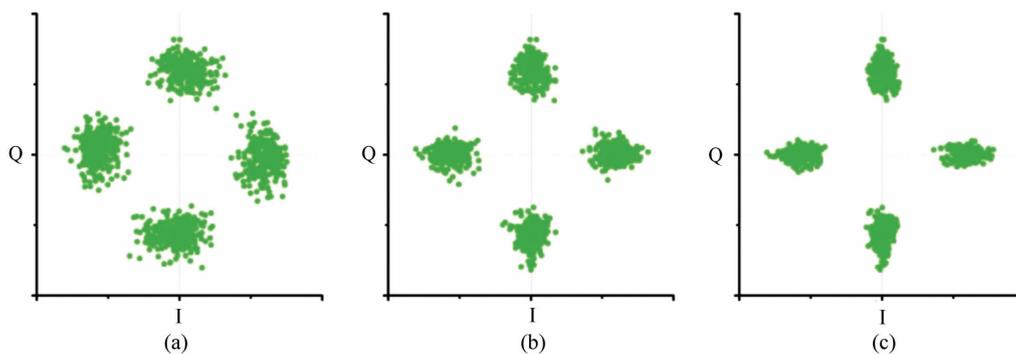


图 4 激光器线宽为 100kHz 时的星座图。(a) 相位校正前,(b) 单阶相位校正,(c) 双阶联合相位校正后

Fig. 4 Normalized constellation diagram of QPSK signal with laser linewidth of 100 kHz for the transmitter and the local oscillator. (a) Before using carrier phase recovery algorithm, (b) after using single-stage carrier phase recovery algorithm, and (c) after using two-stage joint carrier phase recovery algorithm

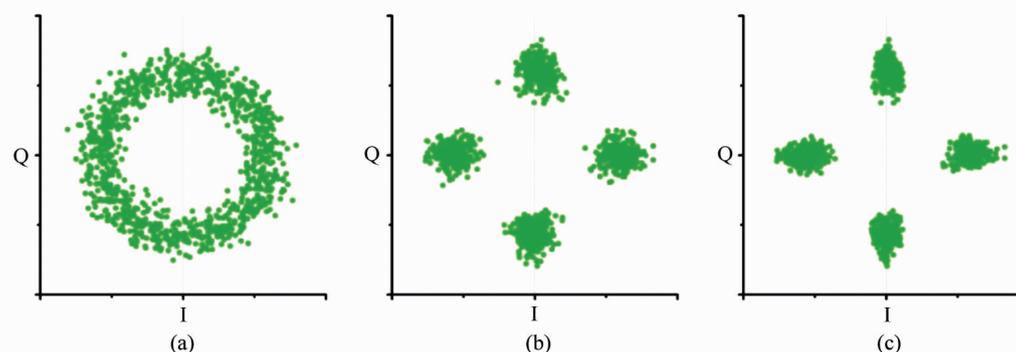


图 5 激光器线宽为 100 kHz, 频偏为 20 MHz 时的星座图。(a) 相位校正前,(b) 单阶相位校正后,(c) 双阶联合相位校正后

Fig. 5 Normalized constellation diagram of QPSK signal with laser linewidth of 100 kHz and frequency offset of 20 MHz for the transmitter and the local oscillator. (a) Before using carrier phase recovery algorithm, (b) after using single-stage carrier phase recovery algorithm, and (c) after using two-stage joint carrier phase recovery algorithm

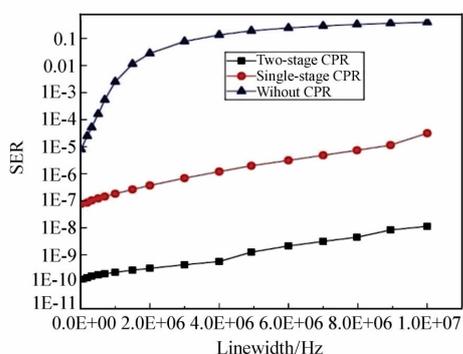


图 6 双阶校正、单阶校正和无校正系统误符号率和激光器线宽的关系

Fig. 6 SER versus linewidth for the two-stage, single-stage and without carrier phase recovery algorithm

图 6 为不同线宽条件下、不同系统的误符号率 (SER)。由图 6 可知,对于未进行相位校正的系统,即使在线宽只有 20 kHz 的条件下,其误符号率性能仍会因大气湍流的影响而急剧恶化。相比之下,当系统误符号率为  $10^{-8}$  时,双阶相位校正的线宽容忍度可达 10 MHz。此外,还可以看到,在线宽相同时双阶联合校正系统的误符号率要比单阶校正系统低 3 个数量级。

图 7 为不同湍流条件下系统误符号率和激光器线宽的关系,其中  $\sigma_\phi = 0.07$ ,  $\sigma_\phi = 0.1$ ,  $\sigma_\phi = 0.13$  均为弱湍流条件。由图 7 可知,系统的误符号率会随着湍流的增强而升高。此外,正如图 6 所示结果,图 7 也显示了在联合线宽以及大气湍

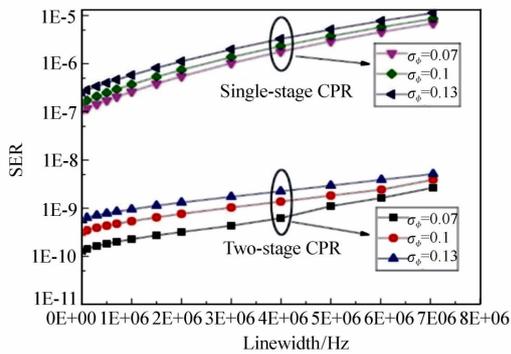


图7 不同湍流条件下双阶校正和单阶校正系统误符号率和激光器线宽的关系

Fig. 7 SER versus linewidth which is measured with the two-stage and single-stage carrier phase recovery algorithm for  $\sigma_\phi = 0.07$ ,  $\sigma_\phi = 0.1$ ,  $\sigma_\phi = 0.13$

流条件相同时,双阶相位校正系统的误符号率要比单阶相位校正系统低3个数量级。这再一次说明了双阶相位校正算法的有效性。

## 5 结 论

本文提出了基于数字相位恢复算法的正交相移键控(QPSK)自由空间相干光通信系统。仿真结果表明该系统采用的二阶联合相位恢复算法可以极大地抑制由弱湍流所引起的信号退化以及由系统本身引入的相位噪声。此外,仿真结果还表明二阶联合相位恢复算法性能远好于一阶 $M$ 次方相位恢复算法。本系统在速率为20 Gbps、误符号率为 $10^{-8}$ 时的线宽容忍度可达10 MHz。因此,该系统的提出对于自由空间光通信性能的提升有着较大意义。

## 参考文献:

- [1] HOU L F, ZHANG L, KIM J. Energy modeling and power measurement for mobile robots [J]. *Energies*, 2019, 12(1): 27.
- [2] 马爽, 吴志勇, 高世杰, 等. 改进的大气激光通信 PPM 调制解调系统设计 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(5): 105-109.  
MA SH, WU ZH Y, GAO SH J, et al.. Design of modified atmospheric laser communication PPM modulation-demodulation system [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(5): 105-109. (in Chinese)
- [3] 宋少华, 全召民. 用于激光背光源电视的扫描分光与消散斑系统 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 271-278.  
SONG SH H, TONG ZH M. Scanning beam splitting and speckle reduction system for laser backlight TV [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(2): 271-278. (in Chinese)
- [4] 吴伟辉, 杨永强, 毛桂生, 等. 激光选区熔化自由制造异质材料零件 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 517-526.  
WU W H, YANG Y Q, MAO G SH, et al.. Free manufacturing of heterogeneous materials part by selective laser melting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 517-526. (in Chinese)
- [5] LI X L, GENG T W, MA SH, et al.. Performance improvement of coherent free-space optical communication with quadrature phase-shift keying modulation using digital phase estimation [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(16): 4695-4701.
- [6] LI L, GENG T W, WANG Y, et al.. Free-space optical communication using coherent detection and double adaptive detection thresholds [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 7900217.
- [7] 涂焱阳, 吴志勇, 马爽, 等. 阈值可变的高速光通信脉冲位置调制的帧同步 [J]. 中国激光, 2017, 44(11): 106008.  
TU Y Y, WU ZH Y, MA SH, et al.. Frame synchronization of pulse position modulation in high-speed optical communication with variable threshold [J]. *Chinese Lasers*, 2017, 44(11): 106008. (in Chinese)
- [8] LI Y T, GUO S A, GENG T W, et al.. Evaluation on the capacity and outage performance of the free space optical system impaired by timing jitters over an aggregate channel [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(7): 076108.
- [9] 徐春风, 倪小龙, 刘智. 激光大气湍流传输中的光强闪烁特性 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(10s): 183-189.  
XU CH F, NI X L, LIU ZH. Scintillation in turbulent atmosphere laser communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10s): 183-189. (in Chinese)
- [10] 谢伟良, 汤俊雄. 基于 Turbo 码的大气无线光通信系统特性分析 [J]. 中国激光, 2003, 30(9): 835-838.  
XIE W L, TANG J X. Analysis on characterization of atmospheric optical wireless communication system based on turbo code [J]. *Chinese Lasers*, 2003, 30(9): 835-838. (in Chinese)

- [11] 高宽,马晶,谭立英,等. 大气光通信中大气闪烁时间平滑效应研究 [J]. 光学学报,2006,26(4):481-486.  
GAO CH,MA J,TAN L Y,*et al.*. Time-averaging effects for atmospheric scintillation in atmospheric optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*,2006,26(4):481-486. (in Chinese)
- [12] 陈纯毅,杨华民,姜会林,等. 大气光通信中大气湍流影响抑制技术研究进展 [J]. 兵工学报,2009,30(6):779-791.  
CHEN CH Y,YANG H M,JIANG H L,*et al.*. Research progress of mitigation technologies of turbulence effects in atmospheric optical communication [J]. *Acta Armamentarii*,2009,30(6):779-791. (in Chinese)
- [13] IP E,KAHN J M. feedforward carrier recovery for coherent optical communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*,2005,23(9):2675-2692.
- [14] LI X,CAO Y W,YU S,*et al.*. A simplified feedforward carrier recovery algorithm for coherent optical QAM system [J]. *Journal of Lightwave Technology*,2011,29(5):801-807.
- [15] VITERBI A. Nonlinear estimation of PSK-modulated carrier phase with application to burst digital transmission [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*,1983,29(4):543-551.
- [16] LI M,CVIJETIC M. Coherent free space optics communications over the maritime atmosphere with use of adaptive optics for beam wavefront correction [J]. *Applied Optics*,2015,54(6):1453-1462.
- [17] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *Journal of the Optical Society of America*,1976,66(3):207-211.
- [18] FRIED D L. Optical heterodyne detection of an atmospherically distorted signal wave front [J]. *Proceedings of the IEEE*,1967,55(1):57-77.
- [19] FRIED D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures [J]. *Journal of the Optical Society of America*,1966,56(10):1372-1379.
- [20] FRIED D L. Optical heterodyne detection of an atmospherically distorted signal wave front [J]. *Proceedings of the IEEE*,1967,55(1):57-77.
- [21] BELMONTE A,KAHN J M. Capacity of coherent free-space optical links using diversity-combining techniques [J]. *Optics Express*,2009,17(15):12601-12611.
- [22] LY-GAGNON D S,TSUKAMOTO S,KATOH K,*et al.* Coherent detection of optical quadrature phase-shift keying signals with carrier phase estimation [J]. *Journal of Lightwave Technology*,2006,24(1):12-21.

#### 作者简介:



管海军(1981—),男,吉林长春人,吉林大学工学硕士,长春理工大学博士研究生,高级工程师,主要从事近地激光通信大气湍流影响抑制技术方面的研究。  
E-mail: navy2.14@163.com



刘云清(1970—),男,河南焦作人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事智能信息处理与自动控制技术方面的研究。  
E-mail: mzlyq@cust.edu.cn