

## 基于子空间的无线光通信副载波盲均衡算法研究

陈丹,柯熙政,乔薇

(西安理工大学自动化与信息工程学院,陕西西安710048)

**摘要:**文中基于Gamma-Gamma光强起伏分布大气湍流信道模型,对无线光副载波相移键控调制系统进行了子空间盲均衡算法的研究。对比分析了经过大气湍流信道盲均衡前后的副载波调制信号星座图聚敛性,给出了均衡后不同光强起伏方差下的误码率曲线,当 $\sigma_R^2=0.1$ ,信噪比为20 dB时,误码率从 $4.7\times 10^{-1}$ 降低到 $1.56\times 10^{-3}$ ,均衡后误码率明显改善。同时采用两种典型实测天气数据(阴、中雨)模拟大气信道进行了子空间盲均衡实验,均衡后调制信号星座图聚敛性与相位可识别性明显优于均衡前。仿真结果表明,子空间盲均衡算法对大气湍流信道下的副载波调制信号有良好的均衡效果。

**关键词:**无线光通信;副载波调制;子空间盲均衡;星座图

**中图分类号:** TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2528-07

## Blind equalization algorithm of wireless optical communication using subcarrier modulation based on subspace

Chen Dan, Ke Xizheng, Qiao Wei

(School of Automation and Information, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In this paper, subspace blind equalization algorithm of wireless optical communication using subcarrier modulation was studied based on Gamma-Gamma optical intensity scintillation distribution model. The constellations of the subcarrier multiple phase shift keying modulation signal through the atmospheric turbulence channel before and after the blind equalization was compared, and the bit-error-rate (BER) curves of the system under different scintillation distributions was given. When  $\sigma_R^2=0.1$  and SNB=20 dB, the BER was reduced from  $4.7\times 10^{-1}$  to  $1.56\times 10^{-3}$ . The BER performance was obviously improved. At the same time, measured data in two kinds of weather conditions (cloudy, rainy) which were described to atmospheric channel, was used in the experiment of subspace blind equalization. Clustering performance and phase identifiability of the constellation after equalization are obviously better than before equalization. The simulation results show that the subspace blind equalization algorithm has a good effects on equalization of subcarrier modulation signal under the atmospheric turbulence channel.

**Key words:** wireless optical communication; subcarrier modulation; subspace blind equalization; constellation

收稿日期:2014-12-11; 修订日期:2015-01-20

基金项目:国家自然科学基金(61377080);陕西省自然科学基金(2015JM6270,2013JQ8009);陕西省教育厅科学研究计划(14JK1542);西安理工大学科技创新基金(2013CX014)

作者简介:陈丹(1975-),女,博士,讲师,研究领域为大气激光通信及信号处理。Email: chdh@xaut.edu.cn

## 0 引言

无线光通信又称自由空间光通信 (Free Space Optical Communication, FSO), 是一种无需光纤的通信技术。它结合了光纤通信和其他无线通信方式的特点, 具有高宽带、低成本、安装快捷、机动灵活、抗干扰能力强等优点<sup>[1]</sup>。无线光通信普遍采用强度调制/直接检测 (Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD) 系统, 常用的调制方式有脉冲调制 (Pulse Position Modulation, PPM)、开关键控 (On-Off Keying, OOK) 等, 这些调制方式受大气湍流引起的光强起伏影响较大, 而副载波强度调制与脉冲调制相比是一种能有效克服大气湍流的调制方法, 因此文中盲均衡研究是针对副载波多进制相移键控调制 (MPSK) 系统进行的。由于大气湍流和大气色散等会造成激光光束的衰减和展宽, 从而导致码间干扰 (ISI) 的产生<sup>[2-3]</sup>, 给接收端副载波信号星座图检测带来巨大困难。信道均衡可以校正多径效应引起的信道畸变, 补偿信道的传输特性, 克服码间干扰, 提高信号检测识别率。

盲均衡算法已广泛应用于微波通信中, 参考文献[5]利用有理子空间及最小多项式基理论, 通过估计瞬时相关矩阵, 辨识出信道因数, 完成多输入多输出 (MIMO) 系统的盲均衡。参考文献[6]利用子空间跟踪盲均衡算法针对水下通信 MIMO 系统的信号恢复, 并验证了子空间算法在水声领域的可行性。在无线光通信中, 参考文献[7]中对无线光副载波四相相移键控调制信号采用了 Bussgang 类盲均衡算法, 研究了不同光强起伏方差下信道均衡算法性能及系统性能。文中研究了二阶循环统计量盲均衡算法中的子空间算法, 该算法相比 Bussgang 类盲均衡算法有更好的均衡性能<sup>[4]</sup>, 利用能准确描述大气光强起伏特性的 Gamma-Gamma 信道模型模拟大气湍流信道, 对接收端 MPSK 信号星座图均衡前后的聚敛性、系统误码率以及子空间算法中的信道估计进行了研究。

## 1 基于子空间均衡的系统模型

图 1 给出了均衡系统模型框图。发送端发送信号经过大气湍流信道后, 加上高斯噪声, 接收端接收到的信号经过子空间盲均衡后, 恢复出信号。子空间

均衡的目的就是使恢复信号和发送信号之间的误差最小。

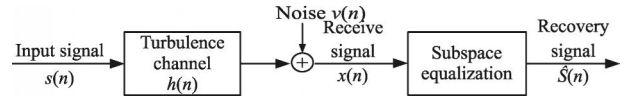


图 1 基于子空间盲均衡的大气信道系统模型框图

Fig.1 Block diagram of atmospheric-channel system based on subspace blind equalization

文中采用能较为准确描述光强起伏特性的 Gamma-Gamma 光强起伏分布模型来模拟大气湍流信道, Gamma-Gamma 模型<sup>[8]</sup>的概率分布函数定义为:

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I})}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \quad (1)$$

其中

$$\alpha = \left\{ \exp \left[ \frac{0.49\sigma_R^2}{(1+0.18d^2+0.56\sigma_R^{12/6})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[ \frac{0.5\sigma_R^2}{(1+0.9d^2+0.62\sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (2)$$

式中:  $d = (kD^2/4L)^{1/2}$ ,  $L$  为激光的传输距离,  $D$  为接收孔径的直径大小;  $\Gamma(x)$  是 gamma 函数;  $K_{\alpha-\beta}$  为阶数为  $\alpha-\beta$  的第二类修正贝赛耳函数;  $\alpha, \beta$  分别描述了小尺度和大尺度起伏,  $\sigma_R^2$  为激光强度闪烁方差, 它决定了大气湍流的强弱, 取值越大, 湍流强度越强; 反之越弱。

## 2 子空间盲均衡

### 2.1 SIMO 系统模型

一个连续时间通信系统可表示为<sup>[8-9]</sup>:

$$x(t) = \sum s(k)h(t-kT) + v(t) \quad (3)$$

式中:  $s(k)$  为发送端发送信号, 是一个有限字符序列;  $T$  为码元间隔;  $h(t)$  为信道传输函数;  $v(t)$  为高斯白噪声;  $x(t)$  为接收端接收信号。将接收信号  $x(t)$  以  $t=n(T/L)$  采样之后 ( $L$  表示子信道的个数), 系统等效为一个 SIMO 系统:

$$x(t)_{t=n(T/L)} = \sum s(k)h(nT/L-kT) + v(nT/L) \quad (4)$$

等效的离散时间系统表示为:

$$x(n) = \sum s(k)h(n-kP) + v(n) \quad (5)$$

对应的矢量表示为:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{\infty} s(k)H(n-k) + V(n) \quad (6)$$

式中:  $X(n) = [x_0(n), \dots, x_{L-1}(n)]^T$ ;  $H(n) = [h_0(n), \dots, h_{L-1}(n)]^T$ ;  $V(n) = [v_0(n), \dots, v_{L-1}(n)]^T$ 。

若  $h(t)$  表示阶数为  $MT_s$  的 FIR 滤波器, 则  $M$  表示的是子信道  $\{h_i(n)\}_{i=0}^{M-1}$  的阶数; 若矢量观察量的个数为  $N$ , 则公式(3)可以写成:

$$X_N(n) = HS_N(n) + V_N(n) \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} X_N(n) &= [X^T(n), X^T(n-1), \dots, X^T(n-N+1)]^T \\ S_N(n) &= [s(n), s(n-1), \dots, s(n-N+1)]^T \\ V_N(n) &= [V^T(n), V^T(n-1), \dots, V^T(n-N+1)]^T \\ H &= \begin{bmatrix} h(0) & h(1) & \dots & h(M) & \dots & 0 \\ 0 & h(0) & \dots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & h(M-1) & h(M) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

## 2.2 子空间算法

通过相关矩阵的定义式计算接收信号  $X_N$  的  $LN \times LN$  维相关矩阵  $R_N E(X_N X_N^H)$ , 可以得到<sup>[10]</sup>:

$$R_N = H_N R_S H_N^H + \sigma^2 I_{LN} \quad (9)$$

式中:  $R_S \triangleq E(SS^H)$  表示系统输入信号  $s(n)$  的  $(N+M) \times (N+M)$  维相关矩阵, 并且  $R_S$  是满秩的。如果  $\lambda_i$  表示  $R_N$  的特征值, 则其中  $M+N$  个较大的特征值所对应的特征向量就组成了信号子空间  $U_S = (u_0, \dots, u_{M+N-1})$ ; 剩下的特征值所对应的特征向量就组成了噪声子空间  $U_V = (u_{M+N}, \dots, u_{LN-1})$ , 因此接收信号的相关矩阵  $R_N$  可以表示为:

$$R_N = U_S \text{diag}(\lambda_0, \dots, \lambda_{M+N-1}) U_S^H + \sigma^2 U_V U_V^H \quad (10)$$

由特征向量之间的正交关系可知信号子空间与噪声子空间互为正交补空间。从公式(9)可以看出: 传输矩阵  $H_N$  的列展开空间同样是信号子空间, 因此  $H_N$  的列向量和  $U_V$  的列向量之间存在如下的正交关系<sup>[11]</sup>:

$$U_V^H H_N = 0 \quad (11)$$

令系统的均衡器表示为  $\varepsilon = H_N^+$ , 则由 Moore-Penrose 逆的性质可知:

$$\varepsilon = H_N^+ = (H_N^H H_N)^{-1} H_N^H \quad (12)$$

由  $R_N$  的特征值分解可以得到  $H_N$  的奇异值分

解式:

$$H_N = U_S \text{diag}(\lambda_0 - \sigma^2)^{1/2}, \dots, (\lambda_{M+N-1} - \sigma^2)^{1/2} W^H \quad (13)$$

将其代入公式(11)中可以得到:

$$\varepsilon = W \text{diag}(\lambda_0 - \sigma^2)^{-1/2}, \dots, (\lambda_{M+N-1} - \sigma^2)^{-1/2} U_S^H \quad (14)$$

最终化简得到:

$$\varepsilon = H_N^H U_S \text{diag}(\lambda_0 - \sigma^2)^{-1}, \dots, (\lambda_{M+N-1} - \sigma^2)^{-1} U_S^H \quad (15)$$

由此均衡得以实现。

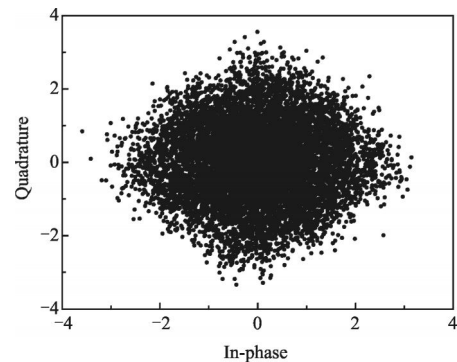
由上述分析可知, 子空间盲均衡的过程基本上可以分成两个部分: 信道估计和信道均衡。信道估计主要是利用信号子空间和噪声子空间的正交性关系, 用矩阵的奇异值分解计算并估计出信道传输矩阵  $H$ , 再进行系统的均衡。信道估计的准确性对下一步的均衡效果有一定的影响。

## 3 仿真结果分析

### 3.1 Gamma-Gamma 信道下的均衡

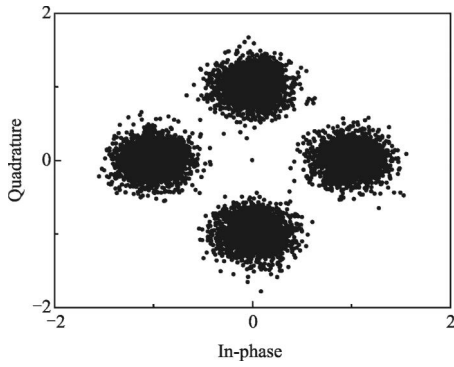
文中采用子空间盲均衡算法仿真对比了经过大气湍流信道前后的信号星座图, 并给出了子空间均衡算法中信道估计仿真图。发送端以 QPSK、8PSK、16PSK 副载波调制作为输入信号, 其中, 信号序列长度取 10 000, 信噪比取 15 dB, 子信道个数  $L=4$ , 信道长度  $M=4$ , 平滑因子  $N=5$ , 同时, Gamma-Gamma 信道模型中的光强起伏方差取  $\sigma_R^2=0.1$ 。

图 2~4 分别给出了 QPSK、8PSK、16PSK 信号经过 Gamma-Gamma 大气信道后进行盲均衡前后的星座图对比。由图可以看出, 均衡前在大气湍流的影响下副载波调制信号的星座图中采样点很密集, 成块状, 无法分辨出调制类型相位信息。采用子空间算法进行盲均衡后, QPSK 和 8PSK 星座图相位聚敛性明显, 而 16PSK 均衡前成块的星座点均



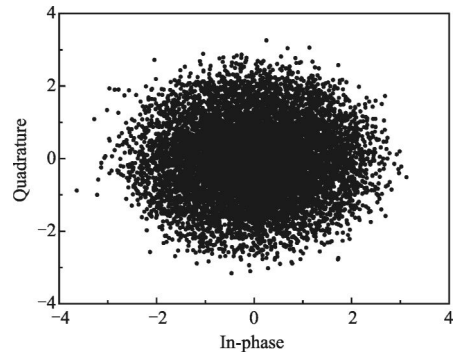
(a) 均衡前星座图

(a) Constellation before equalization



(b) 均衡后星座图

(b) Constellation after equalization

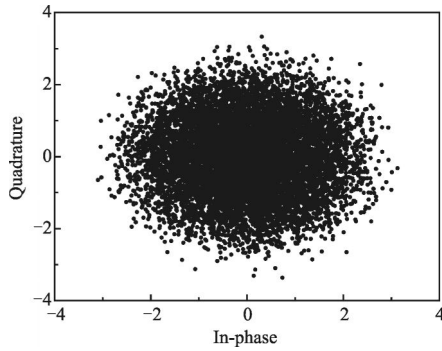


(a) 经过湍流信道后均衡前星座图

(a) Constellation before equalization and after going through turbulence channel

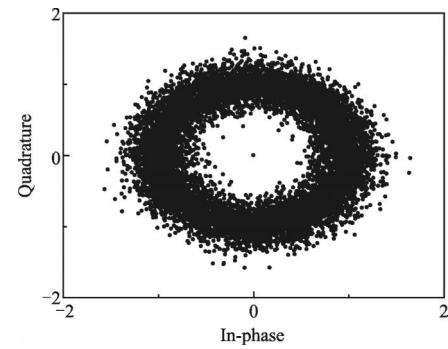
图 2 子空间算法均衡前后 QPSK 调制信号的星座图

Fig.2 Constellation of QPSK modulation signal before and after using subspace equalization algorithm



(a) 均衡前星座图

(a) Constellation before equalization

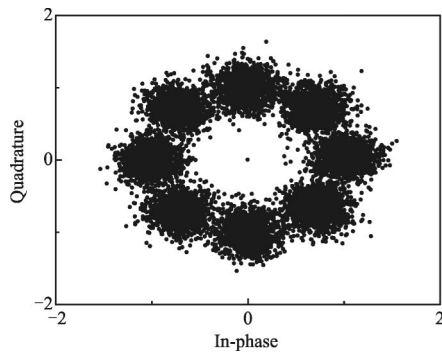


(b) 均衡后星座图

(b) Constellation after equalization

图 4 子空间算法均衡前后 16PSK 调制信号的星座图

Fig.4 Constellation of 16PSK modulation signal before and after using subspace equalization algorithm



(b) 均衡后星座图

(b) Constellation after equalization

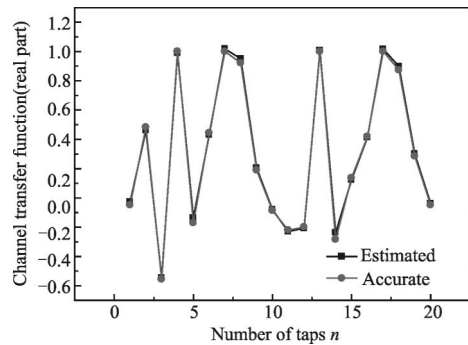
图 3 子空间算法均衡前后 8PSK 调制信号的星座图

Fig.3 Constellation of 8PSK modulation signal before and after using subspace equalization algorithm

均衡后基本张开成环状,16 个相位信息虽不明显,但星座图也得到相应的改善,表明采用子空间盲均衡算法对大气湍流引起的光强起伏影响有一定的抑制作用,尤其是对低阶的 QPSK 和 8PSK 信号。由图 2 还可

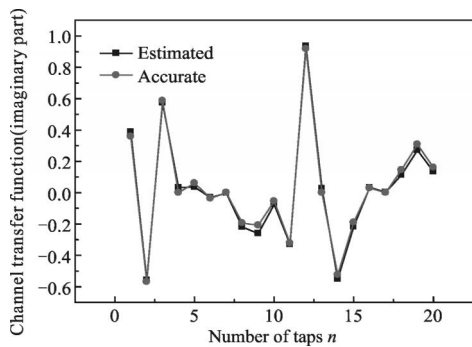
看出,在光强起伏方差  $\sigma_R^2=0.1$  时,子空间盲均衡算法与参考文献[7]中使用的 Bussgang 类盲均衡算法相比,星座图的聚敛性更明显,说明子空间盲均衡算法相比 Bussgang 类盲均衡算法对抑制大气湍流的影响更有效。

由于在子空间盲均衡算法中,需要对信道进行估计,因此,图 5 和图 6 分别给出了当  $\sigma_R^2=0.1$  和  $\sigma_R^2=0.5$  时,子空间盲均衡算法中估计的信道响应和模拟



(a) 实部比较

(a) Comparison of real part

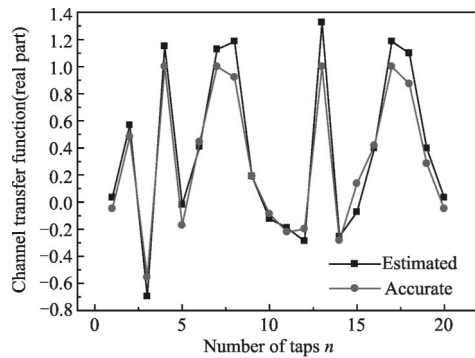


(b) 虚部比较

(b) Comparison of imaginary part

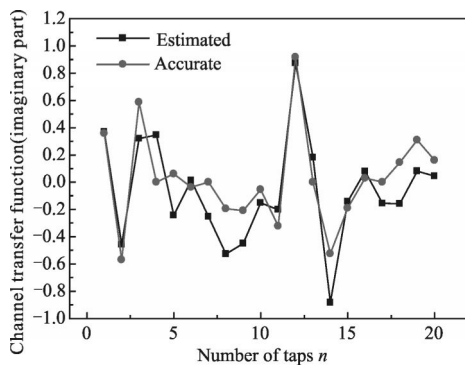
图 5  $\sigma_R^2=0.1$  时估计信道与实际信道的比较

Fig.5 Compared the estimate channel with the actual channel when  $\sigma_R^2=0.1$



(a) 实部比较

(a) Comparison of real part



(b) 虚部比较

(b) Comparison of imaginary part

图 6  $\sigma_R^2=0.5$  时估计信道与实际信道的比较

Fig.6 Comparison of estimate channel with actual channel when  $\sigma_R^2=0.5$

大气湍流信道响应的比较。由于子空间均衡效果与算法中的信道估计关系密切,因此信道估计的准确性会直接影响最后的均衡效果。通过对图 5 和图 6 对比可以看出,由于光强起伏方差  $\sigma_R^2$  的大小决定了

大气湍流强度的大小,  $\sigma_R^2$  取值越小,信道估计越准确,随着  $\sigma_R^2$  的增大,信道估计出现偏差。因此,在湍流强度越小的情况下,子空间算法中的信道估计越逼近实际信道。

图 7 给出了 8PSK 信号经过大气湍流信道,在不同光强起伏方差下采用子空间盲均衡后系统误码率曲线。由图 7 可以看出,在系统相同信噪比下,  $\sigma_R^2$  越大,误码率越大;随着信噪比的增大,均衡后误码率有显降低的趋势,且  $\sigma_R^2$  越小,下降的速度越快。当信噪比为 20 dB,  $\sigma_R^2=0.2$  时,均衡前系统误码率约为  $4.7 \times 10^{-1}$ ,均衡后降到  $3.79 \times 10^{-2}$ ,当  $\sigma_R^2=0.01$ ,误码率已从均衡前  $4.68 \times 10^{-1}$  下降到均衡后  $5.33 \times 10^{-4}$ 。由此可知,子空间盲均衡算法能有效抑制光强起伏对副载波信号传输的影响,降低系统误码率。

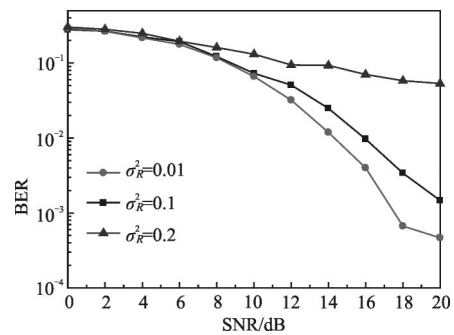


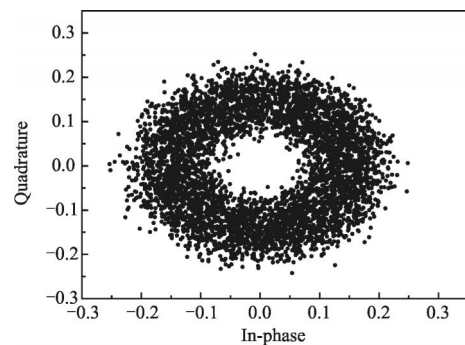
图 7 不同  $\sigma_R^2$  取值下信道均衡后误码率曲线图

Fig.7 Bit error rate(BER)curve with different values of  $\sigma_R^2$  after

equalization algorithm

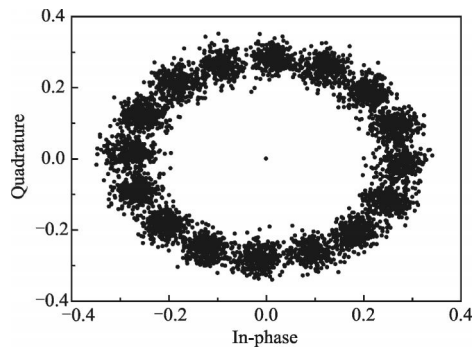
### 3.2 不同实测天气数据模拟大气信道

恶劣天气会引起载有信息的光信号产生散射和衰减,严重造成功率衰减和误码。因此,文中还利用了课题组外场实测的阴天和中雨天气数据<sup>[12]</sup>来模拟大气信道,对 16PSK 调制信号进行子空间盲均衡实验。图 8 和图 9 分别给出了阴天和中雨天气条件下均衡



(a) 均衡前

(a) Before equalization

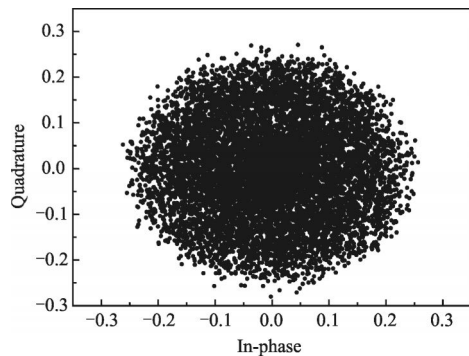


(b) 均衡后

(b) After equalization

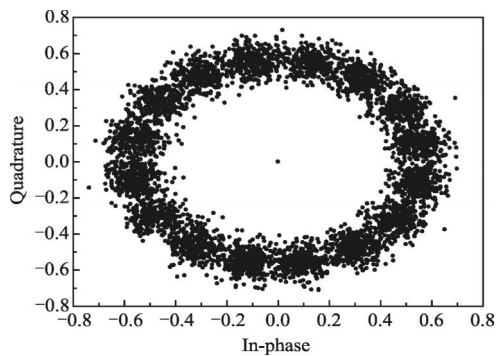
图 8 阴天天气下子空间盲均衡前后 16PSK 星座图

Fig.8 Constellation of 16PSK modulation signal before and after using subspace equalization algorithm under cloudy



(a) 均衡前

(a) Before equalization



(b) 均衡后

(b) After equalization

图 9 中雨天气下子空间盲均衡前后 16PSK 星座图

Fig.9 Constellation of 16PSK modulation signal before and after using subspace equalization algorithm under rainy

前后 16PSK 信号星座图。中雨和阴天天气相比,中雨对传输信号的衰减和散射影响更大,因此均衡前信号弥散程度比阴天更严重,呈片状;但是利用子空间进行均衡之后可看出,阴天下星座图信号相位聚敛性增

强,16PSK 信号 16 个相位明显分开;雨天下的星座图均衡后成环状,相位也基本可识别,均衡后的星座图有利于接收端星座图检测。实验表明子空间盲均衡对天气的影响具有良好的信道均衡实际效果。

## 4 结 论

文中基于 Gamma-Gamma 模型来模拟大气湍流信道,建立了基于大气信道的副载波调制系统模型;采用子空间盲均衡算法对副载波 MPSK( $M=4, 8, 16$ ) 信号进行了均衡。通过仿真实验可以看出:子空间均衡算法可以较为准确地估计出大气信道,并且能有效降低系统误码率;与 Bussgang 类盲均衡算法相比,子空间算法对高阶副载波 MPSK( $M \geq 16$ ) 信号有更好的抑制光强起伏影响的能力。同时,实验中还利用典型实测天气数据来模拟大气信道特性,由均衡后星座图的聚敛性可以看出:子空间均衡算法对于改善恶劣天气对信号传输的影响也有较满意的效果。

## 参 考 文 献:

- [1] Gazzah H, Delmas J P. Subspace blind MIMO channel equalization with quadratic complexity[C]//2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), 2012: 236-240.
- [2] Cheng Zhanxin, Li Jinjun, Zheng Zhenyu. An blind equalization algorithm for underwater acoustic communication systems [C]//2013 6th International Congress on Image and Signal Processing(CISP), 2013: 1387-1390.
- [3] Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katsunori. Performance of free space optical communication over gamma-gamma atmosphere turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1318-1322. (in Chinese)  
韩立强,王祁,信太克归. Gamma-gamma 大气湍流下自由空间光通信的性能 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1318-1322.
- [4] Ma Chunhua, Feng Dazheng. Subspace-based techniques for certain blind equalization [J]. *Journal of Xidian University*, 2005, 32(5): 716-719, 728. (in Chinese)  
马春华,冯大政. 利用子空间算法实现一类盲均衡的方法 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2005, 32(5): 716-719, 728.
- [5] Zhang Hengbin. MIMO-OFDM blind channel estimation based on subspace algorithm [J]. *Software Guide*, 2011, 10(10): 61-63. (in Chinese)

- 张恒斌. 基于子空间算法的 MIMO-OFDM 盲信道估计研究[J]. 软件导刊, 2011, 10(10): 61-63.
- [6] Gao Chengzhi, He Yuanyuan, Zhang Xinhua. An blind equalization algorithm using subspace tracking method for MIMO underwater acoustic communication systems [J]. *Technical Acoustics*, 2008, 27(5): 502-503. (in Chinese)  
高成志, 河源渊, 章新华. 一种应用于 MIMO 水声通信系统的子空间跟踪盲均衡算法 [J]. 声学技术, 2008, 27(5): 502-503.
- [7] Chen Dan, Ke Xizheng, Li Jianxun. Blind equalization algorithm of wireless optical communication using subcarrier modulation over turbulence channel [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42 (09): 1025 -1030. (in Chinese)  
陈丹, 柯熙政, 李建勋. 湍流信道下无线光副载波盲均衡算法研究[J]. 光子学报, 2013, 42(09): 1025-1030.
- [8] Pan Junjun, Jia Zhenhong. Performance analysis of atmospheric laser communication system with subcarrier modulation over Gamma-Gamma turbulence [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(8): 953-955. (in Chinese)  
潘俊俊, 贾振红. Gamma-Gamma 湍流中副载波大气光通信系统的性能分析[J]. 光电子·激光, 2007, 18(8): 953-955.
- [9] Li Jing. A Study of blind equalization algorithm based on second-order statistics [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007. (in Chinese)  
李静. 基于二阶统计量盲均衡算法的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [10] Dai Songyin, Yuan Sijie, Dong Shupan. Effective channel order estimation based on subspace decomposition [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(6): 1245-1248. (in Chinese)  
代松银, 袁嗣杰, 董书攀. 基于子空间分解的信道阶数估计算法[J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1245-1248.
- [11] Guo Jianhua, Zhang Liyi, Zhao Jumin, et al. SUB-CMOE blind equalization algorithm using second-order statistics and being based on cyclostationarity theory[J]. *Computer Engineering and Design*, 2008, 29(24): 6218-6220. (in Chinese)  
郭建华, 张立毅, 赵菊敏, 等. 基于循环平稳二阶统计量的 SUB-CMOE 盲均衡算法[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(24): 6218-6220.
- [12] Chen Lixin. Experimental measurement of atmosphere [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese)  
陈丽新. 大气激光通信系统的实验测量[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.