

基于差分混沌键控的空间光通信系统及其保密性分析

郭锐强^{1,2,3}, 李珉^{3*}, 吴君鹏⁴, 刘鑫¹, 魏子康²

- (1. 长春工业大学人文信息学院, 吉林 长春 130122;
2. 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;
3. 长春大学中俄学院, 吉林 长春 130022;
4. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要:自由空间光通信(FSO)是一种通过激光在无需光纤的情况下实现双向信息传输的通信系统。它具有带宽宽、保密性好、抗干扰性强、无需频率申请、体积小、功耗低等特点。尽管 FSO 通信系统有较高的安全性,但波束溢出还是会威胁到通信的安全,在通信中采用混沌加密的方式可有效地提高系统的安全性。采用差分混沌键控(DCSK)的 Gamma-Gamma 湍流模型来提高 FSO 通信系统的安全性,推导了系统误码率的表达式。通过空间信道图像数据的传输,对接收到的数据进行统计直方图、像素相关性和明文敏感性分析,结果表明系统具有很好的保密性能。

关键词:自由空间光通信; Gamma-Gamma 湍流模型; 差分混沌键控

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200207

Space optical communication systems based on differential chaotic keying and its security analysis

Guo Ruiqiang^{1,2,3}, Li Min^{3*}, Wu Junpeng⁴, Liu Xin¹, Wei Zikang²

- (1. College of Humanities & Information Changchun University of Technology, Changchun 130122, China;
2. School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
3. China-Russia Institute, Changchun University, Changchun 130022, China;
4. School of Electronic Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: Free space optical communication (FSO) is a communication system that realizes two-way information transmission through laser without optical fiber. It has the characteristics of wide bandwidth, good confidentiality, strong anti-interference, no frequency application, small size and low power consumption. Despite the high security of the FSO communication system, beam overflow still threatens the security of the communication. The use of chaotic encryption in communication can effectively improve the security of the system. In this paper, the differential chaos keying (DCSK) Gamma-Gamma turbulence model was used to improve the security of the FSO communication system, the expression of the system bit error rate was derived. Through the image data transmission of spatial channel, and the

收稿日期:2020-04-07; 修订日期:2020-05-21

基金项目:吉林省教育厅科研项目(JKH20180440KJ)

作者简介:郭锐强(1983-),男,高级实验师,博士,主要从事无线光通信与光信息对抗技术方面的研究。Email: grq8888@163.com

通讯作者:李珉(1981-),男,副教授,博士,主要从事无线光通信及信号处理方面的研究。Email: 27153400@qq.com

statistical histogram, pixel correlation and plaintext sensitivity were analyzed on the received data, the results show that the system has good security performance.

Key words: FSO communication; Gamma-Gamma turbulence model; differential chaos shift keying (DCSK)

0 引言

近年来,因自由空间光通信具有带宽、保密性好、抗干扰性强、体积小、功耗低等特点,使其应用范围越来越广泛。随着信息技术的不断发展,当前社会已经从工业社会步入到信息社会,人们的生活已经与信息系统密不可分,信息的安全问题也更加突出。与传统的射频系统相比,自由空间光学通信有更好的方向性和安全性,因此很难拦截它们。

随着光通信技术的发展,现在可以在不阻断光束传播的情况下就能获取信息,所以在自由空间光通信系统进行加密是必要的^[1]。由于上述原因,自由空间光通信系统的安全性方面引起了很多关注,研究人员已经提出了多种改进自由空间光通信系统安全性的方法,将混沌信号用于自由空间光通信系统是新兴技术之一。

1 湍流模型和差分混沌移位键控模型

1.1 Gamma-Gamma 分布模型

很多学者认为如果分析弱湍流条件下,光强闪烁会服从标准对数分布,如果分析强湍流条件下,光强闪烁会接近 K 分布和负指数分布。Andrews 等科研人员通过一系列努力完善并改进了 Rytov 的光场理论,并提出了 Gamma-Gamma 分布模型^[2-5]。

在 Gamma-Gamma 光强起伏分布的模型当中,采用一个乘积 $I=xy$ 来表示接收端的光强,表达式中的 x 为大尺度散射系数, y 为小尺度散射系数,这两个变量均服从 Gamma 分布,如果这两个变量均属于独立随机过程,那么接收光强的二阶矩阵为:

$$E(I^2)=E(x^2)E(y^2)=(1+\sigma_x^2)(1+\sigma_y^2) \quad (1)$$

式中: σ_x^2 为 x 的方差; σ_y^2 为 y 的方差。为了简化计算,设 Gamma-Gamma 分布光强的均值 $E(I)=1$ 。根据公式(1)可以得到闪烁指数如下所示:

$$\sigma_I^2=(1+\sigma_x^2)(1+\sigma_y^2)-1=\sigma_x^2+\sigma_y^2+\sigma_x^2\sigma_y^2 \quad (2)$$

x 与 y 的分布函数如下两式所示:

$$f_G(x)=\frac{\alpha(\alpha x)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}\exp(-\alpha x) \quad (x>0, \alpha>0) \quad (3)$$

$$f_G(y)=\frac{\beta(\beta x)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)}\exp(-\beta y) \quad (x>0, \alpha\beta>0) \quad (4)$$

式中: α 与 β 均大于零,前者代表影响辐射光强的大尺度散射气旋数,后者代表小尺度气旋数; $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数; $f_G(I/x)$ 为强气旋条件下产生的光强增益 x 的条件概率,用下式表示:

$$f_G(I/x)=\frac{1}{x}f_G(I/x)=\frac{(\beta I)^\beta}{\beta x^\beta \Gamma(\beta)}\exp(-\beta I/x) \quad (5)$$

$$f_{G-G}(I)=\frac{1}{x} \int_0^\infty f_G(I/x)f_G(x)dx=$$

$$\frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta} [2\sqrt{\alpha\beta I}]}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \quad I>0 \quad (6)$$

$$\alpha=\left\{\exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}}\right]-1\right\}^{-1} \quad (7)$$

$$\beta=\left\{\exp\left[\frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right]-1\right\}^{-1} \quad (8)$$

式中: $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 为 $\alpha-\beta$ 阶第二类修正贝塞尔函数; $C_R^2=1.23C_k^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 为 Rytov 方差,在此代表的是折射率结构参数, $k=2\pi/\lambda$ 是波数, λ 为波长, L 为传输链路的长度。

Gamma-Gamma 模型适用于各种湍流情况,包括弱湍流、中湍流和强湍流,由公式(7)、(8)可以获得给定状态下 α 、 β 的具体数值,这些数值和具体的湍流条件下 Rytov 方差的值之间的关系如表 1 所示。

表 1 不同大气湍流状态的 Rytov 方差

Tab.1 Rytov variance of different atmospheric turbulence states

| Parameters | Weak turbulence | Moderate turbulence | Strong turbulence |
|--------------|-----------------|---------------------|-------------------|
| σ_x^2 | 0.3 | 1.2 | 4.2 |
| α | 8.41 | 4.20 | 4.39 |
| β | 6.92 | 2.27 | 1.29 |

图 1 为不同湍流强度下 Gamma-Gamma 的概率密度函数。从图中可以看出,在湍流强度 σ_R^2 的取值分别为 0.3、1.2、4.2 三种不同情况下 Gamma-Gamma 信道概率密度函数, Rytov 方差的值会影响“拖尾”, 值越大拖尾就会越长, 在弱湍流的区域, Gamma-Gamma 模型非常接近于高斯分布。

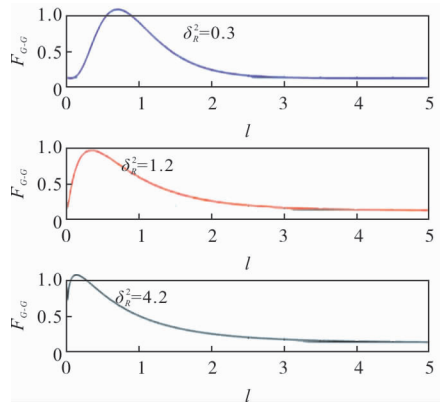


图 1 不同湍流强度下 Gamma-Gamma 的概率密度函数

Fig.1 Gamma-Gamma probability density function under different turbulence intensities

1.2 差分混沌移位键控模型

在差分混沌移位键控(DCSK)系统中,将传输的信号分成两部分,分别是参考信息段和信息承载段,原始的信息经过调制以后再由位于参考段的混沌序列生成的载波进行扩频处理,再经过延迟半个周期进行传输,这样在接收端就可以不再进行混沌同步,这么做的目的就是为了适应各种各样复杂的通信环境,并且能够具有很好的抵抗噪声的能力^[6]。

DCSK 系统的基本调制原理如图 2 所示。

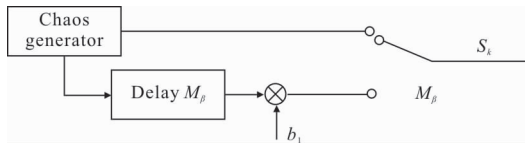


图 2 DCSK 调制原理框图

Fig.2 Block diagram of DCSK modulation

DCSK 系统解调原理框图如图 3 所示。

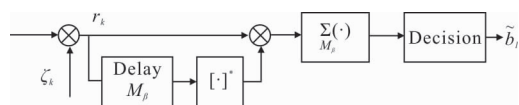


图 3 DCSK 解调原理框图

Fig.3 Block diagram of DCSK demodulation principle

图 2~3 为 DCSK 系统的调制和解调原理图。假设传输第一个符号,在系统的发送端,先将一个信号周期 T_b 分成两个时隙,第一个时隙用来做参考段,其作用是将混沌信号发生器产生的混沌序列 $x=\{x_1, x_2, \dots, x_{M_\beta}\}$ 进行传送,第二个时隙用来传送调制后的数据,即信息承载段,此时如果发送数字信息是“1”时,后半段就成为参考混沌信号;反之如果发送数字信息是“-1”的时候,后半段的内容就将参考混沌信号取反,以此类推,用数学表达式说明发送端发送第 k 个符号,如公式(9)所示:

$$s_k = \begin{cases} x_k & k=1, 2, \dots, M_\beta \\ b_l x_{k-M} & k=M_\beta+1, M_\beta+2, \dots, 2M_\beta \end{cases} \quad (9)$$

这里以高斯白噪声为例,如果系统传输时经过高斯白噪声信道,接收端收到的即为:

$$r_k = \begin{cases} x_k + \zeta_k & k=1, 2, \dots, M_\beta \\ b_l x_{k-M} + \zeta_k & k=M_\beta+1, M_\beta+2, \dots, 2M_\beta \end{cases} \quad (10)$$

如果接收端将接收到的信号进行非相干解调,即将信号的前半段延时,然后再与后半段信号进行乘法运算,这样经过积分以后得到的判决变量可以用公式(11)描述为:

$$Y(n) = \sum_{k=1}^{M_\beta} [x_k + \zeta_k] [b_l x_k + \zeta_{k+M_\beta}] = \sum_{k=1}^{M_\beta} [b_l x_k^2 + b_l x_k \zeta_k + x_k \zeta_{k+M_\beta} + \zeta_k \zeta_{k+M_\beta}] \quad (11)$$

表达式共有四个组成部分,第一部分是包含信息的有用项,其余三项都是干扰项,经过判决器的抽样判决变量 $Y(n)$ 的正负不同取值来进行解调操作从而获得原始的待传信息,即 $Y(n) \geq 0$ 的时候认为信息为 $b_l=1$,反之认为信息为 $b_l=-1$,可以用公式(12)表示为:

$$\tilde{b}_i = \text{sign}[Y(n)] \quad (12)$$

2 通信系统模型

系统信息传输属于典型的点对点的空间光通信模式,如果信息在传输的时候经过了加性高斯白噪声信道,激光束会受到湍流的影响再经过时水平路径进行传播。信道的模型可以用 $Y=HX+\zeta$ 来设计, Y 就是接收端收到的信号, H 是瞬时的强度增益, X 是传输的调制信号,功率谱密度为 $N_0/2$ 的高斯白噪声

信道,用随机过程来表示大气湍流引起的衰落,用遵循双伽马分布的随机变量 A 来表示。

由此,每个信息比特的瞬时信噪比 γ_b 会成为一个随机变量,具体数值可以由 $\gamma_b = A^2 \frac{E_b}{N_0}$ 计算得出。

考虑大气湍流的统计特性时,依然可以根据 Gamma-Gamma 信道的湍流模型进行分析,用 Gamma-Gamma 分布建立数学模型时,瞬时信噪比的概率密度可以用下式描述:

$$f_{G-G}(\gamma_b) = \frac{\alpha\beta^{\frac{\alpha+\beta}{2}} \gamma_b^{-\frac{\alpha+\beta}{4}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \gamma_b^{\frac{\alpha+\beta}{4}-1} \times K_{\alpha-\beta} \left[2\sqrt{\alpha\beta} \sqrt{\frac{\gamma_b}{\gamma_b}} \right] \quad (13)$$

式中: $\bar{\gamma}_b$ 即为瞬时信噪比, $\bar{\gamma}_b = \frac{E_b}{N_0} E\{A^2\}$ 。

$$K_\nu(x) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left(\frac{x^2}{4} \left[\frac{\nu}{2}, -\frac{\nu}{2} \right] \right) \quad (14)$$

这样公式(13)就可以被简化成下述形式:

$$f_{G-G}(\gamma_b) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\gamma_b} G_{0,2}^{2,0} \left(\alpha\beta \sqrt{\frac{\gamma_b}{\gamma_b}} \left[\alpha, \beta \right] \right) \quad (15)$$

DCSK 方式的误码率可以采用每比特的信噪比进行计算。

$$P_{DCSK}(\gamma_b) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\left(\frac{1}{M_\beta} + \frac{4}{\gamma_b} + \frac{2M_\beta}{\gamma_b^2} \right)^{-1}} \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\left(\frac{4}{\gamma_b} + \frac{2M_\beta}{\gamma_b^2} \right)^{-1}} \quad (16)$$

$$P_E = \int_0^\infty P_{DCSK}(\gamma_b) f_{G-G}(\gamma_b) d\gamma_b \quad (17)$$

为了进一步得到误码率的计算公式,将 $f_{G-G}(\gamma_b)$ 和 $P_{DCSK}(\gamma_b)$ 代入公式(17)计算可得到:

$$P_E = \frac{1}{4\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^\infty \frac{1}{\gamma_b} \operatorname{erfc} \sqrt{\left(\frac{4}{\gamma_b} + \frac{2M_\beta}{\gamma_b^2} \right)^{-1}} \times G_{0,2}^{2,0} \left(\alpha\beta \sqrt{\frac{\gamma_b}{\gamma_b}} \left[\alpha, \beta \right] \right) d\gamma_b \quad (18)$$

这里的互补误差函数依然可以使用 Meijer-G 函数来表示:

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{1,1} \left(x^2 \left[\frac{1}{2}, 0 \right] \right) \quad (19)$$

所以,公式(18)可以用下式表示:

$$P_E = A \int_0^\infty \gamma_b^{-1} G_{0,2}^{2,0} \left(E\sqrt{\gamma_b} \left[\alpha, \beta \right] \right) d\gamma_b - \frac{A}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \gamma_b^{-1} G_{0,2}^{2,0} \left(E\sqrt{\gamma_b} \left[\alpha, \beta \right] \right) \times G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{4}{\gamma_b} \left(1 + \frac{M}{2\gamma_b} \right)^{-1} \left[\frac{1}{2}, 0 \right] \right) d\gamma_b \quad (20)$$

为了求出 P_E 的结果,需要公式(20)中的积分当中的积分,原式中前面的积分可以写成:

$$I_1 = A \int_0^\infty \gamma_b^{-1} G_{0,2}^{2,0} \left(E\sqrt{\gamma_b} \left[\alpha, \beta \right] \right) d\gamma_b \quad (21)$$

后面的积分可以写成:

$$I_2 = \frac{A}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \gamma_b^{-1} G_{0,2}^{2,0} \left(E\sqrt{\gamma_b} \left[\alpha, \beta \right] \right) \times G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{4}{\gamma_b} \left(1 + \frac{M}{2\gamma_b} \right)^{-1} \left[\frac{1}{2}, 0 \right] \right) d\gamma_b \quad (22)$$

得到误码率的最终计算表达式:

$$P_E = \frac{1}{2} - \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{5,2}^{1,5} \left(\frac{4\gamma_b}{\alpha\beta} \left[\frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\beta}{2}, \frac{1-\beta}{2}, 1 \right] \right) \quad (23)$$

3 数值仿真分析

3.1 误码率分析

使用 Gamma-Gamma 湍流模型,得到的低湍流、中湍流和强湍流的条件(见第 1.1 节表 1)。

由图 4 可知,在链路长度为 $L=1\ 000\ \text{m}$ 时,三种湍流条件下按照强、中、弱排序, σ_r^2 的取值分别为 0.3、1.2 和 4.2。可以得到湍流的强度越高,系统的性

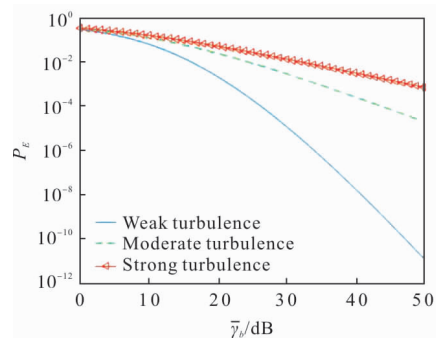


图 4 不同湍流条件下误码率与平均 SNR 的关系曲线($L=1\ 000\ \text{m}$)
Fig.4 Relationship between bit error rate and average SNR under different turbulent conditions ($L=1\ 000\ \text{m}$)

能就会下降得越严重。在给定数值，比如误码率为 10^{-3} 时，可以看出，中湍流和弱湍流相比，信噪比恶化了 14 dB 左右。

如图 5 所示，在链路长度分别为 1 000、1 500、2 000、2 500 m 时，链路长度越长，系统的误码率就会越高，意味着通信系统的性能逐渐降低。

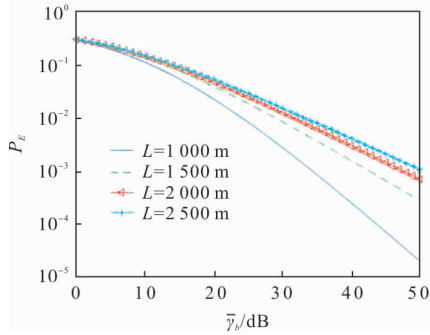


图 5 中等湍流下不同链路长度对误码率的影响

Fig.5 Influence of different link lengths on bit error rate under moderate turbulence

3.2 保密性能分析

用实验验证的方法来检验建立的混沌保密通信系统。以传送“circuit”图像为例，通过像素相关性分析、统计直方图、明文敏感性分析验证系统的安全性能^[7-10]。

(1) 经过加密后的图像信息、原始图像和解密图像如图 6~8 所示。

如图 6 和 7 所示，加密之前和加密之后二者的直方图存在很大不同。图中的横坐标是灰度分布，从图中可以看出，原始图像信息分布没有规律，经过加密以后像素在分布上比较均匀。从取值概率上来看已经近乎一致，所以单纯使用统计分析的方法来破译系统传输的信息难度很大。

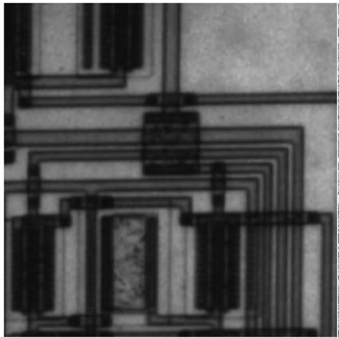


图 6 原始图像

Fig.6 Original image

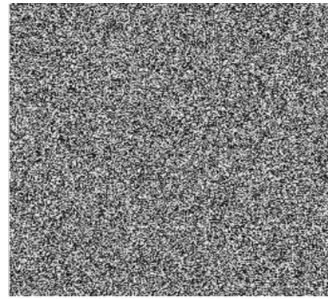


图 7 加密图像

Fig.7 Encrypted image

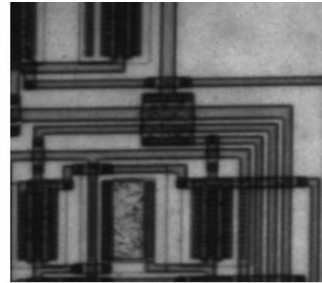


图 8 解密图像

Fig.8 Decrypted image

(2) 统计直方图

加密前后的直方图如图 9、10 所示。

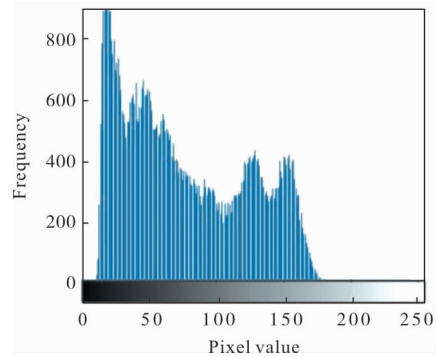


图 9 原始图像的直方图

Fig.9 Histogram of original image

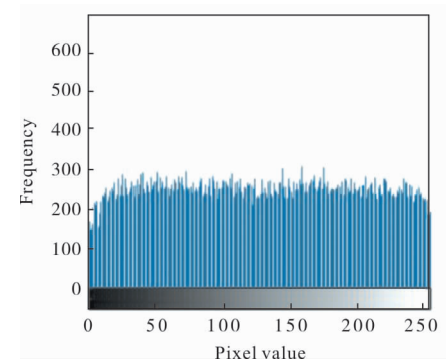


图 10 加密图像的直方图

Fig.10 Histogram of encrypted image

(3) 像素相关性分析

分析像素相关性采用对角方向、垂直方向和水平方向的三种相邻像素点进行分析。分析相关性往往采用下列四个表达式：

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{D(x) \cdot D(y)}} \quad (24)$$

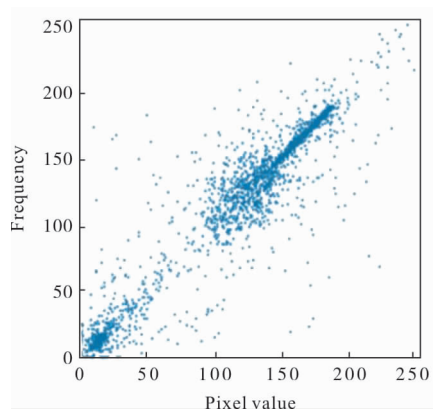
$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - E(x))(y_i - E(y)) \quad (25)$$

$$D(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - E(x))^2 \quad (26)$$

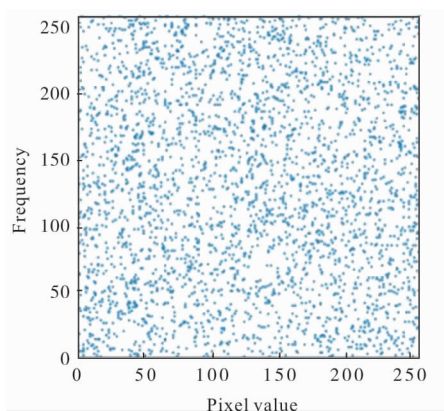
$$E(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (27)$$

从图 11~13 中可以明显看出，其在对角方向、垂直方向和水平方向相邻像素之间的相关性有巨

大的变化，密文对相邻像素的依赖明显比明文的影响小。



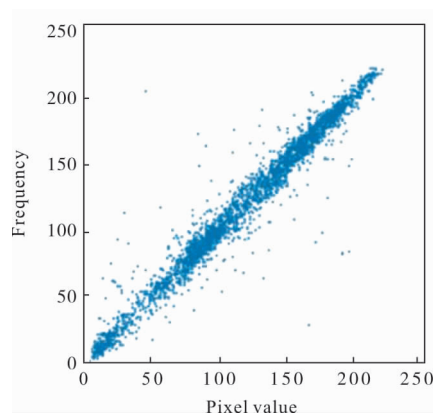
(a) 原始图像
(a) Original image



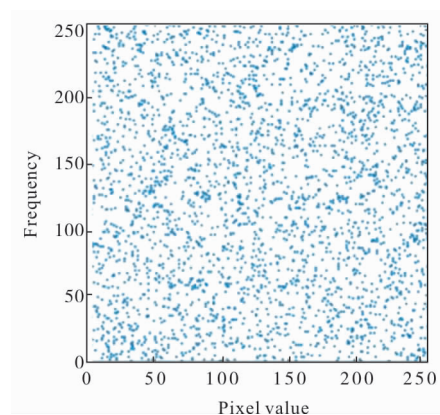
(b) 加密图像
(b) Encrypted image

图 11 水平邻近像素灰度相关性

Fig.11 Gray correlation of horizontally adjacent pixels



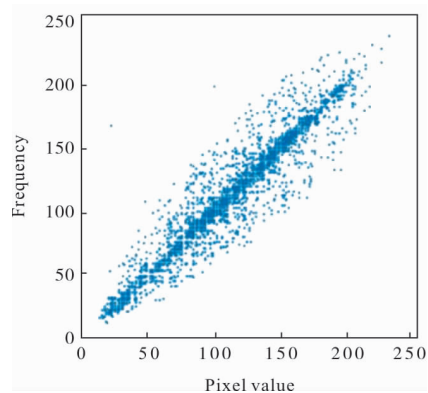
(a) 原始图像
(a) Original image



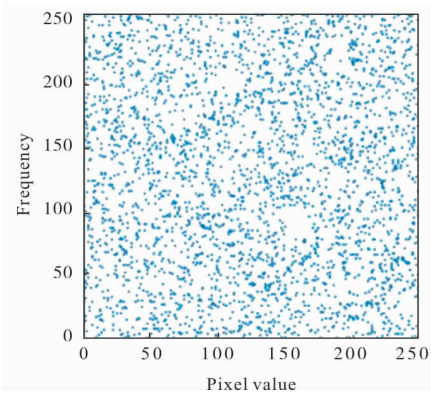
(b) 加密图像
(b) Encrypted image

图 12 垂直邻近像素灰度相关性

Fig.12 Gray correlation of vertically adjacent pixels



(a) 原始图像
(a) Original image



(b) 加密图像

(b) Encrypted image

图 13 对角邻近像素灰度相关性

Fig.13 Gray correlation of diagonal adjacent pixels

(4) 明文敏感性分析

采用了像素变化率(NPCR)和统一平均改变强度(UACI)两个指标进行分析,目的是为了说明加密后系统具有非常好的抵抗攻击的能力。

$$NPCR = \frac{\sum_{i=0}^{P-1} \sum_{j=0}^{Q-1} D_{i,j}}{P \times Q} \times 100\% \quad (28)$$

$$UACI = \frac{\left(\sum_{i=0}^{P-1} \sum_{j=0}^{Q-1} \left(\frac{c_1(i, j) - c_2(i, j)}{255} \right) \right)}{P \times Q} \times 100\% \quad (29)$$

式中: P 为图像的高度; Q 为图像的宽度; $c_1(i, j)$ 为加密后的图像信息在某一位置 (i, j) 上对应的像素值; $c_2(i, j)$ 为原始明文图像中某一点像素值发生变化以后再次加密得到的密文图像在 (i, j) 上呈现的像素值;如果 $c_1(i, j) = c_2(i, j)$,那么此时 $D(i, j) = 0$,如果不相等, $D(i, j) = 1$ 。

$$NPCR_{(E)} = (1 - 2^{-m}) \times 100\% \quad (30)$$

$$UACI_{(E)} = \frac{1}{2^m} - \frac{\sum_{i=0}^{2^m-2} i(i+1)}{2^m - 1} \times 100\% \quad (31)$$

式中: m 表示图像颜色位深,这里采用8位的灰度图像。经过计算可以得到 $UACI_{(E)} = 99.609\ 4\%$, $NPCR_{(E)} = 33.463\ 5\%$ 。这就意味着如果随机选取原始图像中的某个像素点,改变其像素值,那么这个像素灰度值的变化就会影响到经过加密后的图像中所有像素的灰度值,也就意味着这个算法有非常好的抵抗差分攻

击的性能。

从表2可以清楚地看到,使用空间激光混沌混沌键控保密通信系统对图片进行加密,若原始图像的一个像素值发生变化,则几乎导致了密文的完全变化。说明系统具有很好地抵抗明文攻击的能力。

表 2 明文图像微小变化的 NPCR 和 UACI 测试结果
Tab.2 NPCR and UACI test results of small changes in plain text images

| Plain text change | NPCR | UACI |
|---------------------------|-----------|-----------|
| T(95,66) from 90 to 91 | 99.721 3% | 33.564 7% |
| T(115,87) from 211 to 222 | 99.717 4% | 33.421 2% |
| T(125,43) from 35 to 36 | 99.685 2% | 33.471 1% |
| T(90,121) from 122 to 123 | 99.674 4% | 33.482 6% |
| T(230,1010) from 79 to 80 | 99.767 5% | 33.647 4% |

4 结 论

文中详细介绍了空间激光差分混沌移位键控保密通信系统,对 DCSK 系统的原理和传输系性能进行了分析,建立了 Gamma-Gamma 分布系统模型,推导出系统的平均误码率计算公式;对 DCSK-FSO 系统进行了详细分析,通过仿真得出,随着湍流变强,系统链路长度增加,都会导致系统性能恶化,在波长为 1 550 nm 时可以得到最好的通信效果;最后从安全性角度进行了仿真分析,仿真结果表明,系统可以很好地抵抗选择明文攻击,具有非常好的安全性能。

参考文献:

[1] Wang Hongpei, Wang Guanglong, Qiu Peng, et al. Single photon detection technology based on quantum-dot resonant tunneling diodes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2659-2663. (in Chinese)
王红培, 王广龙, 邱鹏, 等. QDRTD 单光子探测技术[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2659-2663.

[2] Ke Xizheng, Wang Wanting. Expansion and angular spread of partially coherent beam propagating in atmospheric turbulence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2726-2733. (in Chinese)
柯熙政, 王婉婷. 部分相干光在大气湍流中的光束扩展及

- 角扩展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2726–2733.
- [3] Guo Ruiqiang, Song Lu. Optical chaotic secure algorithm based on space laser communication [J]. *Discrete & Continuous Dynamical Systems–S*, 2019, 12 (4&5): 1355–1369.
- [4] Wu Junpeng, Liu Quan, Yu Lintao. Performance analysis of partially coherent optical communication system in Gamma–Gamma atmospheric turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0322004. (in Chinese)
吴君鹏, 刘泉, 于林韬. Gamma–Gamma 大气湍流中部分相干光通信系统性能研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 0322004.
- [5] Guo Ruiqiang, Song Lu. Space laser chaotic security system [C]//2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC 2017). IEEE, 2017: 1558–1561.
- [6] Wang Shilian, Hu Dengpeng, Zhang Zhili, et al. Multi-carrier chaotic shift keying chaotic communications under MIMO multipath fading channels [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, 37 (2): 52–57. (in Chinese)
王世练, 胡登鹏, 张智力, 等. MIMO 多径衰落信道下的多载波混沌键控混沌通信 [J]. 国防科技大学学报, 2015, 37 (2): 52–57.
- [7] Guo Yuan, Xu Xin, Jing Shiwei, et al. Virtual optical image encryption method based on hybrid chaotic system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48 (7): 0710002. (in Chinese)
郭媛, 许鑫, 敬世伟, 等. 基于矢量分解和相位剪切的非对称光学图像加密 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 0710002.
- [8] He Fengtao, Zhang Min, Bai Ke, et al. Image encryption method based on laser speckle and Henon mapping [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0428003. (in Chinese)
贺锋涛, 张敏, 白可, 等. 基于激光散斑和 Henon 映射的图像加密方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0428003.
- [9] Ding Xiangling, Cui Yongzhong. Analysis and improvement for asymmetric cryptosystem based on phase-truncated Fourier transforms [J]. *Laser Journal*, 2013, 34(2): 27–29. (in Chinese)
丁湘陵, 崔永忠. 基于相位截断的非对称加密系统安全性的分析与改进[J]. 激光杂志, 2013, 34(2): 27–29.
- [10] Chang Keming, Chen Ye, Wang Ying, et al. Single-channel color image encryption using cylindrical diffraction and color space converting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0603003. (in Chinese)
常柯明, 陈叶, 王莹, 等. 基于柱面衍射和彩色空间转换的单通道彩色图像加密 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(6): 0603003.