基于 QR 码的多图像关联成像算法光学加密机理研究

张雷洪，占文杰，曾茜，康祎，樊丽萍，曾黎旺
（上海理工大学，上海 200093）

摘要：目的 研究解决多图像的关联成像加密问题。**方法** 采用双重 QR 编码处理，将多图像的关联成像加密问题转变为单个 QR 码图像的关联成像问题。**结果** QR 码作为关联成像的成像物体，能在远低于传统关联成像采样率的条件下重构出清晰的图像，实现信息的高质量恢复。**结论** 在保证图像质量的情况下，该算法的安全性较高，能有效抵抗一定的噪声攻击和统计分析攻击，并极大地减少了加密系统对多图像的加密成本。

关键词： 关联成像；QR 码；信息熵
中图分类号： TP751 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2018)17-0228-08
DOI： 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.038

Optical Encryption Mechanism of Multi-image Correlated Imaging Algorithm Based on QR Code

ZHANG Lei-hong, *ZHAN Wen-jie*, *ZENG Xi*, *KANG Yi*, *FAN Li-ping*, *ZENG Li-wang*
(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to study and solve the problem of multi-image correlated imaging encryption. Double-QR coding was used to transform the multi-image correlated imaging encryption problem into the problem of a single QR code correlated imaging encryption. As imaging objects of correlated imaging, QR code could reconstruct clear images under the condition of being far lower than the sampling rate of traditional correlated imaging, and achieve the high quality information recovery. Under the condition of ensuring the image quality, the algorithm has higher security, can effectively resist the attacks of certain noise and statistical analysis, and greatly reduces the encryption cost of the encryption system for multiple images.

KEY WORDS: correlated imaging; QR code; information entropy

随着计算机技术的飞速发展，信息安全也逐渐受到人们的重视。它不仅关乎于个人和企业的信息财产安全，更关乎于国家的安全和社会的稳定。光学加密作为一种新的加密手段，近年来得到快速发展。其中关联成像又称鬼成像[1—6]，它可以在没有放置物体的参考光路中进行符合测量重构出放置在信号光路中物体的空间信息分布。2010 年，Clemente 等[7]提出了基于计算鬼成像的光学加密方案，将关联成像技术应用于光学加密。关联成像应用于光学加密，既具有成像的非定域性，又有着很好的安全性。2015 年，赵生妹等[8]提出了基于 CGI 的使用 QR 编码和压缩感知技术的高性能光学加密方案。2016 年，杨照华等[9]提出了基于阈值分割的并行压缩差分鬼成像算法，通过并行分块来减少计算机处理的复杂度，降低了成像对硬件系统的要求。由于关联成像自身的成像特性，重构图像需要一定的采样次数，这就大大降低了成像效率。梁文强等[10]提出了基于 QR 编码鬼成像的光学加密方案，大大降低了重构所需数据量，减少成像时间，节省传输带宽，并且在重构图像质量上也有很大提高，但并未对其信息量及安全性进行详细分析，仅仅增强了单幅图像的传输加密性能，并不适用于多图像的加密，因此，文中提出一种基于 QR 码的多图像

收稿日期： 2017-12-21
作者简介： 张雷洪（1981—），男，上海理工大学副教授，主要研究方向为基于压缩感知的关联成像算法和多光谱重建算法的光谱反射率重建。

关联成像光学加密技术。

1　理论介绍

1.1　压缩感知关联成像

关联成像也称鬼成像，是一种新兴的成像方法。传统的光学成像是直接探测光场的一阶信息分布并获取图像信息，关联成像不同于传统的光学成像，是利用光场的二阶及其以上的关联来获取图像信息。它可以在没有放置物体的参考光路中进行符合测量重构出放置在信号光路中物体的空间信息分布，因此鬼成像能实现传统光学成像所不能的非局域成像。

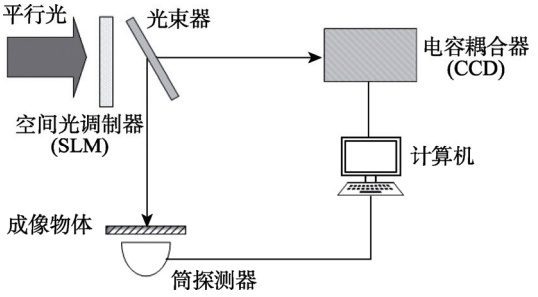

图 1　关联成像原理

Fig.1 Principle of correlated imaging

如图 1 所示，在计算鬼成像中，将一束平行光照射到空间光调制器（SLM）上，会生成一系列嵌入到空间光调制器中的随机相位图，用 $\varphi_i(x,y)$表示，其中每个像素点的取值范围是[0 ~ 2π]。电荷耦合器（CCD）到分束器的距离记为 z_1，因此在自由空间传播 $z_1=d$ 后的光强分布为：

$$E_i(x,y)=\exp\left[\left(j\phi_i(x,y)\right)\right]*h(x,y,d) \tag{1}$$

式中：(x,y)为 CCD 平面的坐标；j 的值为 $\sqrt{-1}$；*为卷积运算；$h(x,y,d)$为传播距离为 d 的菲涅尔衍射函数（系统的单位脉冲响应），因此被 CCD 探测的到达物平面散斑的光场强度为：

$$I_i(x,y)=\left|E_i(x,y)\right|^2 \tag{2}$$

在信号光路上，经空间光调制器调制后的光经过自由衍射传播到达物平面，经过物体后衍射的光波进入筒状探测器，由该筒状探测器探测到第 i 次的光强分布$\{D_i\}$的计算公式为：

$$D_i=\int T(x,y)I_i(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{3}$$

式中：$T(x,y)$为物体的透射函数；D_i 为衍射后的光波进入筒探测器探测第 i 次的值。

由于关联成像需要大量的关联计算，因此需要耗费大量的时间和内存空间。近些年研究发现，压缩感知可以通过开发信号的稀疏特性，在远小于奈奎斯特定理采样率的条件下，用随机采样获取信号的离散样本，然后通过非线性重建算法完美的重建信号。关联成像与压缩感知理论的结合很大程度上节约了采样时间，减少了传输成本。

下面运用压缩感知算法来重构出原始图像。假设激光照射到 SLM 上产生的散斑大小和物体大小相同，二维物体 $T(x,y)$的像素大小是 $N\times N$，将其拉伸为一个列向量（$T_{11}\ldots T_{1N}\ldots T_{NN}$）$^{\mathrm{T}}$。经过 M 次采样，式（3）的矩阵形式为：

$$\boldsymbol{D}=\begin{pmatrix}D_1\\D_2\\\vdots\\D_M\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}I_{11}^1&\cdots&I_{1N}^1&\cdots&I_{NN}^1\\I_{11}^2&\cdots&I_{1N}^2&\cdots&I_{NN}^2\\\vdots&\cdots&\vdots&\cdots&\vdots\\I_{11}^M&\cdots&I_{1N}^M&\cdots&I_{NN}^M\end{pmatrix}\begin{pmatrix}T_{11}\\\vdots\\T_{1N}\\\vdots\\T_{NN}\end{pmatrix}=\boldsymbol{IT} \tag{4}$$

式中：D_k 为第 k 次的测量值；$I_{ij}^k(ij=1\ldots\mathrm{N},\ k=1\ldots M)$为第 k 次测量照射在物体上的各像素点光强。将式（4）中的 $\boldsymbol{D}$ 和 $\boldsymbol{I}$ 作为压缩感知算法中的测量向量和测量矩阵，可得重构式：

$$\begin{aligned}&T_{\mathrm{cs}}=T;\min\left\|T(x,y)\right\|_{L_1},\text{条件}\\&D_j=\int T(x,y)I_j(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\quad(j=1\ldots M)\end{aligned} \tag{5}$$

式中：$\left\|\cdot\right\|_{L1}$ 为 L1 范数；T_{cs} 为物体的图像函数；M 为测量次数，小于关联成像加密所需的关联计算次数，因此，将压缩感知理论引入鬼成像能极大地提高成像速度。

1.2　QR 码

QR 码[11—15]是快速识别矩阵码（Quick Response）的简称，属于矩阵式二维条形码，于 1994 年由日本 DENSO WAVE 公司发明。QR 二维码是一种正方形的阵列（见图 2），是由编码区域和包括寻像图形、分隔符、定位图形和校正图形在内的功能图形组成。其中，功能图形不能用于数据编码。符号的四周由空白区包围，空白区域无实际编码和功能作用。与普通条码相比，QR 码特点如下所述。

1）数据存储量高。QR 码具有很高的信息容量和密度，可以放入 1817 个汉字、7089 个数字、4200 个字母。

2）容错能力强。即使 QR 码有局部破损或者污染，但利用其纠错算法，也能够进行一定程度的数据恢复。QR 码包含 L, M, Q, H4 个纠错等级，其中 L 纠错等级中 7%的字码可被修正；M 纠错等级中，15%的字码可被修正；Q 纠错等级中 25%的字码可被修正；H 纠错等级中 30%的字码可被修正。

3）多角度高速识别。QR 码具有全方位识别能力。在 QR 码的其中 3 个角上，分别有一个唯一的位置探测图形，可帮助确定 QR 码的位置、尺寸和方向，使 QR 码具有 360°全方位快速识读的特点。

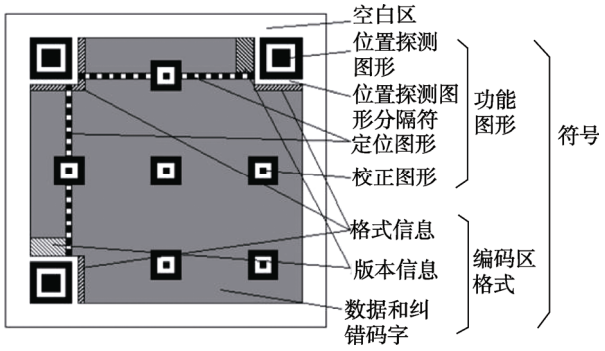

图 2　QR 码结构
Fig.2 QR code structure

2　多图像的 QR 码关联成像技术

关联成像重构图像需要大量的采样和关联计算，因此多幅图像的传输加密极大地增加了加密传输的成本。文中提出一种基于多图像的 QR 码关联成像加密技术，运用二次 QR 编码将单幅图像的关联成像拓展到多图像的关联成像加密，同时在一定程度下减少成像的采样率并能恢复出与原图相同的解密图像。加密系统见图 3。

加密过程见图 3a。

1）第 1 次 QR 编码。运用 QR 编码将 n 张灰度图像转变为 n 个 QR 码。

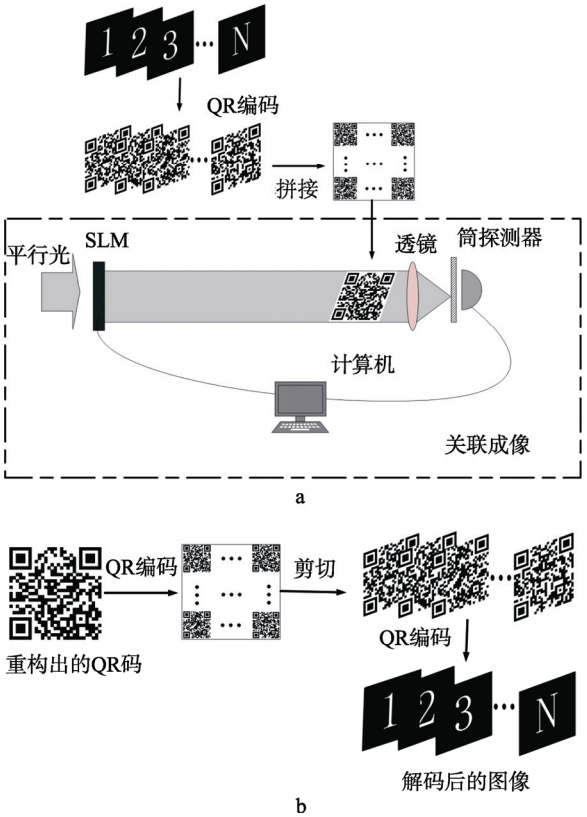

图 3　加密系统
Fig.3 Encryption system

2）拼接。将 n 个 QR 码拼接合并成一个图像。

3）第 2 次 QR 编码。对拼接后的图像再次应用 QR 编码技术，生成一个新的 QR 码。

4）压缩感知关联成像加密。以随机调制信号作为密钥，第 2 次 QR 编码后的 QR 码为关联成像的成像物体，进行关联成像光学加密，实现加密传输，其中筒探测器的值$\{D_i\}$为加密系统的密文。

解密过程见图 3b。

1）压缩感知关联成像解密。通过式（6），运用压缩感知技术重构出 QR 码图像。

2）第 1 次 QR 解码。对重构的 QR 码图像进行解码，可以还原出加密步骤 2）中拼接后的图像。

3）裁切。将步骤 2）中所得的图像裁切为 n 个 QR 码。

4）第 2 次 QR 解码。依次解码出 n 个 QR 码，得到 n 张原图像。

3　仿真与分析

为了测试该算法的性能，运用 Matlab 仿真平台进行仿真实验，对 4 张像素大小为 256×56 的灰度图像进行加密传输。其中图 4a—d 是原图像，随机调制信号作为密钥，关联成像的成像物体为图 4j，关联成像的采样次数是 1500。实验的仿真结果见图 6，其中图 6a—d 为原图像；图 6e—h 为经 QR 编码器生成的 QR 码；图 6i 为拼接后的图像；图 6j 为图 6i 经 QR 编码器所生成的 QR 码；图 6k 是经过压缩感知关联成像重构后的图像。图 6l 为图 6k 的解码图，图 6m—p 为最终解密的图像。

从图 4 可以看出，该算法借助于 2 次 QR 编码，将多个待加密的原图像转变为一个新的 QR 码图 4j，这一处理将多图像的加密传输变为单个 QR 码图像的加密传输，大大提高了成像效率、节省了关联成像的采样率和关联计算。同时，最终解码后的图 4m, n, o, p 能完全地还原出图像的信息。

3.1　可行性分析

一般的压缩感知关联成像加密方法是将原图像作为待加密的明文，运用压缩感知理论结合密钥重构出原图像解密出图像的信息。由于关联成像自身的成像特性，对于尺寸较大的灰度图像的成像需要多次采样和关联运算，因此成像的效果差且运行速率慢。文中则是对图像进行 2 次 QR 编码，将所得的 QR 码替代原图像放置在关联成像实验装置的物体所在位置，将多图像信息的加密转变为一个 QR 码图像的加密。由于在像素较大的图像下关联成像的成像速率慢，为方便比较采用 4 张 64×64 像像素的原图像，在采样次数为 1500 的情况下压缩感知关联成像加密算法与文中算法的解密效果对比见图 5。图 5a—d 为文中算法

图 4　加密效果

Fig.4 Encryption effect

图 5　2 种算法的效果

Fig.5 Effects of two algorithms

解密效果，图 5e—h 为压缩感知关联成像加密算法解密效果。

由图 5 所示，采用文中算法解密的图像，清晰度较高，几近原图。压缩感知关联成像加密算法解密的图像模糊不清。

为了描述该加密算法的重构图像精确程度，这里引入图像信息处理中的峰值信噪比（PSNR）来衡量图像的解密效果。针对像素大小为 $M\times N$ 的图像，PSNR 定义为：

$$\mathrm{MSE}=\frac{1}{MN}\sum_{\mathrm{i}=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left(X_{i,j}-X'_{i,j}\right)^2 \tag{6}$$

$$\mathrm{PSNR}=10\lg\frac{X_{\max}^2}{\mathrm{MSE}} \tag{7}$$

式中：$X_{i,j}$ 和 $X'_{i,j}$ 分别为原始图像与解密后图像相应像素点值的大小；$X_{\max}$ 为图像中最大的像素点值。一般来说，PSNR 越高，代表原始图像和解密后图像的相似程度越高，即图像的重构质量越高。

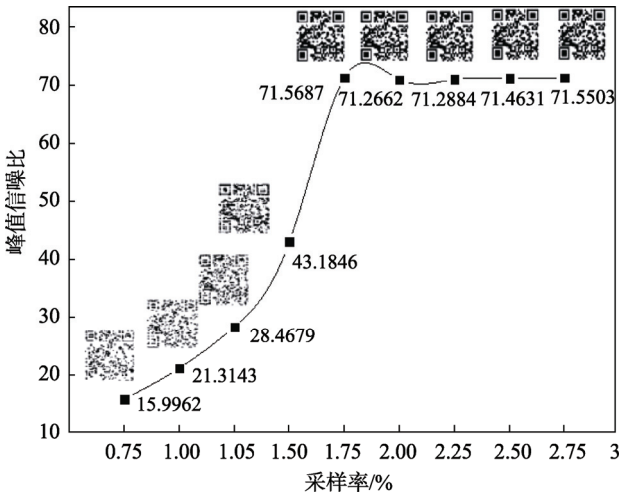

图 6 不同采样率下关联成像重构 QR 码的峰值信噪比

Fig.6 PSNR of QR code reconstructed by correlated imaging at different sampling rates

采样率分别为 0.73%, 0.98%, 1.22%, 1.47%, 1.71%, 1.95%, 2.20%, 2.44%, 2.69%时，关联成像重构图像的 PSNR 值。从图 6 可得，随着采样率的增大，重构图像越清晰，其对应的 PSNR 值也越大，重构图像的清晰度与采样率成正比；在采样率达到 1.71%时，重构出的 QR 码 PSNR 达到 71.5932，这时重构的 QR 码图像清晰度很高，能成功解码；采样率达到 1.71%后，再增加其采样率，重构的 QR 码图像 PSNR 值变化不明显，重构质量基本相同，采样率增加到 1.71%时达到饱和。这说明运用 QR 码作为关联成像的成像物体能以极低的采样率重构出较为清晰的 QR 码图像，再经过 QR 解码操作，可以很好地还原出原图像的信息。同时由于在 QR 码重构过程中采样率存在一个阈值，因此可以在保证重构图像质量的前提下进一步将采样率降低至该阈值。

3.2 信息量

熵指的是体系的混乱程度，熵由鲁道夫·克劳修斯提出，并应用在热力学中。对信息进行定量描述是由香农（Shannon）首先提出的。应用信息熵理论可以实现对数字图像信息量的衡量。数字图像可以分割成 N 个像素点，其中每个像素点有 M 个灰度级，可以把这 M 个灰度级看作 M 个不同的符号，由图像的信息源发出。一般来说单色灰度图像的每个像素存放在一个 byte 空间，有 2^8=256 个灰度级，单色的二值图像只有一个通道，RGB 图像则有 3 个通道。对于一个 256 灰度级的灰度图像，选择其邻域灰度均值作为灰度分布的空间特征量，与图像的像素灰度组成特征二元组，记为（i, j），其中 i 为像素的灰度值($0\leqslant i\leqslant 255$)，$j$ 为邻域灰度（$0\leqslant j\leqslant 255$），其中，$p_{ij}$ 为图像中特征二元组为（i,j）的像素所占的比例，则其表达式为：

$$p_{ij}=f\left(i,j\right)/N^2 \tag{8}$$

式中：$f(x,y)$ 为特征二元组（i,j）出现的频数；N 为图像的尺度。图像信息熵的定义式为：

$$H=\sum_{i=0}^{255}p_{ij}\log p_{ij} \tag{9}$$

式中：H 为信息熵的大小（bit）。

由表 1 可知，4 幅灰度图像作为原图像信息熵较高，进行第 1 次 QR 编码后图像信息隐藏 QR 码中，降低了信息熵。4 个 QR 码拼接成一个的图像能在不破坏信息的情况下将多幅图像的信息合并在一个图像中。相比于单个 QR 码携带的信息量，拼接后的图像信息熵要高，但低于原灰度图像信息量。第 2 次 QR 编码后能将多个 QR 码信息再次编码为单个 QR 码，并将信息熵降低至 5 bit 左右。

由于 QR 码是一种特定的黑白二维条形码，原始图像的信息可以通过特定的 QR 编码转变为一个信息熵约为 5 bit 左右的 QR 码图像，以达到降低信息量的效果，因此双重 QR 编码能将信息熵较高的多个图像压缩为单一的 QR 码图像，并将多个原始图像的信息熵固定在 5 bit 左右。这一算法能将多图像的关联成像加密转变为单个 QR 码的加密传输，减少加密传输的信息量，提高成像效率。

3.3 安全性

3.3.1 抗噪能力

图像在加密传输过程中很容易遭受噪声的攻击，由于预先对原图像先进行 QR 编码处理，所以在此加密传输中 QR 码作为成像物体最易受到噪声的攻击。文中选取图像传输过程中最常见的椒盐噪声和高斯噪声对一个 QR 码进行噪声攻击，以此测试算法的

表 1　图像信息熵

Tab.1 Image information entropy

原图	信息熵	第 1 次 QR 编码图像	信息熵	拼接后图像	信息熵	第 2 次 QR 编码图像	信息熵
	7.5934		5.1414				
	7.0724		5.1813		6.7465		5.078
	7.0206		5.0566				
	7.545		5.1091				

抗噪性能。噪声的强弱程度由噪声密度表示，噪声密度是包括噪声值的图像区域的百分比。

在不同椒盐噪声密度条件下对 QR 码加噪效果图、关联成像重构图及其解码效果图见表 2。从表 2 中可以看出，仅利用关联成像并不能很好的消除图像中的噪声点。在噪声密度≤噪声密度时，经过 QR 解码后可以直接得出无任何噪声干扰的解密图。噪声密度≥0.10 时，因重构出的 QR 码超出其容错能力，故无法重构出图像。

在不同高斯噪声密度条件下对 QR 码加噪的效果图、关联成像重构图及其解码效果图见表 3。从表 3 中可以看出，在噪声密度≤0.7 时，经过 QR 解码后可以直接得出无任何噪声干扰的解密图。对于高斯噪声来说，QR 码有着很好的抗噪能力。噪声密度≥0.8 时，因重构出的 QR 码超出其容错能力，故无法重构出图像。相比于椒盐噪声，QR 编码抵抗高斯噪声的能力更强。

引入 2 次 QR 编码既能实现信息量较大的多图像的关联成像加密传输，也能利用 QR 码的强干扰作用来克服关联成像中的噪声干扰，得到无噪声干扰的解码图。在图像信息传输过程中，当攻击者试图对图像进行加噪攻击时，利用 QR 码较强的容错能力，可抵御一定强度的噪声攻击，因此该算法具有较好的抗噪能力。

3.3.2　抗统计分析攻击

灰度直方图是灰度级的函数[16—17]，它表示图像中具有每种灰度级的像素点的个数，反映图像中每种灰度出现的频率。它的横坐标是灰度级，纵坐标是该灰度级出现的频率，直方图可以反映出图像像素的分布信息，不同的图像对应着不同的直方图。图 7a、图 7c 分别是不同原始图像的直方图，图 7b、图 7d 是图 7a、图 7c 所对应密文的直方图。

由图 7 可以看出，密文的直方图与明文的直方图差别很大，说明运用该算法加密后的图像加密效果显著，因而不能从密文的直方图中直接得到明文的图像信息。对于不同的明文其直方图是不同的，但运用该算法得到的密文的直方图大体一致，说明该算法能够很好地隐藏明文的统计特性，可以抵挡一定程度的统计分析攻击。

对于不同的明文图像，运用该算法可得到图像像素信息大体相同的密文图像。攻击者无法通过分析不同密文的统计分布来得到相应的明文信息，甚至破译该算法，因此该算法具有很好的安全性。

表 2　不同椒盐噪声密度下的加噪图像及其关联成像重构图

Tab.2 Noise image and its reconstructed image of correlated imaging in different salt and pepper noise density

噪声密度	加噪图像	关联成像重构图	QR 解码图
0.06			
0.07			
0.08			
0.09			
0.1			
0.11			

表 3　不同高斯噪声密度下的加噪图像及其关联成像重构图

Tab.3 Noise image and its reconstructed image of correlated imaging in different Gaussian noise density

噪声密度	加噪图像	关联成像重构图	QR 解码图
0.3			
0.4			
0.5			
0.6			
0.7			
0.8			

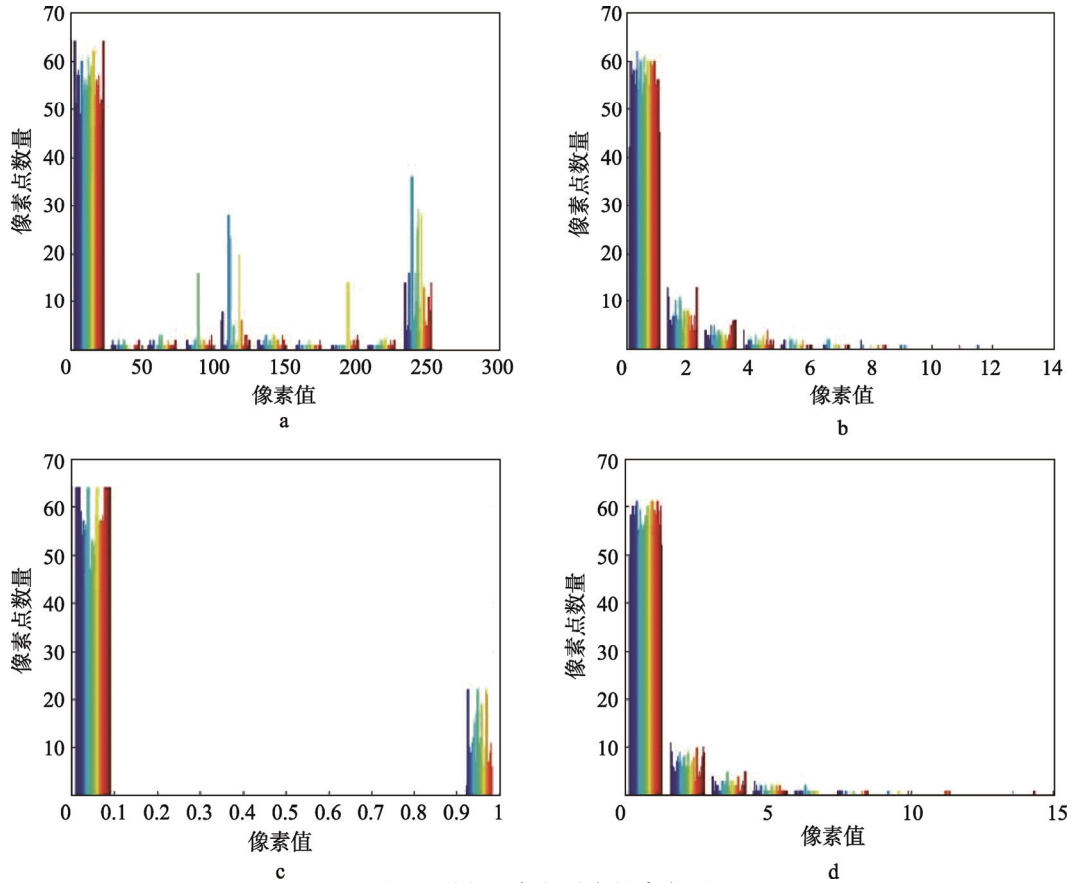

图 7　明文、密文对应的直方图

Fig.7 The histogram corresponding to plaintext and ciphertext

4　结语

主要针对多幅图像的关联成像加密问题，提出了一种基于 QR 码的多图像关联成像加密算法。相比于原始图像，QR 码作为成像物体能以极低的采样率重构成像物体，并能解码出原始图像信息。该算法是对多个原始图像进行一次 QR 编码后拼接成一个大图像，再进行第二次 QR 编码，生成一个 QR 码，将该 QR 码作为关联成像的成像物体，解密过程是对压缩感知重构后的图像进行 2 次 QR 解码，即可还原出多个原始图像。文中算法不同于现有的多图像关联成像加密算法，利用二次 QR 编码处理，将多幅图像的关联成像加密问题简化为单个图像的关联成像，并着重分析了二次 QR 编码对降低信息熵的作用，有效地减少了多图像加密传输的信息量，极大地减少了多图像加密传输的成本。同时，通过安全性分析，表明该加密算法具有很好的抗噪声攻击和抗统计分析的能力。

参考文献：

[1] KATZ O, BROMBERG Y, SILBERBERG Y. Ghost Imaging via Compressed Sensing[C]// Frontiers in Optics, Optical Society of America, 2009.

[2] WU J, XIE Z, LIU Z. Multiple-image Encryption Based on Computational Ghost Imaging[J]. Optics Communications, 2016, 359: 38—43.

[3] ZAFARI M, AHMADI-KANDJANI S, KHERADMAND R. Noise Reduction in Selective Computational Ghost Imaging Using Genetic Algorithm[J]. Optics Communications, 2017, 387: 182—187.

[4] LI X, MENG X, YANG X, et al. Multiple-image Encryption Based on Compressive Ghost Imaging and Coordinate Sampling[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(4): 1—11.

[5] LI X, MENG X, WANG Y, et al. Secret Shared Multiple-image Encryption Based on Row Scanning Compressive Ghost Imaging and Phase Retrieval in the Fresnel Domain[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2017, 96: 7—16.

[6] GUIDO D R, U'REN A B. Study of the Effect of Pump Focusing on the Performance of Ghost Imaging and Ghost Diffraction Based on Spontaneous Parametric Down Conversion[J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 1269—1274.

[7] ClEMENTE P, DURAN V, TAJAHUERCE E, et al. Optical Encryption Based on Computational Ghost Imaging[J]. Optics Letters, 2010, 35(14): 2391—2393.

[8] ZHAO S M, WANG L, LIANG W, et al. High Performance Optical Encryption Based on Computational Ghost Imaging with QR Code and Compressive Sensing Technique[J]. Optics Communications, 2015, 353: 90—95.

[9] YANG Z, DAPENG L I, PENG H, et al. Parallel Compressive Ghost Imaging Based on Threshold Segmentation[J]. Optical Technique, 2016, 42(4): 289—293.

[10] 梁文强. 基于计算鬼成像的光学加密和数字水印方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
LIANG Wen-qiang. Research on Optical Encryption and Digital Watermarking Methods Based on Ghost Imaging[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.

[11] ZHAO S, WANG L, LIANG W, et al. High Performance Optical Encryption Based on Computational Ghost Imaging with QR Code and Compressive Sensing Technique[J]. Optics Communications, 2015, 353: 90—95.

[12] BELUSSI L, HIRATA N. Fast QR Code Detection in Arbitrarily Acquired Images[J]. Graphics, Patterns & Images, 2011: 45(3): 281—288.

[13] 龚冬梅, 顾济华, 陈大庆, 等. 基于 QR 码的抗几何攻击数字全息水印[J]. 包装工程, 2015, 36(9): 124—128.
GONG Dong-mei, GU Ji-hua, CHEN Da-qing, et al. The Anti-geometric Attack Digital Holographic Watermark Based on QR Code[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(9): 124—128.

[14] MUNOZ-MEJIAS D, GONZALEZ-DIAZ I, DIZA-DE-MARIA F. A Low-complexity Pre-processing System for Restoring Low-quality QR Code Images[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2011, 57(3): 1320—1328.

[15] TARJAN L, TEGELTIJA S, STANKOVSKI S,et al. A Readability Analysis for QR Code Application in a Traceability System[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2014, 109(C): 1—11.

[16] 张翌维, 王育民, 沈绪榜. 基于混沌映射的一种交替结构图像加密算法[J]. 中国科学: 技术科学, 2007, 37(2): 183—190.
ZHANG Yi-wei, WANG Yu-min, SHEN Xu-bang, et al. An Alternate Structure Image Encryption Algorithm Based on Chaotic Mapping[J]. China Science: Technology Science, 2007, 37(1): 183—190.

[17] 邓晓衡, 廖春龙, 朱从旭, 等. 像素位置与比特双重置乱的图像混沌加密算法[J]. 通信学报, 2014(3): 216—223.
DENG Xiao-heng, LIAO Chun-long, ZHU Cong-xu, et al. Image Chaos Encryption Algorithm of Pixel Location and Bit-binary Chaos[J]. Journal of Communication, 2014(3): 216—223.