

文章编号 1004-924X(2014)09-2528-08

采用超混沌系统的图像压缩加密联合算法

王 娣, 邓家先*, 邓小梅, 邓海涛

(海南大学 信息科学技术学院, 海南海口 570228)

摘要: 为了同步实现图像压缩和加密, 提出了一种采用超混沌 Chen 系统和改进零树编码相结合的图像压缩加密算法。该算法在改进零树编码基础上, 先利用超混沌 Chen 系统产生的密钥流修正位平面编码过程中形成的上下文和判决, 然后送入 MQ 算术编码器中进行熵编码生成相应的压缩码流, 最后将压缩后码流反馈到超混沌 Chen 系统的输入端, 产生新的密钥, 使密钥流和明文相关, 实现图像的联合压缩加密。实验结果表明, 该算法的峰值信噪比 (PSNR) 至少提高了 1 dB, 密钥空间为 256 bit, 加密时间占总时间的百分比均小于 45%, 明文和密钥敏感性高。该算法实现了图像的联合压缩加密, 比原始嵌入式零树小波 (EZW) 算法的图像重建质量高, 具有高抗线性攻击和差分攻击能力, 密钥空间大, 安全性好。

关键词: 压缩加密算法; 超混沌 Chen 系统; MQ 算术编码; 位平面编码

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2528

Joint image compression and encryption algorithm using hyper-chaotic system

WANG Di, DENG Jia-xian*, DENG Xiao-mei, DENG Hai-tao

(College of Information Science and Technology, Hainan University, Haikou 570228, China)

* Corresponding author, E-mail: jxiandeng@126.com

Abstract: To compress and encrypt images synchronously, a joint compression-encryption algorithm by using a hyper-chaos Chen system and a improved zero tree coding was proposed. Based on the improved zero-tree coding, a key stream produced by the hyper-chaotic Chen system was used to modify the context and the decision after bit-plane encoding, then they were fed into a MQ arithmetic coder to compress and produce the corresponding code streams. The code streams were feedbacked into the input end of hyper-chaos Chen system to produce a new secret key related to the plaintext and to realize the joint compression-encryption. Experimental results indicate that the Peak Signal to Noise (PSNR) of proposed algorithm is improved at least 1 dB, and the key space is 256 bit. The encryption time percentages of total time are all less than 45% and the plaintext and secret have higher sensitivity. The proposed algorithm realizes the synchronization of image compression and encryption, and the image reconstruction quality is higher than that of embedded zero wavelet. It is characterized by the high resistance for linear attack and differential attack, a large key space and better safety

收稿日期: 2014-01-07; 修订日期: 2014-03-04.

基金项目: 海南省自然科学基金资助项目 (No. 613155); 海南省普通高等学校研究生创新科研基金资助项目 (No. S201315)

performance.

Key words: compression-encryption algorithm; hyper-chaos Chen system; MQ arithmetic coding; bit-plane encoding

1 引言

数字图像信息量大,但传输带宽和存储空间有限,因此需尽可能对其进行压缩以减少存储空间;另外,为保护用户在使用数字图像时的隐私,还需对其进行加密以保证安全传递。传统算法的压缩和加密过程是分开进行的,故其实时性差、计算量大、灵活性低,因此同步实现压缩和加密非常重要。压缩的目的是降低图像的存储空间以实现快速有效的传输^[1-2],如 J. M. Shapiro 提出了内嵌零树小波编码(Embedded Zerotree Wavelet encoder, EZW)算法。该算法是利用各级子带间系数在方向和空间上的相似性以及小波多分辨率特性来获得高效渐进式传输的图像编码方法^[1]。对于图像加密算法的研究,混沌系统已被证实具有鲁棒性强、密钥空间大、易于实现等优点^[2-9]。近几年,国内外对图像压缩加密的研究越来越广泛,文献[10]根据明文符号出现的概率自适应创建查找表,采用放回抽样模型的方式更新查找表,根据混沌系统运行轨迹再查找表中搜索明文符号,并将迭代次数作为密文。该算法运行速度快,但压缩效率低,没有实现明文和密文相关,加密效果不佳。根据文献[10]创建的查找表,文献[11]采用不重复抽样模型的方式更新查找表,因此运行速度更快,压缩效率更高,但是没有实现明文和密钥相关,加密效果不佳,且该算法没有考虑明文图像像素点间的复杂相关性,不太适合于图像加密。文献[12]提出 SHA-1 算法和离散余弦变换(Discrete Wavelet Transform, DCT)实现联合压缩加密,将 DCT 变换系数分成低频系数和高频系数,并实现了相互加密,但 DCT 变换会产生方块效应。文献[13]利用混沌映射产生一个置换表和一个伪随机密钥流,分别用于混淆和扩散,但这种方法没有实现明文与密钥相关,故加密效果差且没有研究图像的压缩性能。文献[14]提出在 EZW 编码的基础上引入自适应算术编码来实现联合压缩加密,但是该算法使用固定密钥加密,周期短、密钥空间小、敏感性低,不能很好地抵抗攻

击。文献[15]提出基于 EZW 算法的图像压缩与加密联合算法,利用 Logistic 混沌映射加密,并实现密钥与明文相关,但 Logistic 映射是简单的一维混沌系统,其密钥空间小,容易受到分割攻击,混沌系统的随机性和保密性差。文献[16]提出先对小波系数使用标准映射和 Logistic 映射进行扩散和混淆来加密,再利用集合树分裂算法(Set Partitioning in Hierarchical Tree, SPIHT)算法进行压缩,但是加密改变了图像的能量分布和小波系数间的相关性,降低了图像的压缩效率。

简单的低维混沌系统仅有一个 Lyapunov 指数,在传输过程中很容易受到攻击,安全性差,不适合加密^[17-18]。超混沌 Chen 系统至少有两个正的 Lyapunov 指数,相轨可以在更多方向进行分离,结构和动态行为更复杂,具有密钥空间更大,伪随机性更好等优点,更适合图像加密。本文提出基于超混沌 Chen 系统的图像压缩加密联合算法,利用超混沌 Chen 系统生成密钥对位平面编码过程中产生的上下文和判决进行修正,送入 MQ 算术编码器进行熵编码,再将加密后的密文反馈到 Chen 系统的输入端,实现密钥流与明文的相关。该算法对每一级的每一个子带分别进行压缩和加密,以实现分辨率压缩加密。

2 超混沌 Chen 系统和改进零树编码述

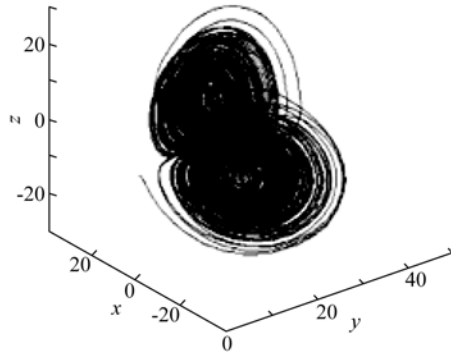
2.1 超混沌 Chen 系统及密钥序列的产生

超混沌系统是一种至少拥有 2 个正 Lyapunov 指数的混沌系统,与低维混沌系统相比,其相轨可以在更多方向上进行分离,其相空间和动态行为更加复杂,密钥空间更大,伪随机性更好,因此更适合加密。Li 在 2004 年从 Chen 系统中利用非线性状态反馈控制器得到超混沌 Chen 系统^[19],其系统动力学方程如下:

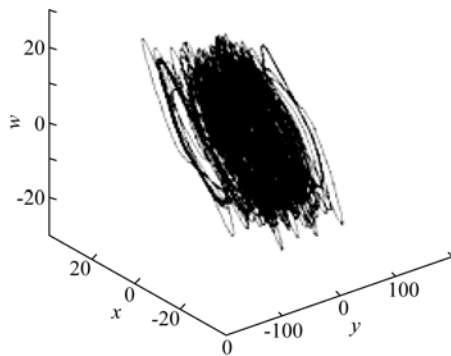
$$\begin{aligned}\dot{x} &= m(y-x) + w, \\ \dot{y} &= qx - xz + py, \\ \dot{z} &= xy - nz,\end{aligned}$$

$$\dot{w} = yz + tw, \quad (1)$$

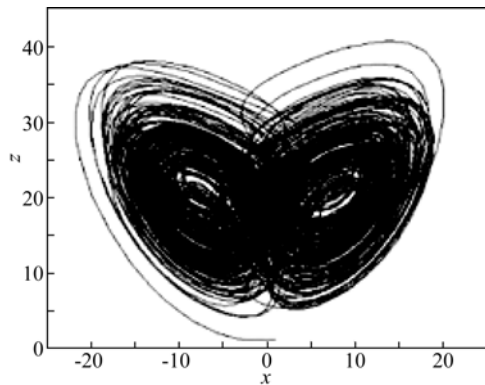
其中： m, n, p 和 t 是混沌系统的控制参数； x, y, z 和 w 是混沌系统的状态变量。当 $m=35, n=3, p=12, q=7$, 且 $t \in (0.085, 0.798]$ 时, 系统处于超混沌状态。本文取 $t=0.6$, 该系统有两个正 Lyapunov 指数, 分别为 0.9076 和 $0.0021^{[20]}$, 其吸引因子如图 1 所示。



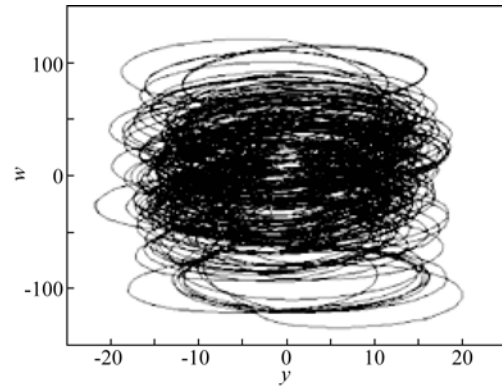
(a) 在 (x, y, z) 上的超混沌吸引因子
(a) Hyper-chaos attracted factors on (x, y, z)



(b) 在 (x, y, w) 上的超混沌吸引因子
(b) Hyper-chaos attracted factors on (x, y, w)



(c) 在 (x, z) 上的超混沌吸引因子
(c) Hyper-chaos attracted factors on (x, z)



(d) 在 (y, w) 上的超混沌吸引因子
(d) Hyper-chaos attracted factors on (y, w)

图 1 超混沌 Chen 系统的吸引因子

Fig. 1 Attracted factors of hyper-chaos Chen system

2.2 改进零树编码概述

为进一步提高编码的压缩性能, 参考 EBCOT 编码方法^[21-24], 引入 MQ 算术编码器对 EZW 编码进行了改进。首先, 对位平面编码产生的判决进行分类形成上下文, 即集合上下文和系数上下文, 其中系数上下文进一步细分为零编码上下文、幅值细化编码上下文、符号编码上下文; 其次, 改进零树编码按图 2 所示的子带顺序对每一级的每一个子带分别进行 MQ 算术编码输出压缩码流, 该算法可实现分辨率压缩, 具有很好的压缩性能。

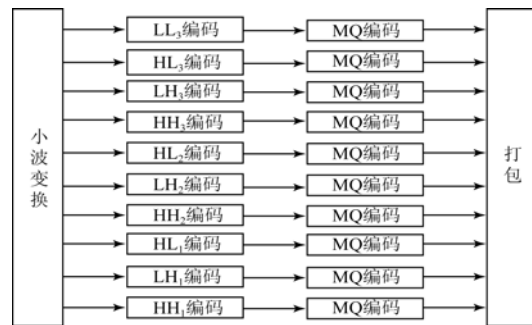


图 2 改进零树编码结构
Fig. 2 Improved zero-tree coding structure

3 压缩和加密联合算法的实现

本文提出的基于超混沌 Chen 系统的压缩加密联合算法, 即利用超混沌 Chen 系统产生的随机密钥修正位平面编码产生的上下文 (context, CX) 和判决 (decision, D), 改变 MQ 编码器中的条件概率和初始分布, 从而影响 MQ 编码器自适应条件概率分布模型, 达到加密与压缩同步的目的。

的。如图3所示,原始图像经过(9,7)浮点型小波变换后,对小波系数进行位平面编码,产生相应的CX和D,利用超混沌Chen系统产生的密钥序列Key对CX和D进行修正,再将修正后的CX'和D'送入MQ编码器进行算术编码,输出压缩码流,完成压缩加密。该算法对每一级的每一个子带分别进行压缩和加密。

设超混沌Chen系统的4个状态变量的初始值分别为 x_0, y_0, z_0 和 w_0 ,利用四阶Runge-Kutta算法将超混沌Chen系统进行迭代积分,系统每迭代一次都会生成一组随机实数状态值 (x_i, y_i, z_i, w_i) ($i=1, 2, 3, 4$),再将其修正到 $[0, 255]$ 取值范围内的8 bit 整数密钥 (x_i, y_i, z_i, w_i) ($i=1, 2, 3, 4$),修正公式如下:

$$x'_i = \text{mod}((x_i - \lfloor x_i \rfloor) \times 10^{14}, 256), \quad (2)$$

其中: x_i ($i=1, 2, 3, 4$)表示每迭代一次产生的4个混沌实数状态值; x'_i ($i=1, 2, 3, 4$)表示修正后的整数密钥; $\lfloor x_i \rfloor$ ($i=1, 2, 3, 4$)表示小于或等于

x'_i 的最大整数; $\text{mod}(x, y)$ 表示 x 除以 y 的余数。

对密钥 (x_i, y_i, z_i, w_i) ($i=1, 2, 3, 4$)分别循环移位,顺序取4 bit 二进制数据 s_0 对每一级小波子带的位平面编码产生的上下文CX进行修正,修正公式为:

$$CX' = \text{mod}((CX + s_0), L), \quad (3)$$

其中: CX' 为修正后上下文; $\text{mod}(x, y)$ 表示 x 除以 y 的余数; L 为改进零树编码4种编码方式中上下文的个数,即零编码 $L=9$,符号编码 $L=5$,幅值细化编码 $L=3$ 。同时,顺序取1 bit 二进制数据 s'_0 对判决D修正,修正公式为:

$$D' = D \oplus s'_0, \quad (4)$$

其中: D' 为修正后判决, \oplus 为异或运算。

密钥和明文相关可以使算法有效抵抗明文攻击,安全性更高。将修正后的 CX' 和 D' 送入MQ编码器进行编码,输出码流反馈到超混沌Chen系统的输入端,迭代产生下一次修正上下文和判决的随机密钥,实现密钥序列和明文的相关。

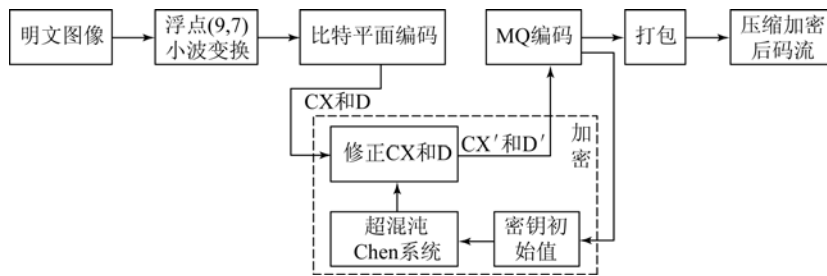


图3 采用超混沌系统压缩与加密联合算法原理框图

Fig. 3 Functional diagram of joint compression-encryption algorithm using hyper-chaos system

4 数据仿真结构及分析

本文采用(9,7)浮点型小波变换,分解级数为3,超混沌Chen系统的4个状态变量初始值分别为:

$$x_0 = 0.562548568541258,$$

$$y_0 = 0.125478965412592,$$

$$z_0 = 0.563584251478521,$$

$$w_0 = 0.365412874584269.$$

量化步长为0.05,对大小均为 512×512 、灰度级为256的图像进行测试。

4.1 图像重建质量分析

为测试本文算法与其他算法图像重建质量的差别,将本文算法与原始EZW算法、文献[15]的EZW+Logistic联合压缩加密算法和文献[16]的

SPIHT+SHA-1($\delta=1$)的联合压缩加密算法进行比较。通过改变输出码率大小,测量峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR),当输出码率分别为0.25,0.5,0.75,1.0时,PSNR如表1所示。在码率相同的条件下,本文算法的图像重建质量比原始EZW算法的图像重建质量高,PSNR至少高1 dB,同时,本文算法的图像重建质量比EZW+Logistic和SPIHT+SHA-1($\delta=1$)均高。这主要是由于EZW+Logistic算法是使用一维Logistic混沌映射产生密钥,其密钥伪随机性差,而SPIHT+SHA-1($\delta=1$)算法对小波系数进行扩散和混淆,破坏了小波系数间的相关性。结果表明,引入算术编码对原始EZW压缩算法改进后实现了二次压缩,算法压缩效果更好。基于改进零树编码,使用超混沌Chen系统进行加密时,也实现了图像加密。

表 1 几种算法图像重建质量对比

Tab. 1 Comparison of image reconstruction quality of some algorithms

(dB)

图像	码率/bpp	本文算法	原始 EZW 算法	EZW+Logistic	SPIHT+SHA-1($\delta=1$)
Lena. raw	0.25	32.83	25.19	32.94	29.55
	0.50	36.01	31.93	35.96	31.13
	0.75	37.85	35.51	37.72	31.73
	1.00	39.17	37.10	39.22	32.02
Boat. raw	0.25	31.51	18.09	28.64	27.37
	0.50	31.54	28.01	31.42	29.14
	0.75	33.93	31.02	33.86	29.96
	1.00	35.04	33.67	34.92	30.97
Baboon. raw	0.25	22.40	20.01	22.54	21.60
	0.50	24.14	22.72	24.05	23.39
	0.75	26.28	24.21	26.10	24.50
	1.00	27.53	26.18	27.42	26.26

4.2 密钥空间

一个安全的加密算法应该具有足够大的密钥空间来抵抗穷举攻击,本文算法采用 IEEE 754 浮点数标准,利用超混沌 Chen 系统产生 4 个 64 bit 的随机数作为密钥初始值,因此,初始值所组成的密钥空间大小为 $64 \times 4 = 256$ bit,这表明该算法具有足够大的密钥空间,以抵抗穷举攻击。

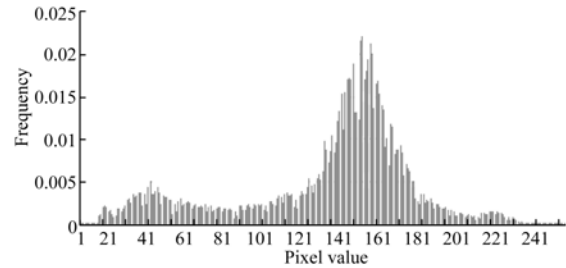
4.3 直方图及密钥敏感性分析

直方图反映一幅图像的灰度级内容,可以用来描述该灰度级像素出现的频率。选取 Boat 图像进行实验测试,结果如图 4 所示。从图 4(c)和图 4(d)可以看出,解密正确时,重建图像与原始图像的直方图基本相同;图 4(e)和图 4(f)为状态变量初始值 x_0 发生微小变化时的重建图像,即当 $x_0 = 0.562548568541259$ 时,重建图像的直方图发生显著变化,重建图像的像素频率均匀分布在 $[0, 0.004]$ 内,重建图像中完全反映不出明文图像的有关信息,这表明本文算法的密钥敏感性高,安全性好。



(a) 原始图像

(a) Original image



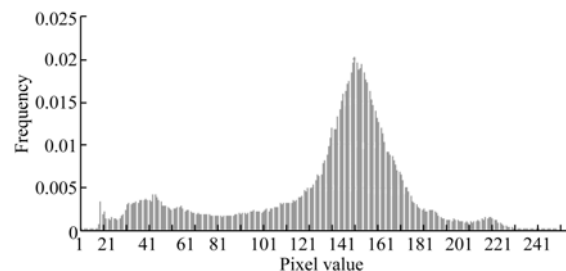
(b) 原始图像直方图

(b) Original image histogram



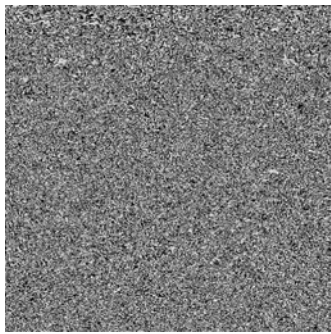
(c) 重建图像

(c) Reconstructed image

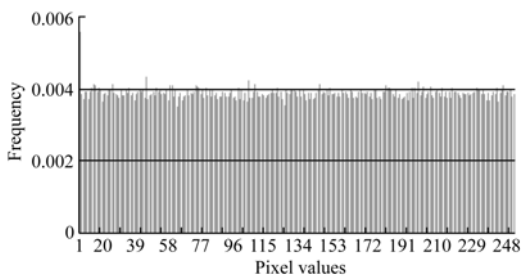


(d) 重建图像直方图

(d) Reconstructed image histogram



(e)解密错误重建图像
(e) Reconstructed image of wrong key



(f)解密错误重建图像直方图
(f) Reconstructed image histogram of wrong key

图 4 原始图像和重建图像直方图

Fig. 4 Histograms of original image and reconstructed image

4.4 明文敏感性分析

由于密钥序列和明文相关,因此不同的明文将会产生不同的密钥序列。取 Baboon 和 Lena 图像分别进行联合压缩加密,以产生相应的密钥序列,测试其明文敏感性。由表 2 可知,从第二次迭代密钥序列开始密钥流出现不同结果,由此可知,算法对明文敏感性高,抗差分攻击能力强。

4.5 加密与解密速度

算法的加密与解密速度是分析算法性能的标准之一,加密时间越短,表明加密性能越好。

为测试本文算法的加密性能,在不同码率下对比分析了几个算法的压缩加密总时间(总时间=小波变换时间+压缩编码时间+加密时间)、加密时间以及加密时间占总时间的百分比的结果如表 3 所示。由表 3 可知,随着码率的增加,总时间及加密时间也随之增加,但加密时间占总时间的百分比均小于 45%,即加密时间没有超过压缩时间,算法的加密性能较好。

4.6 几种算法运行时间的比较

将本文算法与其他算法的算法总时间及加密时间百分比进行对比,如表 4 所示。

表 2 明文敏感性测试

Tab. 2 Plaintext sensitivity test

迭代次数	密钥流
Baboon	
8	12be82
5	b8763b62
1	daf58611
3	62c523ff
1	29fbac7c
2	39edbf9e
Lena	
8	12be82
4	883b1afc
6	a1625dc3
6	c0238263
4	8ad8c3a3
6	d38ae0dc

表 3 压缩加密总时间和加密时间及其所占百分比

Tab. 3 Total time of joint compression & encryption algorithm and the percentage of encryption time

码率/bpp	总时间/s	加密时间/s	加密时间/总时间(%)
0.25	0.625	0.281	44.9
0.5	0.610	0.266	42.5
0.75	0.625	0.281	44.9
1.0	0.610	0.266	42.5
1.25	0.625	0.281	44.9
1.5	0.625	0.281	44.9

表 4 几种联合压缩加密算法时间对比

Tab. 4 Running time comparison of some joint compression & encryption algorithms

算法	时间	码率/bpp		
		0.25	0.50	1.00
本文算法	总时间/s	0.625	0.610	0.610
	加密时间百分比/%	44.9	42.5	42.5
EZW+Logistic	总时间/s	1.11	1.17	1.23
	加密时间百分比/%	42.20	42.66	44.33
SPIHT+SHA-1 ($\delta=1$)	总时间/s	5.66	8.09	12.29
	加密时间百分比/%	45.84	31.48	21.35

实验结果表明,本文算法的总时间和加密时间百分比大部分均低于 EZW+Logistic 算法;本文算法总时间低于 SPIHT+SHA-1($\delta=1$)算法的总时间,在码率较低时,本文算法的加密时间百分比低于 SPIHT+SHA-1($\delta=1$),而码率较高时,则相反。这是因为 SPIHT+SHA-1($\delta=1$)算法的加密发生在编码之前,这时加密时间不随码率的增加而增加。

5 结 论

本文算法采用超混沌 Chen 系统产生的密钥

序列对位平面编码过程中产生的上下文和判决进行修正,实现加密,使数据压缩和加密同步进行,且使密钥流与明文相关。实验结果表明,本文算法 PSNR 值至少提高 1 dB,密钥空间为 256 bit,加密时间占总时间的百分比均小于 45%,明文和密钥敏感性高。该算法实现了图像的联合压缩加密,其图像重建质量比原始 EZW 算法的高,并且具有高抗线性攻击和差分攻击能力,密钥空间大,安全性好。

参考文献:

- [1] SHAPIRO J M. Embedded image coding using zero-trees of wavelet coefficients [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12):3445-3462.
- [2] 孙健,任国强,吴钦章. 基于自适应指数哥伦布编码的图像压缩算法[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(11): 2973-2979.
SUN J, REN G Q, WU Q ZH. Image compression algorithm based on adaptive exp-golomb coding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2973-2979. (in Chinese)
- [3] 殷亚男,王晓东,李丙玉. 基于预测和 JPEG2000 的 MODIS 红外辐射多光谱图像无损压缩算法[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(6): 922-926.
YIN Y N, WANG X D, LI B Y. Lossless compression method based on prediction and JPEG2000 for MODIS emissive IR bands multispectral image [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(6): 922-926. (in Chinese)
- [4] 姚军财. 基于人眼对比度敏感视觉特性的彩色图像压缩技术[J]. *液晶与显示*, 2012, 27(6): 800-807.
YAO J C. Color image compression technology based on contrast sensitivity characteristics of human vision system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(6): 800-807. (in Chinese)
- [5] 宋蓓蓓,孙文方. 精确质量控制的遥感图像 JPEG2000 压缩方法[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(8): 2180-2186.
SONG B B, SUN W F. JPEG2000 compression for remote sensing images with precise quality control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 2180-2186. (in Chinese)
- [6] AKHSHANI A, AKHAVAN A, LIMS-C, *et al.*. An image encryption scheme based on quantum logistic map [J]. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 2012, 17(12): 4653-4661.
- [7] 任洪斌,尚振伟,张健. 适用于矩形图像的新二维映射图像加密算法[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(8): 1483-1489.
REN H E, SHANG ZH W, ZHANG J. Image encryption algorithm based on new two-dimensional map for rectangular image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1483-1489. (in Chinese)
- [8] AKHSHANI A, AKHAVAN A, LIM S-C, *et al.*. An image encryption scheme based on quantum logistic map [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, 17(12): 4653-4661.
- [9] 李娟,冯勇,杨旭强,等. 三维可逆混沌映射图像加密及其优化算法[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(9): 1738-1745.
LI J, FENG Y, YANG X Q, *et al.*. Invertible chaotic 3D map based image encryption and its optimized algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1738-1745. (in Chinese)
- [10] WONG K W, YUEN C H. Embedding compression in chaos-based cryptography [J]. *IEEE Trans Circuits Syst*, 2008, 55(11): 1193-1197.
- [11] CHEN J Y, ZHOU J W, WONG K-W. A modified chaos-based joint compression and encryption scheme [J]. *IEEE Transactions on Circuits and systems*, 2011, 58(2): 110-114.
- [12] YUEN C H, WONG K W. A chaos-based joint compression and encryption scheme using DCT and SHA-1 [J]. *Applied Soft Computing*, 2011,

- 11(8):5092-5098.
- [13] 朱从旭,孙克辉.对一类超混沌图像加密算法的密码分析与改进[J].物理学报,2012,61(12):120503(1)-120503(12).
ZHU C X, SUN K H. Cryptanalysis and improvement of a class of hyper-chaos based image encryption algorithms [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(12): 120503(1)-120503(12). (in Chinese)
- [14] 邓家先,任玉莉.基于改进零树编码的图像联合压缩加密算法[J].光子学报,2013,42(1):121-126.
DENG J X, REN Y L. Image joint compression-encryption algorithm based on improved zero-tree coding [J]. *Acta Photonica Sinica.*, 2013, 42(1):121-126 (in Chinese)
- [15] 邓海涛,邓家先,邓小梅.基于EZW的图像压缩和树形加密同步算法[J].物理学报,2013,62(11):110701(1)-110701(8).
DENG H T, DENG J X, DENG X M. Joint compression and tree structure encryption algorithm based on EZW [J]. *Acta Phys. Sin.* 2013, 62(11): 110701. (in Chinese)
- [16] 杨华千,廖晓峰,WONG K W,等.基于SPIHT的图像加密与压缩关联算法[J].物理学报,2012,64(4):040505(1)-040505(8).
YANG H Q, LIAO X F, WONG K W, *et al.*. SPIHT-based joint image compression and encryption [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 64(4), 040505. (in Chinese)
- [17] 周平,危丽佳,程雪峰.只有一个非线性项的超混沌系统[J].物理学报,2009,58(8):5201-5208.
ZHOU P, WEI L J, CHENG X F. A hyperchaos system with only one nonlinear term [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2009, 58(8): 5201-5208. (in Chinese)
- [18] 张青,王杰智,陈增强,等.共轭Chen混沌系统的分叉分析及基于该系统的超混沌生成研究[J].物理学报,2008,57(4):2092-2099.
ZHANG Q, WANG J Z, CHEN Z Q, *et al.*. The bifurcation analysis of a conjugate Chen chaotic system [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2008, 57(4):2092-2099. (in Chinese)
- [19] 武相军,王兴元.基于非线性控制的超混沌Chen系统混沌同步[J].物理学报,2006,55(12):6261-6266.
WU X J, WANG X Y. Chaos synchronization of the new hyperchaotic Chen system via nonlinear control [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2006, 55(12): 6261-6266. (in Chinese)
- [20] 张晓丹,李志萍,张丽丽.一类基于奇异值分解的Lyapunov指数计算方法[J].北京科技大学学报,2005,27(3):371-374.
ZHANG X D, LI ZH P, ZHANG L L. A method based on singular value decomposition for computation of Lyapunov exponents [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2005, 27(3): 371-374.
- [21] 邓家先,吴成柯,陈军.基于率失真斜率提升的干涉多光谱图像压缩[J].光学学报,2004,24(3):299-303.
DENG J X, WU CH K, CHEN J. Multi-spectral image compression based on rate-distortion slope lifting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(3):299-303. (in Chinese)
- [22] TAUBMAN D. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2000, 9(7):1151-1170.
- [23] TAUBMAN D, ORDENTLICH E, WEINBERGER M, *et al.*. Embedded block coding in JPEG2000 [J]. *Signal Processing on Image Communication*, 2002, 17(1):49-72.
- [24] ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG1 FCD 14495 public draft [OL]. (1997-06) [2013-10-28]. <http://www.jpeg.org/public/jpeglinks.htm>.

作者简介:



王 娣(1990—),女,山东枣庄人,主要从事领域为数字图像处理。E-mail: wangdi19901129@163.com

导师简介:



邓家先(1964—),男,湖北钟祥人,博士,教授,1986年于西安电子科技大学获得博士学位,主要从事数字图像处理、数字滤波器设计、自适应信号处理。E-mail:jxiandeng@126.com