

文章编号:1001-9081(2010)01-0186-04

# 基于预测误差差值扩展的彩色图像无损数据隐藏

熊志勇,蒋天发

(中南民族大学 计算机科学学院,武汉 430074)

(zhiyx@scuec.edu.cn)

**摘要:**将Tian差值扩展技术应用于彩色图像中,提出一种利用预测误差差值进行扩展嵌入的彩色图像无损数据隐藏算法。传统的差值扩展和预测误差扩展嵌入技术最大的缺点是过分利用差值造成载体图像质量严重下降。针对这一问题,该方法利用色彩分量间的相关性减小差值,并将差值扩展量分散到两个色彩分量中,同时,对差值直方图平移技术进行改进,使得同等嵌入率下图像质量达到最佳。实验结果表明,与其他算法相比,本算法在嵌入率和图像质量方面都有明显提高。

**关键词:**直方图平移;差值扩展;色彩分量;嵌入率;峰值信噪比

**中图分类号:**TP309.7    **文献标志码:**A

## Lossless data hiding for color images based on prediction error difference expansion

XIONG Zhi-yong, JIANG Tian-fa

(College of Computer Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** Applying Tian's difference expansion to color images, this paper proposed a lossless data hiding method for color images based on prediction error difference expansion. To solve the quality decline of stego-images from excessive modulation to pixels, the proposed method dispersed smaller expansion to two color components, and improved histogram shifting technique. Experimental results show that both the capacity for embedding users' message and the stego-image quality are significantly improved, when compared with other algorithms.

**Key words:** histogram shifting; difference expansion; color component; embedding rate; Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)

## 0 引言

在不引起过分失真的情况下将额外信息嵌入在数字作品中,如果接收方在提取信息时,还可以无损地恢复原始载体数据,这种技术称为无损/可逆数据隐藏。近年来,Tian提出的差值扩展技术<sup>[1]</sup>在无损数据隐藏领域受到越来越多的关注。利用差值扩展进行数据嵌入的算法通常能够提供较大的嵌入容量,而且差值扩展技术具有极好的可塑性,能够用于整数Haar小波系数、图像的预测误差等不同的差值,改造成适合不同目的的嵌入算法。目前国内外已有不少Tian差值扩展技术的变形和延伸<sup>[2-6]</sup>。

由文献[2]所提出的无损数据隐藏算法将差值扩展与差值直方图平移相结合的技术,其主要优点是在同等嵌入率下大幅度提高图像质量,分5个版本详细讨论差值扩展和预测误差扩展方法。该算法可以根据负载大小选择合适的阈值T,调整嵌入容量,从而使图像质量在当前负载下达到最佳,但此算法需要存储外部像素的最低位,并对这些像素进行最低位替换,这种替换降低了载体图像的质量,却不会带来任何容量的增加;另外,当增大阈值或多重嵌入时,载体图像质量下降严重。

目前所提出的基于差值扩展的无损嵌入算法大多都是针对灰度图像。虽然,祝玉新等人<sup>[7]</sup>对彩色图像的B分量进行Harr小波变换,嵌入可逆水印,但此方法与Tian差值扩展算

法没有本质的区别。为此,本文将Tian差值扩展技术应用于彩色图像中,提出了一种基于色彩分量间预测误差差值扩展的彩色图像无损嵌入方法。该方法充分利用色彩分量之间的相关性,将两个色彩分量中对应像素预测误差的差值进行扩展,以嵌入数据,比单分量更小的差值扩展量被分散到两个色彩分量中,减少了对图像的修改,载体图像的质量明显提高。本文还改进了直方图平移技术,对外部像素只进行直方图平移而不替换最低位,在不影响嵌入容量的同时进一步提高图像质量。

## 1 色彩分量间预测误差差值扩展

### 1.1 传统差值扩展方法

文献[1]中引出的差值扩展算法,可以实现在一对像素中嵌入1位水印。设x,y是相邻两个像素的灰度值,x,y ∈ [0,255],则这两个像素值的均值l和差值h可用式(1)计算:

$$\begin{cases} l = (x + y)/2 \\ h = x - y \end{cases} \quad (1)$$

文中,整数除法均采用下取整。式(1)的逆变换为:

$$\begin{cases} x = l + (h + 1)/2 \\ y = l - h/2 \end{cases} \quad (2)$$

这个可逆的整数变换就是整数Haar小波变换。把需要嵌入的1位水印w按如下方式嵌入:

收稿日期:2009-07-03;修回日期:2009-08-14。 基金项目:国家民委重点科研项目(MZY02004)。

作者简介:熊志勇(1965-),男(土家族),湖北恩施人,副教授,主要研究方向:软件信息安全、数字水印; 蒋天发(1954-),男,湖北荆门人,教授,主要研究方向:网络安全、多媒体数字水印。

$$h_w = 2h + w \quad (3)$$

式(3)就是差值扩展的嵌入公式。

## 1.2 单分量预测误差扩展

自然图像中像素值之间存在着很强的相关性,这是图像压缩和线性预测编码的基础。相邻像素的相似度随着像素距离的增加而逐渐减小,邻近像素在统计意义上应具有最大的相关性,当前像素通过其邻近像素来预测的准确度也应最高<sup>[8]</sup>。对任一指定的像素,可以用最邻近像素的平均值来预测当前像素的值,当前像素值  $a$  与预测值  $\bar{a}$  之差即为预测误差,  $p = a - \bar{a}$ 。嵌入 1 位信息  $w$  后的预测误差为

$$p_w = 2p + w \quad (4)$$

嵌入信息的像素值:

$$a_w = \bar{a} + p_w \quad (5)$$

RGB 真彩图像的三个色彩分量都是独立而清晰的灰度图像,因此相邻像素的相关性也适于彩色图像的各色彩分量,用以上嵌入方法可以在色彩分量中嵌入隐藏数据,称这种嵌入方法为单分量预测误差扩展。

Tian 差值扩展实际上也是利用预测误差嵌入数据,由于仅用相邻的一个像素进行预测,没有考虑周围像素的变化趋势,因此预测准确性不高,即预测误差偏大。为了提高预测准确性,利用最小距离下像素值的强相关性,选择最邻近的 4 个像素(上、下、左、右)作为预测像素,用式(6)所示的预测模板计算邻近像素的平均值,并将其作为当前像素的预测值,其中,  $a_1, a_2, a_3$  和  $a_4$  为邻近像素的像素值。

$$\bar{a} = \frac{1}{4}(a_1 + a_2 + a_3 + a_4) \quad (6)$$

## 1.3 色彩分量间预测误差差值扩展

自然图像的三个色彩分量之间存在密切的相关性<sup>[9]</sup>,在一个特定的区域内,两个色彩分量中对应像素的预测准确度应保持一致,即预测误差非常接近,预测误差的差值很小。图 1(a)、(b) 是  $200 \times 200$  Lena 真彩图像蓝色(B) 分量和绿色(G) 分量的预测误差直方图(峰值分别为 3088 和 3073),图 1(c) 是 BG 分量的预测误差差值直方图(峰值 6710)。图 1 所示的结果表明,预测误差集中在 0 附近,而且两个色彩分量间预测误差的差值比单分量预测误差更小。

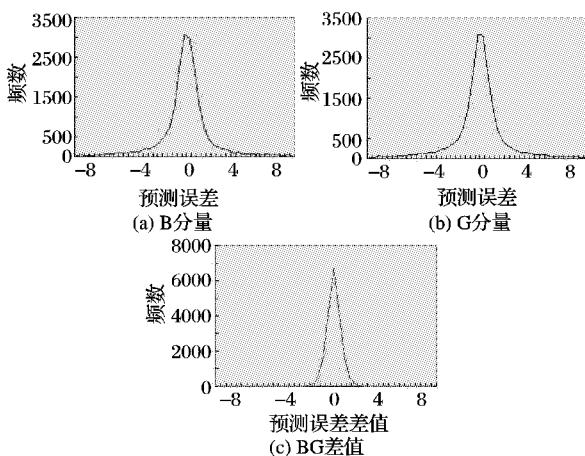


图 1 Lena 图像蓝绿分量预测误差及差值直方图

将传统差值扩展方法进行推广以适应负整数,对任意两个色彩分量,由式(7)计算预测误差  $p_1, p_2$  的均值和差值:

$$\begin{cases} l = (p_1 + p_2)/2 \\ h = p_1 - p_2 \end{cases} \quad (7)$$

对应的逆变换为:

$$\begin{cases} p_1 = l + (h + 1)/2, p_2 = l - h/2, & l \geq 0, h \geq 0 \\ p_1 = l + h/2, p_2 = l - (h - 1)/2, & l \geq 0, h < 0 \\ p_1 = l + h/2, p_2 = l - (h + 1)/2, & l < 0, h \geq 0 \\ p_1 = l + (h - 1)/2, p_2 = l - h/2, & l < 0, h < 0 \end{cases} \quad (8)$$

把需要嵌入的 1 位数据  $w$  按如下方式嵌入:

$$h_w = 2h + w \quad (9)$$

当  $|p_1| < |p_2|$ ,  $|p_1 + p_2| = 1, w = 0$  时,  $|h|$  为奇数,  $|h_w|$  为偶数, 经式(8)变换后, 所得  $p_{1w}, p_{2w}$  符号相反, 且  $|p_{1w}| = |p_{2w}|$ , 在恢复时将出现错误。例如,  $p_1 = 2, p_2 = -3$ , 由式(7)可得,  $l = 0, h = 5$ , 由式(9)得,  $h_w = 2 \times 5 + 0 = 10$ , 再由式(8)可得,  $p_{1w} = 0 + (10 + 1)/2 = 5, p_{2w} = 0 - 10/2 = -5$ , 恢复时,  $p_1 = 0 + (5 + 1)/2 = 3, p_2 = 0 - 5/2 = -2$ , 与原始值不符。

造成以上错误的原因是采用下取整求平均值,丢失了平均值的符号。为了解决此问题,本文改用求和的方法:

$$\begin{cases} s = p_1 + p_2 \\ h = p_1 - p_2 \end{cases} \quad (10)$$

相应的逆变换为:

$$\begin{cases} p_1 = p_1 \pm (h + 1)/2, p_2 = p_2 \mp h/2, & s \geq 0, h \geq 0 \\ p_1 = p_1 \pm h/2, p_2 = p_2 \mp (h - 1)/2, & s \geq 0, h < 0 \\ p_1 = p_1 \pm h/2, p_2 = p_2 \mp (h + 1)/2, & s < 0, h \geq 0 \\ p_1 = p_1 \pm (h - 1)/2, p_2 = p_2 \mp h/2, & s < 0, h < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\pm$  表示嵌入时+,恢复时-。把需要嵌入的 1 位数据  $w$  按如下方式嵌入:

$$h_w = h + w \quad (12)$$

提取和恢复时:

$$\begin{cases} w = LSB(h_w) \\ h = (h_w - w)/2 + w \end{cases} \quad (13)$$

嵌入时,用式(12)计算  $h_w$ , 将  $h_w$  代入式(11)可得  $p_{1w}, p_{2w}, p_{1w} - p_{2w}$  仍为  $2h + w$ , 再由式(5)计算新的像素值  $a_{1w}, a_{2w}$ , 实现在两个色彩分量中嵌入 1 位数据;图像恢复时,用式(13)计算  $h$ , 仍用式(11)和式(5)计算像素值。由于嵌入过程是对两个色彩分量的预测误差的差值进行扩展,所以我们将其称为色彩分量间预测误差差值扩展。

## 2 基于预测误差差值扩展的无损数据隐藏

### 2.1 像素分组

在提取信息和恢复图像时,必须确保像素的预测值与嵌入时一致,也就是说嵌入信息不能改变像素的预测值,为此本文将图像中的像素分成两组,如图 2 所示。

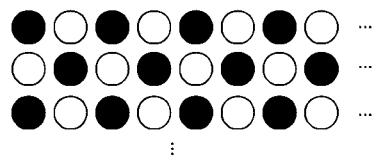


图 2 像素分组图

图 2 中●表示待预测的像素(待嵌入信息),用最邻近的 4 个预测像素(用○表示)进行预测;图像边界上的像素用相反方向的预测像素代替所缺的像素。例如图像左边界像素,由于缺少左预测像素,所以用上、下、右、右像素进行预测,依此类推可处理其他边界像素。经过分组,所有待预测的像素

都存在对应的预测像素,而且不受嵌入水印的影响。

用多重嵌入的方法可以提高嵌入容量,其中奇数次嵌入用图2所示的分组方案;偶数次嵌入时,像素角色对调,即○像素作为待预测的像素,●像素作为预测像素。

## 2.2 直方图平移

为使图像质量在特定负载下达到最佳,本文采用与文献[2]类似的直方图平移技术。以BG分量为例,将所有●像素的B、G分量预测误差的差值以直方图的方式表示,根据负载大小确定一差值选择阈值T,把直方图划分为内部区域和外部区域,如图3所示。内部区域[-T, T]所对应的差值将进行扩展嵌入,而外部区域[-h<sub>l</sub>, -T-1]和[T+1, h<sub>r</sub>]的差值将沿横轴向外侧平移,以避免扩展后的内部区域和外部区域重叠。这里h<sub>l</sub>和h<sub>r</sub>分别为直方图左端和右端的非零端点,根据式(11)、(12),内部区域扩展后会变大为[-2T, 2T+1],因此,外部区域要分别向左和向右移至[-h<sub>l</sub>-T, -2T-1]和[2T+2, h<sub>r</sub>+T+1]。避免内部区域和外部区域重叠的目的是保证在去除所嵌入的数据后可以无损地恢复原始图像。与文献[2]不同的是,本文只在内部区域嵌入信息,而对外部区域只进行平移而不替换最低位,相应地,在提取信息时,仅提取[-2T, 2T+1]范围内差值的最低有效位。

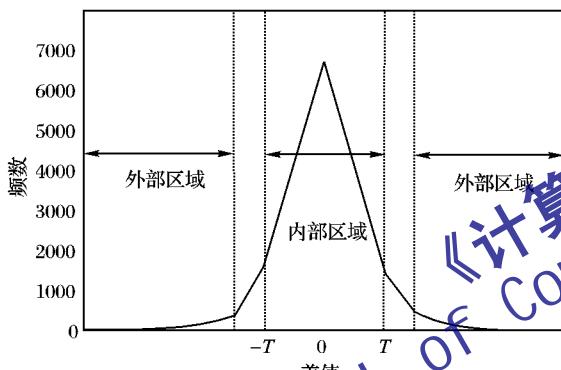


图3 差值直方图平移示意图

## 2.3 差值分类及溢出处理

### 2.3.1 差值分类

无论是内部区域扩展还是外部区域平移,都有可能发生像素值溢出问题。色彩分量中灰度值限制在0~255,因此用式(5)嵌入数据后,色彩分量中的灰度值也必须在此范围内,即:

$$p_w \in [-\bar{a}, 255 - \bar{a}] \quad (14)$$

在实际嵌入之前,先将所有差值进行分类。根据差值h的情况,将像素分为3类:

1) 可扩展差值(I类)。在内部区域,当h<0时,w=0,否则当h≥0时,w=1,用式(12)计算h<sub>w</sub>,再用式(11)计算相应的p<sub>1w</sub>和p<sub>2w</sub>,若p<sub>1w</sub>、p<sub>2w</sub>均满足式(14),则对应的差值即为可扩展差值(I类)。

2) 可平移差值(II类)。在外部区域,当h<0时,h<sub>w</sub>=-T,当h>0时,h<sub>w</sub>=T+1,用式(11)计算相应的p<sub>1w</sub>和p<sub>2w</sub>,若p<sub>1w</sub>、p<sub>2w</sub>均满足式(14),则对应的差值即为可平移差值(II类)。

3) 其他差值(III类)。包括内部不可扩展和外部不可平移差值。

### 2.3.2 溢出处理

对于III类差值,本文采取调整差值的方法嵌入数据。为确保调整后不发生溢出,在两个色彩分量中随机选取一色彩

分量n,用式(15)调整该分量的预测误差:

$$\begin{cases} |p_{nw}| = |p_n| - 1, & |p_n| > T_n \\ p_{nw} = p_n + 1, & \bar{a} < 128, |p_n| < T_n \\ p_{nw} = p_n - 1, & \bar{a} \geq 128, |p_n| < T_n \end{cases} \quad (15)$$

式中:n∈[1,2];T<sub>n</sub>为分量n的调整阈值;T<sub>n</sub>∈[1,127],以其中一个分量为例说明调整阈值的选取方法,将所有III类差值对应分量的预测误差绝对值以直方图的形式进行表示,用f(p)表示预测误差p发生的频数。从T<sub>n</sub>=1开始,向T<sub>n</sub>增加的方向寻找合适的阈值。对某一选择的阈值T<sub>n</sub>,如果f(T<sub>n</sub>)和f(T<sub>n</sub>+1)均为0,将T<sub>n</sub>作为该分量的调整阈值,否则增加T<sub>n</sub>的值(幅度为1),继续寻找合适的阈值。

调整某一分量的预测误差后,两个色彩分量间预测误差差值可能增1或者减1,所以调整后的差值有可能超出[-2T, 2T+1],分3种情况分别进行处理:

1) 调整前h<sub>w</sub>∉[-2T, 2T+1],对这类差值不作任何处理。

2) 调整后h<sub>w</sub>∉[-2T, 2T+1],直接调整这种类型的差值,调整后的差值不含嵌入信息。

3) 调整后h<sub>w</sub>∈[-2T, 2T+1],对这类差值,需根据待嵌入的数据进行调整,若差值的LSB与待嵌入的数据位相同,差值保持不变,否则通过调整某一分量的预测误差实现差值调整,即这类差值中包含嵌入信息。

### 2.4 选择可扩展差值

#### 2.4.1 确定嵌入位置

选择可扩展差值是为了确定可嵌入位置,它是嵌入算法最关键的部分。确定嵌入位置实际上就是确定差值选择阈值T。为了叙述方便,本文首先定义如下变量:

W、H为载体图像的宽和高;N为嵌入次数,初值为0;P、P<sub>N</sub>为依次为需要嵌入的总负载、当前所需嵌入的负载;R、R<sub>N</sub>为依次为需要的总嵌入率、当前所需嵌入率;T为差值选择阈值;T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>为依次为两个色彩分量的调整阈值;E为内部可扩展差值数;A为可调整差值数(III类差值中调整后的差值h<sub>w</sub>∈[-2T, 2T+1]);M为压缩后的溢出定位图;O为III类差值总数;L为所有III类差值的最低位,其位流长度为III类差值的总数;Q为信息头;η(·)为求位流长度函数;C为负载为T时所能提供的嵌入容量,C=E+A-η(M)-η(L)-η(Q)。

RGB真彩图像共有三种分量组合,即BG、GR和RB,在某一分量组合中,单次嵌入的最大嵌入率约为0.5,因此一个分量组合的最大嵌入率约为1.0,但实际很难达到最大嵌入率。对某一分量组合,我们以0.8为参考嵌入率,若R≤0.4,则选用单次嵌入,若0.4<R≤0.8,选用两次嵌入;若0.8<R≤1.6,则增加一个分量组合,依此类推。

1) 开始确定嵌入位置之前,进行初始化,令T=0,T<sub>1</sub>=T<sub>2</sub>=1,C=0,用式(16)计算R和R<sub>N</sub>的值:

$$R = P/(W \times H), R_N = \begin{cases} R, & R \leq 0.4 \\ R/2, & 0.4 < R \leq 0.8 \\ 0.4, & R > 0.8 \end{cases} \quad (16)$$

2) 计算阈值为T时的E、A、η(M)、η(L)、η(Q)以及本次嵌入所能提供的嵌入容量C,检查此时的C是否足以嵌入长度为W×H×R<sub>N</sub>的信息位,若不足以嵌入,T加1继续寻找合适的阈值;若足以嵌入,计算此时的真实负载P<sub>N</sub>和剩余负载P,当C≥η(P),P<sub>N</sub>=P,η(P)=0,否则P=P-P<sub>N</sub>。将信

息编码后嵌入图像,嵌入次数  $N$  加 1,进入下一步。

3)若  $\eta(P) = 0$ ,跳转到第 5)步;否则判断是否增加分量组合,如果  $N$  为奇数,回到第 1)步;如果  $N$  为偶数,转下一步。

4)选择下一个分量组合,回到第 1)步。分量组合的顺序为 BG、GR 和 RB,如果三个分量组合均已选取,则进入下一轮,即重新选择 BG 组合。

5)已找到足够的嵌入空间,判断过程结束。

#### 2.4.2 构造信息头

信息头前 2 字节为标志位(“PE”),接着的 3 字节分别是差值选择阈值和两个色彩分量的调整阈值,紧跟其后的部分依次是Ⅲ类差值总数(2 Byte)、定位图中 1 的数量(2 Byte)、压缩后的定位图长度(4 Byte)、负载长度(4 Byte)。信息头共 17 Byte,位流长度  $\eta(Q) = 17 \times 8 = 136 \text{ bit}$ 。

#### 2.5 信息嵌入过程

##### 2.5.1 确定待嵌入信息流

在溢出定位图中,内部区域的可扩展差值标识为 0,不可扩展差值标识为 1;外部区域的可平移差值标识为 0,不可平移差值标识为 1。嵌入前用算术编码对溢出定位图进行压缩。

对于一个给定负载,一旦找到合适的阈值  $T$ ,其信息头  $Q$ 、压缩的定位图  $M$  和所有Ⅲ类差值的最低位  $L$  组成待嵌入的辅助信息  $B_1$ ,即  $B_1 = Q \cup M \cup L \circ B_1$  是数据提取和无损恢复图像所必需的信息,它将和负载一起嵌入到载体图像,因此,待嵌入的信息流  $B = B_1 \cup P_N$ 。

##### 2.5.2 构造嵌入后的图像

根据选定的分量组合和阈值,即可进行数据隐藏。从上到下的光栅扫描顺序扫描整幅图像,对任一像素计算两个分量的预测误差以及它们的差值  $h$ 。

1)当扫描到的预测误差差值  $h$  是Ⅰ类差值时,用式(12)、(11)和(5)进行扩展嵌入信息  $B$ 。

2)当扫描到的预测误差差值  $h$  是Ⅱ类差值时,当  $h < 0$  时,  $h_w = -T$ ,否则当  $h > 0$  时,  $h_w = T + 1$ ,用式(11)和式(5)进行平移操作。

3)当扫描到的预测误差差值  $h$  是Ⅲ类差值时,按 2.3.2 节叙述的方法进行调整或嵌入信息。

#### 2.6 信息提取和图像恢复

##### 2.6.1 信息检测

在提取信息前先进行检测,判断待测图像是否嵌入信息。按 BG、GR 和 RB 顺序选取色彩分量组合,对每一分量组合,按 2.1 节所述的像素分组方法,先检测偶数像素组再检测奇数像素组。检测时,阈值  $T$  从 0 开始,按光栅扫描顺序,从差值的内部区域( $h \in [-2T, 2T + 1]$ )中提取信息头,若存在标志信息则结束循环,从信息头中取出相应的差值选择阈值  $T$ ;否则,  $T$  增加 1 继续检测,直至找到合适的阈值或  $T$  达到差值直方图的端点。若  $T$  达到直方图的端点仍未检测到标志信息,说明图像中未嵌入信息或嵌入的信息已被破坏。

##### 2.6.2 信息提取和图像恢复

如果检测到隐藏信息,从信息头中取出相应的参数,根据这些参数从图像中提取信息,同时恢复载体图像。以其中的某一次为例加以说明:

1)按光栅扫描顺序,计算所有●像素中两个色彩分量间预测误差差值  $h$ ,若  $h \in [-2T, 2T + 1]$ ,则提取  $h$  的 LSB,所得位流即为嵌入的信息流  $B$ 。

2)从信息流  $B$  中分离出压缩的定位图  $M$ 、所有Ⅲ类差值

的最低位  $L$  以及有效负载  $P_N$ 。

3)将  $M$  解压缩生成定位图。

4)再次扫描差值,若差值  $h \in [-2T, 2T + 1]$ ,而且定位图相应的像素为黑色,则差值属于Ⅰ类差值,用式(13)、(11)和式(5)恢复像素;若差值  $h \in [-2T, 2T + 1]$ ,而且定位图相应的像素为白色,则差值属于Ⅲ类差值,此时若  $L$  中对应的信息位与  $h$  的 LSB 不同,随机选取一色彩分量(随机数种子与嵌入时相同),用下式恢复该分量的像素值;若差值  $h \notin [-2T, 2T + 1]$ ,而且定位图相应的像素为黑色,则差值属于Ⅱ类差值,当  $h < 0$  时,  $h_w = -T$ ,当  $h > 0$  时,  $h_w = T + 1$ ,用式(11)和式(5)恢复像素;若差值  $h \notin [-2T, 2T + 1]$ ,而且定位图相应的像素为白色,则差值属于Ⅲ类差值,此时若  $h$  的 LSB 不等于  $L$  中对应的信息位,随机选取一色彩分量(随机数种子与嵌入时相同),用式(17)恢复该分量的像素值。

$$\begin{cases} |p_{nw}| = |p_n| + 1, & |p_n| > T_n \\ p_{nw} = p_n - 1, & \bar{a} < 128, |p_n| \leq T_n \\ p_{nw} = p_n + 1, & \bar{a} \geq 128, |p_n| \leq T_n \end{cases} \quad (17)$$

式中  $n \in [1, 2]$ ,  $T_n$  为分量  $n$  的调整阈值。

#### 3 实验结果及分析

采用 C++ Builder6 开发平台进行仿真实验,图 4 是选取的几个典型的例子。对所选的 4 幅图像在蓝绿分量嵌入隐藏信息( $T = 2$ )能保持较高的图像质量( $PSNR > 52 \text{ dB}$ ),如图 5 所示。

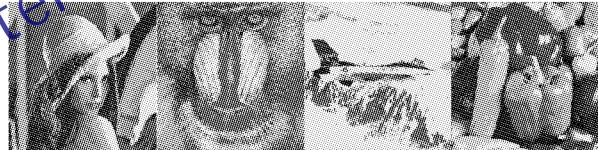


图 4 原始图像

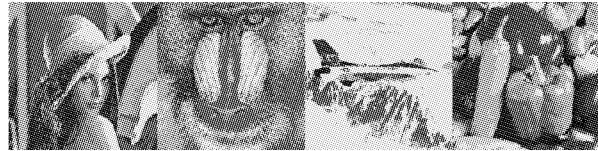


图 5 蓝绿分量嵌入信息的图像( $T = 2$ )

表 1 中列出了色彩分量间预测误差差值扩展算法和单分量预测误差扩展法在相同阈值下的嵌入率和 PNSR 对比实验结果,为了在同等条件下对比,单分量预测误差扩展方法在每一像素中从蓝绿分量中随机选取某一分量嵌入信息。实验结果表明:文中提出的色彩分量间预测误差差值扩展算法充分利用自然图像色彩分量之间的相关性,将很小的差值扩展量( $h + w$ )分散到两个色彩分量中,减小了对图像的修改量,图像质量和嵌入率均有明显提高。

表 1 与预测误差扩展的嵌入率和 PSNR 对比结果( $T = 2$ )

图像	本文算法			单分量预测误差扩展		
	嵌入率	PSNR(B)/dB	PSNR(G)/dB	嵌入率	PSNR(B)/dB	PSNR(G)/dB
Lena	0.46	53.28	53.09	0.29	48.34	48.41
Baboon	0.43	52.22	52.42	0.11	46.62	46.75
F16	0.43	52.89	52.67	0.29	48.38	48.52
Peppers	0.32	52.40	52.53	0.20	48.30	48.29

(下转第 202 页)

相邻像素的相关性大大降低了。

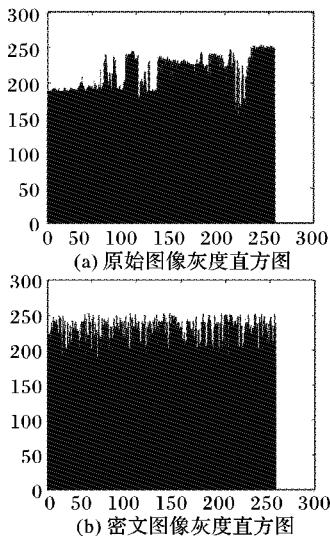


图 6 灰度直方图比较

表 2 明文、密文的像素相关性对比

方向	明文图像	密文图像
水平方向	0.9523	0.0563
竖直方向	0.9145	0.0175
对角方向	0.9378	0.0252

## 5 结语

本文提出了一种利用切延迟的椭圆反射腔映射混沌系统和双信道保密通信方法实现数据加解/密混沌保密通信方案。该方案采用切延迟的椭圆反射腔映射系统产生 CPRNG 系统的驱动序列,然后用按字节加密处理的方法对明文进行加密,在实现过程中又用到遮掩技术,相当于对信息信号进行了双

重加密,提高了保密通信系统的保密性;采用两信道传输方案,不仅提高了系统的抗扰性能,且进一步增加了密钥的复杂性;同步信号获取采用单变量单向耦合方法,工程上容易实现。因此,本文给出的方案是一种可靠且实用的混沌保密通信方法。

## 参考文献:

- [1] 郑会永.混沌及混沌保密通信技术[J].中国图象图形学报,1999,3(12):53~60.
- [2] SHORT K M. Steps towards unmasking secure communication [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1994, 4(4): 959~977.
- [3] 包浩明,朱义胜.基于分段抛物线映射的混沌加密方案[J].大连海事大学学报,2008,34(2):53~60.
- [4] 龙敏,丘水生.离散超混沌同步保密通信系统的设计与分析[J].小型微型计算机系统,2008,29(5):933~935.
- [5] 张家树,肖先赐.混沌时间序列的 Volterra 自适应预测[J].物理学报,2000,49(3):403~408.
- [6] 张家树,肖先赐.用于低维混沌时间序列预测的一种非线性自适应预测滤波器[J].通信学报,2001,22(10):93~98.
- [7] 郭进峰,郭静波.一种破译混沌直接序列扩频保密通信的方法[J].物理学报,2008,57(3):1477~1483.
- [8] 孙克辉,谈国强,盛利元. TD-ERCS 离散混沌伪随机序列的复杂性分析[J].物理学报,2008,57(6):3360~3366.
- [9] 盛利元,闻江,曹莉凌等.TD-ERCS 混沌系统的差分分析[J].物理学报,2007,56(1):78~82.
- [10] 王雷,江美平,王赞基.一种新型的混沌伪随机数发生器[J].物理学报,2006,55(8):3962~3968.
- [11] 朱良,朱中梁.一种基于 Logistic 映射的混沌跳频序列[J].电波科学学报,2004,19(3):333~337.
- [12] 徐茂智,游林.信息安全与密码学[J].物理学报,2005,54(9):4031~4037.

(上接第 189 页)

表 2 列出了本文改进的直方图平移算法和文献[2]的直方图平移算法在多个阈值下的嵌入率和 PSNR 值,其中所用的直方图为色彩分量间预测误差差值直方图,实验对象为  $200 \times 200$ Lena 彩色图像的 BG 分量组合。实验结果表明:  $T$  越小,需平移的差值越多,改进算法的效果越明显。

表 2 不同阈值下嵌入率和 PSNR 值对比实验(图像 Lena)

阈值 $T$	本文算法			单分量预测误差扩展		
	嵌入率	PSNR(B)/dB	PSNR(G)/dB	嵌入率	PSNR(B)/dB	PSNR(G)/dB
0	0.164	56.74	57.78	0.159	55.19	55.80
1	0.382	54.48	54.34	0.377	53.74	53.80
2	0.459	53.33	53.07	0.455	53.09	52.90
3	0.482	52.78	52.61	0.478	52.72	52.53

## 4 结语

针对 Tian 差值扩展算法和 Thodi 直方图平移算法的缺点,提出一种基于色彩分量间预测误差差值扩展的彩色图像无损数据隐藏算法。该算法将差值扩展量分散到两个色彩分量中,减少了对图像的修改,含印图像质量明显提高,同时,对差值直方图平移技术作了改进,进一步提高嵌入率和图像质量。隐藏数据的提取和图像恢复均不需要原始图像,并在提取数据后能够无损地恢复原始图像。该算法在不可见性和嵌入容量方面取得了较好的效果,在军事、法律和医学等领域具有广泛的应用前景。下一步的工作是,改进或者完全不用定

位图,进一步提高图像质量和嵌入容量。

## 参考文献:

- [1] TIAN JUN. Reversible data embedding using a difference expansion [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 890~896.
- [2] THODI D M, RODRIGUEZ J J. Expansion embedding techniques for reversible watermarking [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(3): 721~730.
- [3] ALATTER A M. Reversible watermark using the difference expansion of a generalized integer transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 32(8): 1147~1156.
- [4] 陈开英,胡永健,李健伟.利用差值扩展进行可逆数据隐藏的新算法[J].计算机应用,2008,28(2):455~459.
- [5] 邓世文,刘焕平,叶宏宇.基于 Laplacian 残差扩展的可逆嵌入算法[J].计算机工程与应用,2008,44(3):110~113.
- [6] 彭德云,王嘉祯.基于错误控制编码的差值扩展可逆数字水印[J].计算机工程,2007,33(21):18~20.
- [7] 祝玉新,孙星明,杨恒伏.基于 Harr 小波的彩色图像可逆水印算法[J].计算机应用研究,2007,24(6):165~169.
- [8] 杨边,陆哲明,徐殿国,等.基于邻近像素的低复杂度预测矢量量化图像压缩编码算法[J].电子学报,2003,31(5):707~710.
- [9] 曹文伦,彭国华,秦洪元,等.利用色彩分量相关性的彩色图像分形编码方法[J].计算机工程与应用,2004,40(22):51~55.