

文章编号:1001-9081(2010)09-2408-05

基于三分量预测误差差值扩展的可逆数据隐藏

熊志勇,王江晴

(中南民族大学 计算机科学学院,武汉 430074)

(zhiyx@scuec.edu.cn)

摘要:针对传统差值扩展存在过分修改像素值、须嵌入定位图等缺陷,提出了一种新的彩色图像可逆数据隐藏算法。首先利用色彩分量之间的相关性减小差值,并根据扩展方向和差值的符号,用较小的差值扩展量修改部分色彩分量的像素值,扩展方向由可能产生上溢和下溢的像素数量决定;其次采用单向像素值调整的方法避免像素值溢出,并用少量的调整信息代替定位图,嵌入容量大幅提高;最后改进差值直方图平移技术控制嵌入容量和图像失真。提取端根据临界像素值的顺序定位调整的像素位置,用调整信息恢复调整的像素值,在提取信息的同时可无损地恢复原始图像。实验结果表明,所提出的算法在大幅提高嵌入容量的同时,仍能保持较高的图像质量。

关键词:可逆数据隐藏;三分量;差值扩展;预测误差差值扩展;溢出定位图

中图分类号: TP309 文献标志码:A

Reversible data hiding based on prediction error difference expansion of ternary components

XIONG Zhi-yong, WANG Jiang-qing

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

Abstract: To avoid the drawback of Difference Expansion (DE) algorithm which must embed a location map and the quality decline of stego-images from excessive modulation to pixels, a reversible data hiding algorithm for color images was proposed. The algorithm made use of correlation of color components to decrease difference and use smaller expansion to change the pixels value of some components. The expansion direction was determined by the quantity of overflow and underflow pixels. The embedding scheme adopted the adjusting method of single direction pixels value to prevent overflow or underflow, and embedded a few adjusting value instead of location map, so the embedding capacity was increased; finally, improved the difference histogram shifting technique to control the capacity and distortion. According to the sequence of critical value, the adjusted pixels value could be restored. The experimental results show the embedding capacity and the quality of stego-image are significantly improved in comparison with other new or classical algorithms.

Key words: reversible data hiding; ternary components; Difference Expansion (DE); prediction error difference expansion; overflow location map

0 引言

大多数信息隐藏和数字水印嵌入算法中,信息嵌入过程都会不可逆地改变原始图像数据,在某些应用中,因嵌入数据而导致的作品改变是不可接受的,例如在医学应用中,对图像的任何修改都可能引起误操作,在这种情况下,要求隐藏信息可以完全去除。可逆数据隐藏是指提取端在提取数据的同时,可以无损地恢复原始图像,可逆数据隐藏算法的性能指标主要包括三个方面,即嵌入容量、含密图像质量和算法复杂度。近年来,Tian^[1]提出的差值扩展(Difference Expansion, DE)技术在可逆数据隐藏领域受到广泛的关注,基于差值扩展的可逆嵌入算法通常能够提供较大的嵌入容量,而且差值扩展方法可用于整数 Haar 小波系数、预测误差等不同的差值,改造成适合不同目的的可逆嵌入算法。

为改进差值扩展算法的嵌入容量和图像质量,国内外学者相继提出了很多改进或延伸的嵌入算法。文献[2]提出将差值扩展与差值直方图平移相结合的方法提高含密图像的质量,该方法根据实际负载大小选择合适的阈值 T ,调整嵌入容量,从而控制图像的质量;文献[3]提出用双阈值方法改进直

方图平移技术,并通过改进嵌入公式减少不可扩展差值,提高定位图的压缩率,从而提高嵌入容量,图像质量也有一定的改善;文献[4]采用分段平移的方法改进 Thodi^[2]的差值直方图平移技术,进一步提高图像质量。但上述直方图平移方法需存储外部差值的最低有效位(Least Significant Bit, LSB),并替换这些差值 LSB,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。文献[5-6]改变像素分组方法,像素对相互重叠,与重复嵌入方法相比,提高了嵌入容量和图像质量,但像素对重叠方法在提取信息时须反向计算差值并恢复像素值,以便提取前一位信息,因此提取效率较低。

对于差值扩展嵌入方法,溢出定位图是影响嵌入容量的主要因素,消除定位图对改善算法性能具有重要的意义。文献[7]中提出结合差值扩展和可逆对比图(Reversible Contrast Mapping, RCM)的可逆水印算法,将图像分成互不相交的 2×2 图像块,每一图像块中,前两个像素为 RCM 像素对,另外的两个像素为 DE 像素对,两种像素对均用于嵌入信息,RCM 像素对还用于嵌入少量的标志信息以代替定位图,嵌入容量有较大的提高,但是该方案中有一半的像素对采用 RCM 变换,图像质量下降较严重。文献[8]提出基于差值直方图平移的

收稿日期:2010-03-24;修回日期:2010-05-18。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60975021)。

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:信息隐藏、数字水印; 王江晴(1964-),女,湖北武汉人,教授,博士,主要研究方向:智能模拟技术、图像处理。

可逆嵌入方法,该方法采用多重嵌入,每次使用1个阈值,将绝对值大于阈值的差值沿直方图左右半轴各平移1位,用空出的位置嵌入数据,为了避免像素溢出,平移之前先将像素值调整到[1,254],并将调整像素的位置记入定位图,压缩的定位图位流与负载一起嵌入图像。这种嵌入方法在溢出处理方面比较有特色,但仍需要嵌入压缩定位图。在溢出处理方面较出色的是文献[9]中的方法,嵌入前将像素值的范围调整为[Q,255-Q],Q为嵌入参数,调整信息与负载一起嵌入图像,提取端根据像素值Q和255-Q的顺序定位调整像素的位置,因此不需要嵌入定位图,但两端调整的方法对嵌入容量影响较大。文献[10]提出了一种双分量预测误差差值扩展可逆嵌入算法,文献[11]提出分段差值扩展算法。

针对差值扩展嵌入方法的不足,提出一种基于三分量差值扩展的彩色图像可逆数据隐藏算法。该算法首先利用色彩分量之间的相关性减小差值,从而减少了对图像的修改,与单分量预测误差扩展相比,嵌入容量和载体图像的质量明显提高。根据原始图像中像素分布情况,自适应地选择溢出像素数量较小的一端作为扩展方向,用差值扩展量修改色彩分量的像素值实现数据嵌入。另外,采用调整像素值的方法实现溢出处理,调整方向与像素扩展方向一致。提取端根据临界像素值的顺序定位调整的像素位置,用少量的调整信息即可代替定位图,嵌入容量大幅提高。

1 三分量预测误差差值

1.1 预测误差

自然图像中像素值之间存在着很强的相似性,相邻像素的相似性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有最强的相关性,当前像素通过其邻近像素来预测的准确度也应最高^[12],对任一像素,可用最邻近像素的平均值来预测当前像素值。文献[13]对多种预测方案进行比较,证明菱形预测方案的预测准确度最高,为了提高预测准确性,本文采用菱形预测方案,选择相邻的4个像素(上下左右)作为预测像素,用4个预测像素的平均值作为当前像素的预测

值,像素值a与预测值 \bar{a} 之差即为预测误差:

$$p = a - \bar{a} \quad (1)$$

其中: $a, \bar{a} \in [0, 255]$, $p \in [-255, 255]$ 。彩色图像的色彩分量都是独立且清晰的灰度图像,因此相邻像素的相关性也适合彩色图像的色彩分量。

在图像恢复时,必须保证像素的预测值与嵌入时一致,也就是说嵌入数据不能影响像素的预测值,将像素分成两组,分组方案如图1所示,奇数次嵌入用图1(a)所示的分组方案,偶数次嵌入用图1(b)所示的分组方案,提取和恢复时先用分组方案(b),后用方案(a)。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,所以用上下右像素进行预测,依此类推可处理其他边界像素。

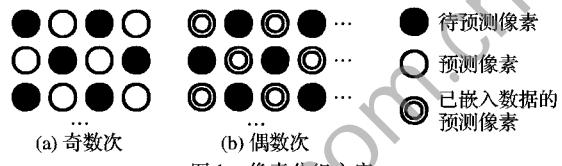


图1 像素分组方案

1.2 三分量预测误差差值

自然图像的色彩分量之间存在着密切的相关性^[14],像素的三个色彩分量对应的预测准确性应保持一致,即预测误差非常接近,预测误差的差值很小。为了验证这一结论,对 200×200 Lena 彩色图像色彩分量的预测误差及其差值进行统计并生成相应的直方图,实验中待预测像素和预测像素各占总像素的一半。图2(a)、(b)和(c)分别为R、G和B分量的预测误差直方图,峰值分别为3109、3073和3088;图2(d)为双分量预测误差差值直方图,差值-2、-1、0、1和2的频数分别为1587、4386、6460、4346和1612,对每一待预测像素,分量组合从BG、GR和RB中随机选取一种;图2(e)是三分量预测误差差值直方图,差值-2、-1、0、1和2的频数分别为1212、5211、6038、5328和1353。实验结果表明,色彩分量间预测误差的差值比单分量预测误差更小。

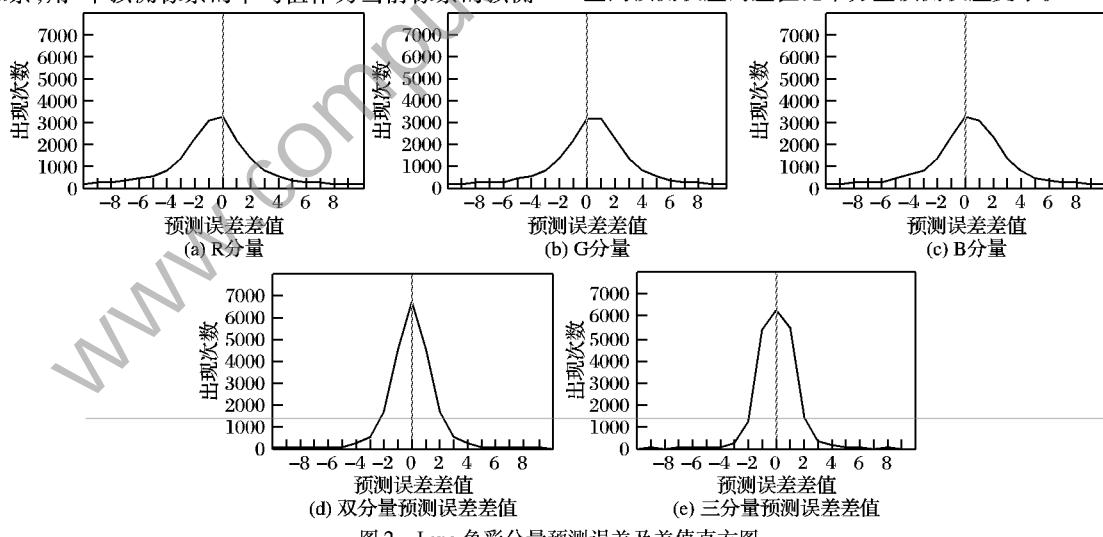


图2 Lena 色彩分量预测误差及差值直方图

三分量预测误差差值计算方法是:将RGB分量预测误差按降序排列,用 p_1, p_2, p_3 表示排序的预测误差, $p_1, p_2, p_3 \in [-255, 255]$, $p_1 \geq p_2 \geq p_3$,分量间预测误差差值 $h_1 = p_1 - p_2, h_2 = p_2 - p_3, h_1, h_2 \in [0, 255]$,三分量预测误差差值 $h = h_1 - h_2$,即:

$$h = p_1 + p_3 - 2p_2 \quad (2)$$

$h \in [-255, 255]$ 。从图2(d)和图2(e)可知,与双分量预测误差差值相比,有更多的三分量预测误差差值接近0,即

三分量预测误差差值比双分量差值更小,用这种更小的差值嵌入数据,既可提高嵌入容量,又可减小图像失真。

2 基于三分量差值扩展的可逆数据隐藏

2.1 三分量预测误差差值扩展

2.1.1 三分量差值扩展及失真控制

从式(2)可知,当 $h \geq 0$ 时,增加 p_1 的值可以使 h 增大,当 $h < 0$ 时,增加 p_1 和 p_2 的值可以使 h 的绝对值增大,增加 p_1 或同时增加 p_1 和 p_2 的值并不会改变 p_1, p_2, p_3 的排序关系。同样,

当 $h \geq 0$ 时,减小 p_2 和 p_3 的值可以使 h 增大,当 $h < 0$ 时,减小 p_3 的值可以使 h 的绝对值增大, p_1 、 p_2 、 p_3 的排序关系也不会改变。也就是说仅用增加或减小即可实现差值扩展,相应地变换为:

$$\begin{cases} p_{i1} = p_1 + \Delta h, p_{i2} = p_2, p_{i3} = p_3, & d = 0, h \geq 0 \\ p_{i1} = p_1 + \Delta h, p_{i2} = p_2 + \Delta h, p_{i3} = p_3, & d = 0, h < 0 \\ p_{i1} = p_1, p_{i2} = p_2 - \Delta h, p_{i3} = p_3 - \Delta h, & d = 1, h \geq 0 \\ p_{i1} = p_1, p_{i2} = p_2, p_{i3} = p_3 - \Delta h, & d = 1, h < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: Δh 为差值扩展量, $\Delta h \geq 0$; d 表示预测误差扩展方向, $d = 0$ 表示增加方向, $d = 1$ 表示减小方向。以 $d = 0$ 为例加以说明,当差值 $h \geq 0$ 时, p_1 增加 Δh , p_2 、 p_3 保持不变,否则当 $h < 0$ 时, p_3 不变, p_2 增加 Δh , p_1 也增加 Δh ,确保差值 h 绝对值的增量为 Δh ,这样预测误差扩展均为增加,只可能产生上溢;同理, $d = 1$ 时,预测误差扩展均为减小,只可能产生下溢。由于嵌入过程中 p_1 、 p_2 、 p_3 均沿相同的方向扩展,因此本文将其称为单向三分量预测误差差值扩展,简称三分量预测误差差值扩展(prediction error difference expansion of ternary components, TDE)。

失真控制就是根据负载大小确定数据的嵌入位置,其主要目的是当负载较小时,使用较小的差值嵌入数据,使图像质量在当前负载下达到最佳。采用文献[2]类似的直方图平移技术计算差值扩展量 Δh ,将所有差值以直方图的形式表示,根据负载大小选择合适的阈值 T ,将差值分为外部区域和内部区域。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差值的 LSB,相应地,提取端仅提取 $[-2T, 2T+1]$ 范围内差值的最低位。内部区域 $[-T, T]$ 所对应的差值将进行差值扩展并嵌入数据,而外部区域 $[-h_l, -T-1]$ 和 $[T+1, h_r]$ 的差值沿横轴向外侧平移,以避免扩展的内部区域和外部区域重叠,避免内部区域和外部区域重叠的目的是保证在提取数据时可以无损地恢复原始图像。这里 h_l 和 h_r 分别为直方图左右两端的非零端点,扩展的内部区域变为 $[-2T, 2T+1]$,外部区域应分别向左和向右平移至 $[-h_l - T, -2T - 1]$ 和 $[2T + 2, h_r + T + 1]$,因此差值扩展量为:

$$\Delta h = \begin{cases} |h+i|, & -T \leq h \leq T \\ T+1, & h > T \\ T, & h < -T \end{cases} \quad (4)$$

2.1.2 避免像素值溢出

色彩分量中像素值限制在 0 到 255 之间,因此用式(3)嵌入数据或平移后,色彩分量中的像素值也必须在此范围内。由式(4)可知,差值扩展量的最大值为 $T+1$ 。当像素值 $a < T+1$ 时,预测误差减小可能产生下溢;当 $a > 255-(T+1)$ 时,预测误差增加可能产生上溢。以 $a_u = 255-(T+1)$ 和 $a_o = T+1$ 作为上下临界值,统计三个分量中像素值大于或等于 a_o 的像素数量 S_o 以及像素值小于或等于 a_u 的像素数量 S_u 。若 $S_o \leq S_u$ 选择预测误差增加的扩展方向,否则选择减小的方向,即:

$$d = \begin{cases} 0, & S_o \leq S_u \\ 1, & S_o > S_u \end{cases} \quad (5)$$

在嵌入数据之前先对图像进行预处理,顺序扫描图像,若 $d = 0$,将色彩分量中所有大于等于 a_o 的像素值调整为 a_u ,同时将调整值 $\Delta a = a - a_o$ 记入调整信息流;若 $d = 1$,将色彩分量中所有小于等于 a_u 的像素值调整为 a_u ,将调整值 $\Delta a = a_u - a$ 记入调整信息流。调整信息将与负载一起嵌入图像,以便提取时恢复调整的像素值。提取端恢复图像时,若 $d = 0$ 而且像素值等于 a_o ,从调整信息流中读取调整值 Δa ,原始像素

值 $a = a_o + \Delta a$;若 $d = 1$ 而且像素值等于 a_u ,从调整信息流中读取调整值 Δa ,原始像素值 $a = a_u - \Delta a$ 。调整信息流中每一调整值所需的位数为:

$$b = \lceil \lg(T+2) \rceil \quad (6)$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 为上取整符号。例如 $d = 0, T = 2$,则临界值 $a_o = 255-(2+1) = 252$,每一调整值位数 $b = 2$,嵌入端预处理阶段,所有值为 255、254、253 和 252 的像素,像素值均调整为 252,调整值分别为 3、2、1 和 0,对应的调整信息分别为 11、10、01 和 00。图像恢复时若像素值为 252,则从调整信息流中读取 2 位调整信息还原调整值 Δa ,原始像素值 $a = 252 + \Delta a$ 。

经调整预处理的图像,嵌入数据或差值平移均不会产生溢出,提取端根据临界像素值的顺序定位溢出像素,并从调整信息流中读取调整信息恢复调整的像素值,因此不需要嵌入定位图。由于调整信息流的长度远小于压缩定位图的位流长度,与传统定位图方法相比,采用三分量差值扩展可大幅提高嵌入容量。

2.1.3 可行性分析

为验证三分量预测误差差值扩展嵌入方案的可行性,从西安交通大学人工智能与机器人研究所东方人脸库(AI&R)的视点子库中随机选取 1 000 幅图像,图像大小为 320×240 像素,以 $T = 2$ 为例进行对比,实验分两个部分:一是比较本文的单向调整和文献[9]的两端调整方法所需调整信息的位流长度,单向调整后像素值范围是 $[3, 255]$ 或 $[0, 252]$,对于两端调整,差值扩展量最大值 $\Delta h_m = 3$, $(\Delta h_m + 1)/2 = 2$, $\Delta h_m/2 = 1$,因此上下临界值分别为 253 和 1,调整后像素值的范围是 $[1, 253]$;实验的另一部分是比较三分量差值扩展、双分量差值扩展和单分量预测误差扩展嵌入方法的嵌入容量,实验结果如表 1 所示。

表 1 三分量差值扩展的可行性分析结果($T=2$)

项目	调整信息/b		辅助信息/b			嵌入容量/b		
	统计方案	本文方案	TDE	DDE	PEE	TDE	DDE	PEE
Max	816	7760	816	9132	7461	36582	35336	29432
Min	0	17	0	88	90	31675	22816	15357
Avg	42	1288	42	2297	2486	35185	31246	23401

表 1 中:TDE 表示三分量差值扩展嵌入方法,其辅助信息为调整信息流;DDE(Double component Difference Expansion)表示双分量差值扩展,PEE(Prediction Error Expansion)表示单分量预测误差扩展,DDE 的分量组合以及 PEE 的嵌入分量随机选取,辅助信息包括压缩定位图和不可扩展差值的 LSB 位流,定位图采用算术编码压缩。三种嵌入方法均采用单次嵌入,用图 1(a)所示的分组方案对像素进行分组,待预测像素占总像素的一半(即 38 400)。实验结果表明:1)本文的溢出处理采用自适应单向调整方法,需嵌入的调整信息位流长度远小于文献[9]的两端调整方法;2)双分量预测误差差值扩展嵌入法与单分量预测误差扩展的辅助信息量接近,但嵌入容量却有明显提高,说明利用预测误差差值嵌入数据具有明显的优势;3)与双分量差值扩展嵌入法相比,三分量差值扩展方法在减小差值的同时,选择溢出像素较少的方向扩展预测误差,并用极少量的调整信息代替定位图,单次嵌入容量平均提高 3 939 位,因此三分量差值扩展嵌入方案是可行的。

2.2 数据嵌入过程

用图 1 所示的分组方案对像素进行分组,奇数次嵌入用分组方案(a),偶数次嵌入用分组方案(b)。待嵌入数据采用混沌加密(密钥为 eKey),以增加隐藏数据的安全性,具体嵌入过程如下。

1) 初始化。嵌入次数 $pass = 0$, 可嵌入差值计数器 $EN = 0$, 调整像素计数器 $S_o = 0, S_u = 0$, 用给定的阈值计算上下临界值 $a_o = 255 - (T + 1), a_u = T + 1$, 用式(6)计算每一调整值所需的位数 b 。

2) 确定调整方向。顺序扫描图像, 对任一待预测像素, 读取三个分量的像素值 a_1, a_2 和 a_3 , 若 $a_n \geq a_o$, 计数器 S_o 加 1, 这里 n 为色彩分量编号, $n \in [1, 3]$; 同样, 若 $a_n \leq a_u$, 计数器 S_u 加 1。根据 S_o 和 S_u 的大小, 用式(5)计算扩展方向 d 。若 $d = 0$, 调整像素的数量 $S = S_o$, 否则若 $d = 1, S = S_u$ 。

3) 图像预处理。重新扫描图像, 对任一像素, 读取各分量的像素值 a_1, a_2 和 a_3 , 根据扩展方向调整可能产生溢出的像素值, 并将调整的像素值写入图像。

a) 方向标志 $d = 0$ 。若 $a_n \geq a_o$, 像素调整值 $\Delta a = a_n - a_o$, 将 Δa 转为 b 位二进制数并写入调整信息流, 同时将像素值 a_n 调整为 a_o 。

b) 方向标志 $d = 1$ 。若 $a_n \leq a_u$, 像素调整值 $\Delta a = a_u - a_n$, 将 Δa 转为 b 位二进制数并写入调整信息流, 同时将像素值 a_n 调整为 a_u 。

4) 构造辅助信息。辅助信息包括文件头和调整信息流。其中文件头的第一个字节为标志字节, 接下来的 1 个字节为方向标志, 紧跟其后的部分是调整像素的数量(2 B)以及负载长度(4 B), 文件头共 8 B, 位流长度 64, 辅助信息位流长度 $LA = S \times b + 64$ 。辅助信息是数据提取和图像恢复所必需的信息, 将与负载一起嵌入载体图像。

5) 计算有效负载 pl 。再次扫描图像, 对任一待预测像素, 计算三个分量的预测误差并按从大到小排序, 记为 p_1, p_2 和 p_3 , 用式(2)计算三分量预测误差差值 h , 若 $h \in [-T, T]$, 可嵌入差值计数器 EN 加 1。有效负载能力 $pl = EN - LA$ 。若实际负载长度 PL 大于或等于负载能力 pl , $PL = PL - pl$, pl 存入文件头, 否则, 将实际需要嵌入的负载长度 PL 存入文件头并将 PL 置 0。

6) 生成待嵌入数据。用混合光学双稳模型作为混沌源, 以密钥 $eKey$ 作为初值, 迭代 pl 次生成混沌序列。将负载和辅助信息合并, 并用所得位流与混沌序列逐位异或, 生成待嵌入数据。

7) 嵌入数据。再次扫描图像, 计算三个分量的预测误差并排序, 记为 p_1, p_2 和 p_3 , 用式(2)计算预测误差差值 h , 若 $h \in [-T, T]$, 从嵌入数据流中取 1 位数据信息 i , 用式(4)计算差值扩展量 Δh , 将差值 h 、差值扩展量 Δh 、方向 d 和 p_1, p_2, p_3 代入式(3), 依据所得预测误差 p_{11}, p_{21}, p_{31} , 用式(7)计算相应的像素值 a_{11}, a_{21}, a_{31} 并写入对应分量中实现数据嵌入或差值平移。

$$a_n = \bar{a}_n + p_n \quad (7)$$

8) 若数据已全部嵌入, 则结束循环; 否则, $pass = pass + 1$, 可嵌入差值计数器 $EN = 0$, 调整像素计数器 $S_o = 0, S_u = 0$, 进入第 2) 步。

2.3 数据提取和图像恢复

数据提取和图像恢复不需要原始图像, 提取端需要三个参数: 阈值 T 、嵌入密钥 $eKey$ 和嵌入次数 N , 参数由嵌入端提供。信息解密所需的混沌序列由密钥决定, 因此不知道密钥就无法提取数据, 如果隐藏数据被正确提取, 可根据需要恢复原始图像, 具体的提取和恢复过程如下。

1) 初始化。将含密图像复制到内存, $pass = N$, 用混合光学双稳模型作为混沌源, 以密钥 $eKey$ 作为初值, 迭代 $(W/2) \times H$ 次生成混沌序列, 这里 W, H 为图像的宽度和高度。

2) 数据检测。在提取数据之前先进行检测, 判断待测图像中是否嵌入数据。顺序扫描图像, 计算预测误差并排序, 用所得 p_{11}, p_{21}, p_{31} 和式(2)计算差值 h_i , 提取 $[-2T, 2T+1]$ 范围内差值的 LSB, 用提取的前 8 位数据组成标志字节并解密, 如果标志字节与嵌入时相同, 表明图像中确有隐藏数据, 进入下一步提取数据; 若无标志信息, 说明没有嵌入数据, 直接结束。

3) 提取数据。顺序扫描图像, 计算预测误差并排序, 用所得 p_{11}, p_{21}, p_{31} 计算差值 h_i , 逐一提取 $[-2T, 2T+1]$ 范围内差值的 LSB, 将所得位流与混沌序列异或, 从解密的信息流中分离出头文件、调整信息流和负载, 从头文件中读取调整方向 d 。

4) 恢复图像。顺序扫描图像, 对任一像素, 计算三个分量的预测误差并排序, 用所得 p_{11}, p_{21}, p_{31} 计算差值 h_i , 若 $h_i \in [-2T, 2T+1]$, 则 $i = lsb(h_i)$, $h = (h_i - i)/2$, 若 $h_i > 2T+1$, 则 $h = h_i - (T+1)$, 若 $h_i < -2T$, 则 $h = h_i + T$ 。差值扩展量 Δh 由式(4)计算, 并用下式恢复预测误差:

$$\begin{cases} p_1 = p_{11} - \Delta h, p_2 = p_{21}, p_3 = p_{31}, & d = 0, h \geq 0 \\ p_1 = p_{11} - \Delta h, p_2 = p_{21} - \Delta h, p_3 = p_{31}, & d = 0, h < 0 \\ p_1 = p_{11}, p_2 = p_{21} + \Delta h, p_3 = p_{31} + \Delta h, & d = 1, h \geq 0 \\ p_1 = p_{11}, p_2 = p_{21}, p_3 = p_{31} + \Delta h, & d = 1, h < 0 \end{cases} \quad (8)$$

用所得 p_1, p_2, p_3 和式(7)计算相应的像素值 a_1, a_2 和 a_3 。

5) 恢复调整像素值。顺序扫描图像, 对任一待预测像素, 读取三个分量的像素值 a_1, a_2 和 a_3 , 若像素值 a_n 等于扩展方向对应的临界值, 需要用调整信息恢复原始像素值。

a) 方向标志 $d = 0$ 。若 $a_n = a_o$, 从调整信息流中读取 b 位调整信息, 还原像素调整值 Δa , 原始像素值 $a_n = a_o + \Delta a$ 。

b) 方向标志 $d = 1$ 。若 $a_n = a_u$, 用调整信息还原像素调整值 Δa , 原始像素值 $a_n = a_u - \Delta a$ 。

6) $pass = pass - 1$, 若 $pass < 0$, 说明数据提取完毕, 结束循环, 此时可根据需要将内存中的数据写入图像, 从而恢复原始图像; 否则若 $pass \geq 0$, 进入第 3) 步继续提取数据。

3 实验结果及分析

采用 C++ Builder6 开发平台进行仿真实验, 图 3 是选取的几幅典型的 200×200 彩色图像, 其中第 3 幅和第 4 幅分别为西安交通大学人工智能与机器人研究所东方人脸库(AI&R)的视点子库中的侧面彩色图像 V_0146_05 和正面图像 V_0146_10。用三分量预测误差差值扩展方法嵌入隐藏数据($T = 2$, 嵌入 2 次), 能保持较高的嵌入率(大于等于 0.90 bpp)和图像质量($PSNR \geq 47.70$ dB), 如图 4 所示。

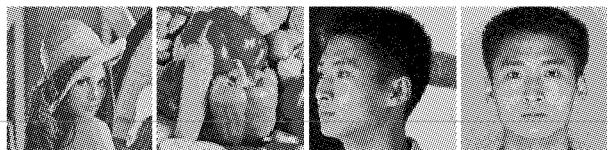


图 3 原始图像

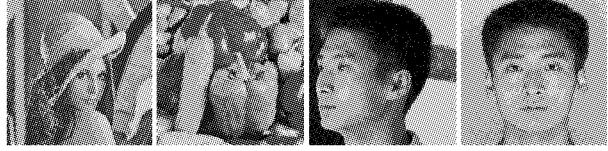


图 4 嵌入数据的图像($T=2$)

表 2 列出了本文算法与单分量预测误差扩展方法的嵌入率和峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)对比实验结果($T=2$, 嵌入 2 次), 为了在同等条件下对比, 单分量预测误差扩展方法对每一像素从 RGB 分量中随机选取某一分量嵌入数据。表 2 中, 本文算法简称 TDE, 单分量预测误差扩展

简称 PEE。实验结果表明:文中采用的三分量差值扩展充分利用自然图像色彩分量之间的相关性减小差值,嵌入率有很大的提高,在嵌入率接近或超过两倍的情况下,图像质量仍高于单分量预测误差扩展,说明利用色彩分量间预测误差差值嵌入数据具有明显的优势。

表 3 列出了三分量差值扩展方法与双分量差值扩展嵌入方法在不同阈值下的嵌入率和 PSNR 值对比结果,实验对象为 200×200 Peppers 彩色图像,嵌入 2 次,其中 DDE 为文献 [10] 的方法。实验结果表明:1) 阈值 T 对容量和失真的控制效果明显;2) 本文算法自适应地选择像素值的扩展方向,减少了可能产生溢出的像素数量,并用少量调整信息代替定位图,因此嵌入容量有很大的提高;3) 虽然两种嵌入方法的差值扩展量相同,但双分量差值扩展方法将差值扩展量分散到两个色彩分量中,而三分量差值扩展方法的差值扩展量迭加到一个或两个分量,因此 PSNR 值有所下降,相比容量的提高,这种代价是值得的,以 $T=4$ 为例,嵌入容量提高 6107 位,RGB 分量的 PSNR 分别下降 2.33、2.32 和 2.75,但 PSNR 仍大于等于 47 dB。

表 4 列出了本文算法与双分量差值扩展方法在相同阈值的嵌入容量和 PSNR 值对比结果($T=2$,单次嵌入),实验结果

表明,溢出像素的数量越大,三分量差值扩展方法的优势越明显,尤其是第 3 幅图像黑色很多,可能产生下溢的像素较多,本文算法自适应地选择增加方向扩展像素值,避免处理较多的下溢像素,单次嵌入容量增加达 5837 位。

表 2 嵌入率和 PSNR 对比结果($T=2$)

图像	嵌入率/bpp		R-PSNR/dB		G-PSNR/dB		B-PSNR/dB	
	TDE	PEE	TDE	PEE	TDE	PEE	TDE	PEE
Lena	0.958	0.557	47.88	46.77	47.69	46.82	48.01	46.84
Peppers	0.892	0.437	48.44	46.77	48.49	46.87	48.76	46.93
V_0146_05	0.914	0.340	49.39	47.07	49.75	46.97	48.75	47.15
V_0146_10	0.896	0.454	48.82	46.68	49.25	46.71	48.34	46.77

表 3 不同阈值下嵌入率和 PSNR 值对比实验

T	嵌入率/bpp		R-PSNR/dB		G-PSNR/dB		B-PSNR/dB	
	TDE	DDE	TDE	DDE	TDE	DDE	TDE	DDE
0	0.267	0.198	55.93	56.30	56.12	56.11	55.77	56.26
1	0.733	0.542	50.35	52.83	50.44	52.85	50.78	52.96
2	0.892	0.714	48.44	51.18	48.49	51.03	48.76	51.31
3	0.945	0.785	47.58	50.16	47.59	50.10	47.74	50.41
4	0.970	0.817	47.26	49.39	47.15	49.47	47.15	49.90

表 4 相同阈值下嵌入容量和 PSNR 对比结果($T=2$)

图像	溢出差值数		嵌入容量/b		R-PSNR/dB		G-PSNR/dB		B-PSNR/dB	
	TDE	DDE	TDE	DDE	TDE	DDE	TDE	DDE	TDE	DDE
Lena	0	6	19 046	18 130	50.78	54.69	50.39	54.70	51.07	55.01
Peppers	0	253	17 505	14 000	51.32	53.99	51.27	53.87	51.63	54.19
V_0146_05	9	684	18 348	12 511	52.78	55.05	53.22	55.12	51.47	54.94
V_0146_10	5	157	18 020	15 377	51.99	54.36	52.66	54.63	51.14	54.17

4 结语

针对文献[1]算法存在过分修改像素值、须嵌入定位图、不适合彩图像等缺点,提出一种基于三分量差值扩展的彩色图像可逆数据隐藏算法。该算法利用色彩分量之间的相关性减小差值扩展量,从而减少了对图像的修改,提高了含密图像质量。采用单向差值扩展方法嵌入数据,选择溢出像素较少的方向扩展像素值,并用少量调整信息代替定位图,嵌入容量有很大的提高。信息加密所用混沌序列由密钥决定,隐藏数据相对安全,信息检测简单、高效,避免在不含隐藏数据的图像中提取信息。信息提取不需要原始图像,提取端提取数据的同时可无损地恢复原始图像。实验结果表明,该算法在嵌入容量和图像质量方面都具有较大的优势。算法不足之处在于,对增加方向的负数差值或减小方向的正数差值,需要修改两个分量的像素值,对图像质量有一定的影响。

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] HU Y J, LEE H K, LI J W. DE-based reversible data hiding with improved overflow location map [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2009, 19(2): 250–260.
- [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] CHRYSOCHOS E, VARSAKI E E, FOTOPoulos V, et al. High capacity reversible data hiding using overlapping difference expansion [C]// Proceedings of the 10th Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services. London: [s. n.], 2009: 121–124.
- [6] WENG S W, ZHAO Y, NI R R, et al. Parity invariability based reversible watermarking [J]. Electronics Letters, 2009, 45(20): 1022–1023.
- [7] MA KUN, NIU XIN-XIN. An improved reversible watermarking scheme [C]// International Conference on Signal Processing. Beijing: [s. n.], 2008: 2229–2232.
- [8] LI ZHUO, CHEN XIAO-PING, PAN XUE-ZENG, et al. Lossless data hiding scheme based on adjacent pixel difference [C]// Proceedings of the 8th International Conference on Computer Engineering and Technology. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 588–592.
- [9] CONOTTER V, BOATO G, CARLI M, et al. High capacity reversible data hiding based on histogram shifting and non-local means [C]// International Workshop on Local and Non-Local Approximation in Image Processing. Tuusula: [s. n.], 2009: 130–136.
- [10] 熊志勇,蒋天发.基于预测误差差值扩展的彩色图像无损数据隐藏[J].计算机应用,2010,30(1):186–189.
- [11] 熊志勇,王江晴.基于分段差值扩展的彩色图像可逆数据隐藏[J].计算机应用,2010,30(5):1212–1216.
- [12] 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.
- [13] SACHNEV V, KIM H J, NAM J, et al. Reversible watermarking algorithm using sorting and prediction [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2009, 19(7): 989–999.
- [14] 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.