

## 基于差值位置图调整的信息隐藏优化算法

项洪印, 侯思祖

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071000)

**摘 要:** 位置图压缩是空间域水印嵌入算法中的关键问题。为此, 以提高嵌入容量为目标, 提出一种基于差值位置图调整的差分扩展优化算法。考虑可扩展差值的位置分布, 通过修改短连续零组提高无损压缩率, 从而扩大水印净荷嵌入空间, 减少嵌入总量, 提高峰值信噪比。仿真实验结果表明, 该算法可通过选择最佳或优选调整强度增强差分扩展算法的水印嵌入性能, 水印净荷嵌入容量可提升 2.48 倍~5.26 倍, 峰值信噪比可提升 4.4 dB~8 dB。

**关键词:** 位置图; 差分扩展; 调整强度; 水印嵌入; 信息隐藏

**中文引用格式:** 项洪印, 侯思祖. 基于差值位置图调整的信息隐藏优化算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(3): 249-253.

**英文引用格式:** Xiang Hongyin, Hou Sizu. Information Hiding Optimization Algorithm Based on Difference Location Map Adjustment[J]. Computer Engineering, 2016, 42(3): 249-253.

## Information Hiding Optimization Algorithm Based on Difference Location Map Adjustment

XIANG Hongyin, HOU Sizu

(Institute of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071000, China)

**【Abstract】** Location Map(LM) compression is the key issue of spatial domain watermark embedding. Aiming at this issue, a Difference Expansion(DE) optimization algorithm is proposed based on difference LM adjustment. Considering location distribution of extensible difference, some small continuous zero sets are all modified to acquire a lot of pure watermark payload space. Thus, difference LM is compressed more efficiently by some lossless compressors. At the same time, the quantities of embedded points are reduced and the Peak Signal to Noise Ratio(PSNR) is improved. Simulation results show that the proposed algorithm can significantly enhance the embedding performance of DE algorithm by an optimal or a preferred threshold for adjustment strength parameter. In this way, embedding Bits per Pixel(BPP) for pure payload is improved by 2.48 times to 5.26 times. Moreover, PSNR increases 4.4 dB to 8 dB.

**【Key words】** Location Map(LM); Difference Expansion(DE); adjustment strength; watermark embedding; information hiding

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.03.045

### 1 概述

可逆水印技术的研究起源于美国的 2 项发明专利: 文献[1]提出了数字产品的数据认证方法; 文献[2]提出了同时无失真提取水印和恢复原始载体的方法。当然, 此时可嵌入的水印容量非常有限, 从功能上看, 更侧重实现简单的归属认证。截至目前, 根据水印嵌入空间的不同, 可逆水印可分为空间域水印<sup>[3-9]</sup>和变换域水印<sup>[10-14]</sup>。总体来看, 空间域水印主要利用像素间的实际差值或者虚拟差值, 综合直

方图平移、预测和排序等技术手段实现, 具有算法简单、计算复杂度低、嵌入容量和保真性高的优点。变换域水印则利用离散余弦变换或者离散整数小波变换, 具有可视质量高、抗攻击能力强等突出性能。本文主要关注嵌入容量的提升, 重点研究空间域嵌入算法。文献[3]基于压缩最低有效位提升了嵌入水印容量。文献[4]通过扫描图像的像素对, 对其差值进行扩展, 大幅提升了嵌入容量, 该文献提出的算法具有重要的里程碑式的意义, 成为后续各种方法的研究基础。文献[5]将文献[4]的像素对差分扩展

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61302106); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2014MS105, 13MS66); 河北省自然科学基金青年基金资助项目(E2013502267)。

**作者简介:** 项洪印(1979-), 男, 讲师、博士研究生, 主研方向为图像处理、信息安全; 侯思祖, 教授。

**收稿日期:** 2015-07-07 **修回日期:** 2015-08-05 **E-mail:** leo\_xianghy@126.com

到了像素矢量差值,提升了嵌入比特率,并分析了三像素矢量和四像素矢量的嵌入方法。文献[6]将差值拓展到了相邻两像素中。文献[7]通过预测可扩展位置有效压缩了位置图(Location Map, LM)长度。文献[8]则将差分扩展(Difference Expansion, DE)、直方图平移和预测技术相结合,在嵌入容量和可视质量两方面都有了很大提升。文献[9]算法结合了分块和差值扩展,文献[10]提出了一种自适应融合的小波域水印方法,文献[15]则使用了差值直方图的方法使嵌入容量得到进一步提升。不难看出,文献[4]提出的基于差分扩展的算法是重要基础,其中对嵌入容量提升的瓶颈是对位置图的压缩,压缩率越高,嵌入容量越大,反之则越小,这也是基于空间域水印嵌入算法面临的公共问题。为此,本文提出基于位置图调整的差分扩展优化算法(Difference Expansion Based on Location Map Adjustment, LMA-DE),以期提升嵌入容量,改善图像质量。

## 2 差分扩展模型

本文进行如下假设:

**假设 1** 默认处理灰度图像,对于彩色图像可对应 RGB 相应成分进行分组嵌入。

**假设 2** 省略对水印信息的预处理环节,如置乱和加密。

**假设 3** 水印信息采用二值图像。

差分扩展算法主要思想是按照一定方式扫描图像,获取灰度值<sup>[4]</sup>。不妨假设相邻像素对为 $p(x, y)$ ,其中, $x$ 和 $y$ 分别表示相邻像素对应的灰度值, $x, y \in \mathbb{Z}$ 且 $0 \leq x, y \leq 255$ 。

水印嵌入过程如下:

**步骤 1** 逐行(列)扫描图像,获取相邻像素对灰度值,得到满足式(1)的均值  $Mean$  和差值  $Diff$ 。

$$\begin{cases} Mean = \left\lfloor \frac{x+y}{2} \right\rfloor \\ Diff = x - y \end{cases} \quad (1)$$

**步骤 2** 分析差值的防溢出条件,进行差值分类,要求可扩展的差值  $Diff$  同时满足式(2)。

$$|Diff| \leq \min((2(255 - Mean)), (2Mean + 1)) \quad (2)$$

扩展后的差值  $Diff_e$  满足式(3)。

$$\begin{cases} Diff_e = 2Diff + w \\ |Diff_e| \leq \min((2(255 - Mean)), (2Mean + 1)) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $w$ 为二进制数,表示要嵌入的水印信息位, $w \in \mathbb{Z}, w \in \{0, 1\}$ 。

**步骤 3** 为获得更好的可视质量,合理设置差值阈值  $T_d$ ,只扩展  $|Diff| \leq T_d$  的差值。

水印提取是在嵌入位置图的基础上,提取相应像素对差值的最低有效位,如式(4)所示。

$$\begin{cases} x_r = Mean + \left\lfloor \frac{Diff_e + 1}{2} \right\rfloor \\ y_r = Mean - \left\lfloor \frac{Diff_e}{2} \right\rfloor \end{cases} \quad (4)$$

其中, $x_r$ 和 $y_r$ 分别为恢复后相应的像素对灰度值,如果满足 $x_r = x, y_r = y$ ,则可以无损恢复原始载体图像。

## 3 位置图及其调整方法

### 3.1 差值位置图

设载体图像的像素点灰度值矩阵为:

$$G_{IO} = [g_{(i,j)}]_{m \times n} \quad (5)$$

其中, $g$ 表示灰度值; $(i, j)$ 表示像素位置; $0 \leq g_{(i,j)} \leq 255$ ;  $m$ 和 $n$ 分别为灰度值矩阵的行数和列数。则差值位置图矩阵为:

$$D = [d_{(i,j)}]_{m_d \times n_d} = [d_{(i,j)}]_{m \times \frac{n}{2}} \quad (6)$$

其中, $d_{(i,j)}$ 表示像素对 $(p(i, 2j-1), p(i, 2j))$ ,  $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq \frac{n}{2}$ 的差值类型,因此, $d_{(i,j)} \in \mathbb{Z}$ 且 $d_{(i,j)} \in \{0, 1\}$ 。本文定义 $d_{(i,j)} = 0$ 表示可扩展的差值,二值图中显示为黑色点; $d_{(i,j)} = 1$ 表示不可扩展的差值,二值图中显示为白色点。此处, $m_d = m, n_d = \frac{n}{2}$ ,这说明位置图尺寸为载体图像灰度值矩阵的一半。因为位置图要作为辅助信息用于水印信息定位,所以为增加水印嵌入容量,一般会先对位置图采用无损压缩,如 RLE 游程压缩或 JBIG2 压缩<sup>[4]</sup>。载体图像及其差值位置图示例如图 1 所示。

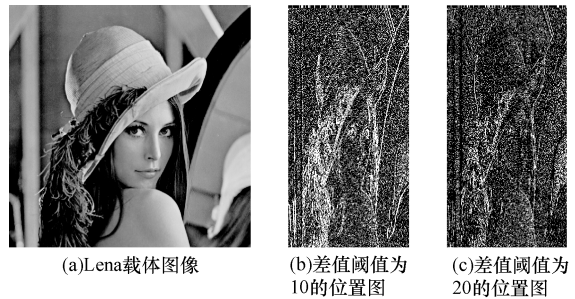


图 1 载体图像及其差值位置图

### 3.2 零组

**定义 1** 将连续  $n (n \geq 1)$  个可扩展差值标志“0”记为一个零组。

当  $n = 1$  时,记为单零组  $SS = \{z_{ss}\}, z_{ss} \in \mathbb{Z}$ , 且  $z_{ss} = 0$ ;

当  $n = 2$  时,记为双连零组  $DS = \{z_{ss_1}, z_{ss_2}\}, z_{ss_1}, z_{ss_2} \in \mathbb{Z}$ , 且  $z_{ss_1} = z_{ss_2} = 0$ ;

当  $n = 3$  时,记为三连零组  $TS = \{z_{ss_1}, z_{ss_2}, z_{ss_3}\}$ ,

$z_{ss_1}, z_{ss_2}, z_{ss_3} \in \mathbb{Z}$ , 且  $z_{ss_1} = z_{ss_2} = z_{ss_3} = 0$ 。

**定义 2** 位置图中同类型零组数量占零组总数的百分比,称为零组比(Zero Set Ratio, ZSR)。

**定义 3** 位置图中同类型零组中零的数量占零的总数的百分比,称为零比(Zero Ratio, ZR)。

表 1 显示,当  $T_d = 5$  时,单零组比  $ZSR_{SS}$  达到了

47.75%,接近半数;当  $T_d = 10$  时,  $ZSR_{SS}$  达到了 31.95%,占 1/3;当  $T_d$  进一步增加到  $T_d = 15$  和  $T_d = 20$  时,  $ZSR_{SS}$  也分别达到了 26.94% 和 24.46%,占 1/4 左右。当  $T_d = 5$  和  $T_d = 10$  时,双连零组比  $ZSR_{DS}$  分别达到了 23.20% 和 20.39%,都占 1/5;当  $T_d = 15$  和  $T_d = 20$  时,  $ZSR_{DS}$  也分别达到了 18.61% 和 17.50%。

表 1 位置图中的零组及其零分布

$T_d$	SS	$ZSR_{SS}/\%$	$ZR_{SS}/\%$	DS	$ZSR_{DS}/\%$	$ZR_{DS}/\%$	TS	$ZSR_{TS}/\%$	$ZR_{TS}$
5	13 817	47.75	21.41	6 714	23.20	20.81	3 595	12.42	10 785
10	8 292	31.95	9.40	5 291	20.39	11.99	3 568	13.75	10 704
15	6 381	26.94	6.59	4 408	18.61	9.10	3 142	13.26	9 426
20	5 429	24.46	5.38	3 883	17.50	7.70	2 896	13.50	8 688

位置图中可扩展的差值 0 和不可扩展的差值 1 数量因具体图像而不同,相同点是分布不均匀且不连续的零数量大,这正是不能大幅提升压缩率的关键原因。

### 3.3 位置图调整

位置图调整是指对位置图中的元素按照某种策略进行修改,使之更有利于增加压缩率,从而提高嵌入容量比特率(即每像素所占比特数(Bits per Pixel, BPP)) 和峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)。

调整方法为零组置 1 操作,如式(7)所示。

$$ZS_a = f_{so}(ZS_i) = \{z_i\}, 1 \leq i \leq m \times \frac{n}{2}, z_i = 1 \quad (7)$$

显然:

$$ZS_a = \begin{cases} f_{so}(SS) = \{1\} & i = 1 \\ f_{so}(DS) = \{1, 1\} & i = 2 \\ f_{so}(TS) = \{1, 1, 1\} & i = 3 \\ f_{so}(ZS_i) & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

**定义 4** 调整位置图零组的长度,称为调整强度,记为  $\lambda_a$ ,其意义为若  $\lambda_a = n, n \in \mathbb{Z}$  且  $n \geq 1$ ,则将  $l(1 \leq l \leq n)$  零组全部置 1。

## 4 仿真实验与结果分析

采用 Matlab R2013a 平台对  $512 \times 512$  像素的标准灰度图像 Lena. bmp 和 Peppers. bmp 进行测试,得到如图 2 和图 3 所示的位置图(调整强度为 3),并进行了 3 组满负荷嵌入实验。

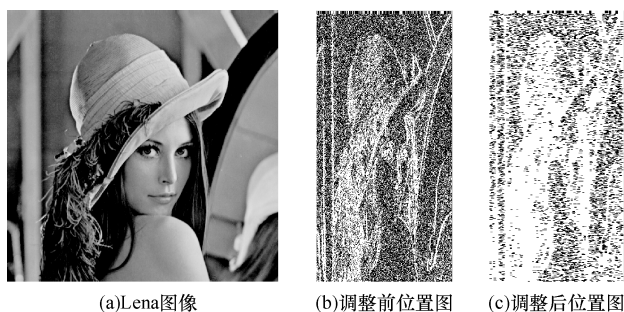


图 2 Lena 图像差值位置图调整前后对比

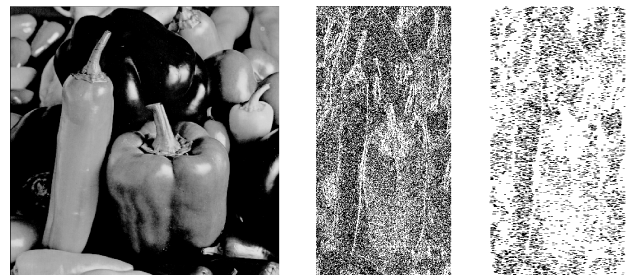


图 3 Peppers 图像差值位置图调整前后对比

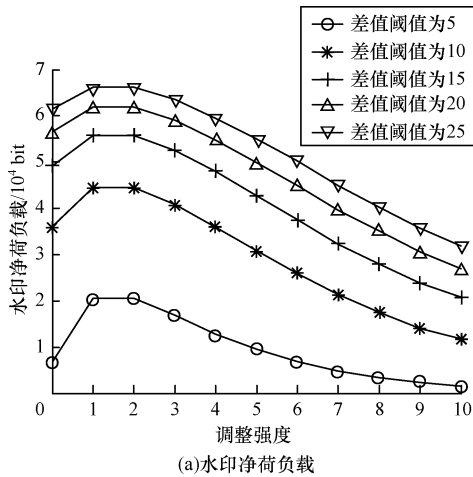
图 2 通过二值图像显示了 Lena 图像位置图零组反转前后的视觉变化,其中黑点为零组信息,白色区域为非零组信息。图 2(b) 显示位置图零组反转前可扩展差值非常分散,黑色区域和白色区域混杂,能清楚地看到图片中相应物体的轮廓,这是因为在轮廓交界处会出现灰度变化,差值比较明显。翻转后的图 2(c) 显示出明显的长零组效应,黑色和白色区域出现蔓延性浸染,物体轮廓模糊化,甚至出现大片白色区域或黑色区域,这是由于舍弃了部分可嵌入水印点造成的。图 3 显示的 Peppers 图像也有类似结果,但调整后的零值集中度明显更高。

表 2 列出了 Lena 图像和 Peppers 图像在短零组反转前后的水印净荷容量和峰值信噪比的变化。为使对比效果更明显,用加粗部分表示调整后的数据指标。从数据看, Lena 图像在差值阈值较小,即  $T_d = 5$  时,调整后的水印净荷容量提升了  $16\ 812 - 6\ 773 = 10\ 039$  bit,接近原值的 2.48 倍,相应的 PSNR 值提升了  $54.57 - 47.19 = 7.38$  dB。当  $T_d = 10$  时,水印净荷容量提升了  $41\ 046 - 36\ 322 = 4\ 724$  bit, PSNR 值提升了  $49.19 - 44.34 = 4.85$  dB。可见,  $T_d$  越大,短零组反转对性能的提升程度越小。做类似分析可以看出 Peppers 图像也具有同样特点。与 Lena 相比, Peppers 提升效果更为明显,当  $T_d = 5$  时,嵌入容量提升了  $14\ 107 - 2\ 680 = 11\ 427$  bit, PSNR 值提高  $54.78 - 46.78 = 8$  dB。

表2 Lena 和 Peppers 实验数据对比

图像	$T_d$	$\lambda_a$	水印净荷容量/bit	PSNR/dB
Lena	5	0	6 773	47.19
	5	3	16 812	54.57
	10	0	36 210	44.34
	10	3	40 911	49.19
Peppers	5	0	2 680	46.78
	5	3	14 107	54.78
	10	0	41 175	44.01
	10	3	45 403	48.41

实验1 保持差值阈值  $T_d$  不变,验证调整强度



$\lambda_a$  对水印净荷嵌入容量和峰值信噪比 (PSNR) 的改善。

图4(a)表明,差值位置图调整会对水印净荷嵌入容量产生影响,是具有峰值的波动函数。当  $\lambda_a$  较小时,可显著提升水印净荷嵌入比特率,对应  $\lambda_a = 1, 2$ ; 而随着  $\lambda_a$  增大,水印净荷出现了缓慢下降,与  $\lambda_a \geq 3$ , 甚至当  $\lambda_a \geq 4$  时,调整后的性能还不如调整前好。图4(b)表明,差值位置图调整影响 PSNR,且随着  $\lambda_a$  增大,PSNR 呈单向递增变化,且变化率不断增大。当  $\lambda_a = 2$  和  $\lambda_a = 3$  时,嵌入容量都达到最大值,而后的 PSNR 值较高,因此,  $\lambda_a = 3$  为最佳调整强度。

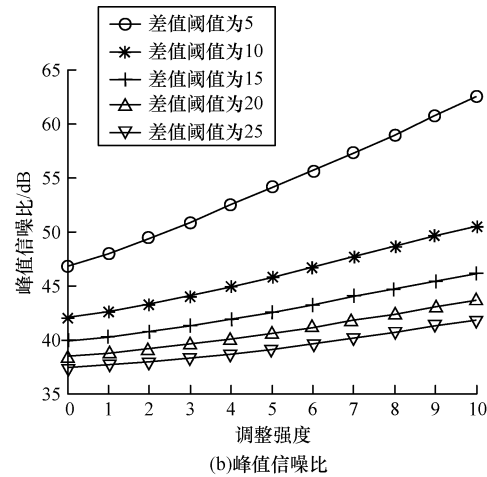


图4 差值阈值保持不变时调整强度对水印性能的提升

实验2 保持调整强度  $\lambda_a$  不变,验证不同差值阈值  $T_d$  下,调整强度  $\lambda_a$  对水印净荷嵌入容量和峰值信噪比 (PSNR) 的改善。

图5(a)表明,水印净荷性能随着  $T_d$  单向递增,且变化率逐渐减小。当调整强度较小  $\lambda_a \in \{1, 2, 3\}$

时,净荷容量是明显提升。当  $\lambda_a = 1, 2$  时,容量最大;当  $\lambda_a > 2$  时,则出现容量回落。图5(b)表明,PSNR 性能随着  $T_d$  单向递减,且变化率逐渐减小。 $\lambda_a$  越大,PSNR 值也越高,在低差值阈值阶段表现得更为明显。

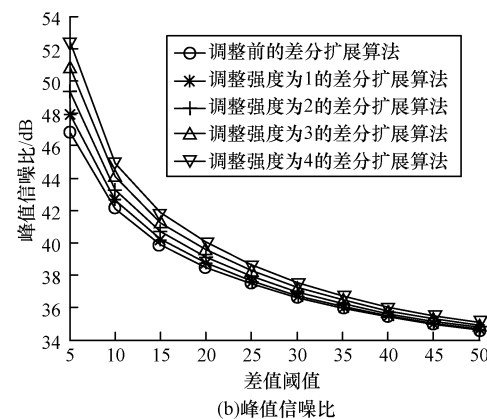
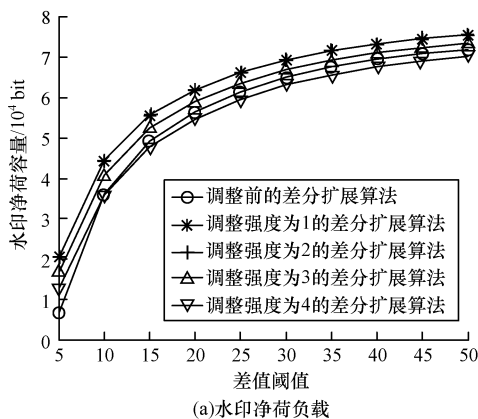


图5 调整强度保持不变时差值阈值对水印性能的提升

实验3 与传统差分扩展算法综合性能对比,验证对其性能的优化。

图6的性能对比是在差值阈值  $T_d = \{5, 10, 15,$

$20, 25, 30, 35, 40, 45, 50\}$  下得到的。其中, Lena 图像和 Peppers 图像具有相似的作用规律:  $T_d$  越小,短零组反转产生的性能增益越明显;  $T_d$  越大,调整增益越小,

超过增益和损耗的平衡点后,负增益效果将显现。对于特定的  $T_d$ ,调整强度  $\lambda_a$  不是越大越好,否则将会越过峰值点,性能降低,因此, $\lambda_a$  是有最优值或者优选值

的。不同的图像产生的调整增益程度是不一样的,但其趋势是一致的。相同调整强度对 Peppers 带来的容量增益明显大于 Lena,PSNR 增益也略大。

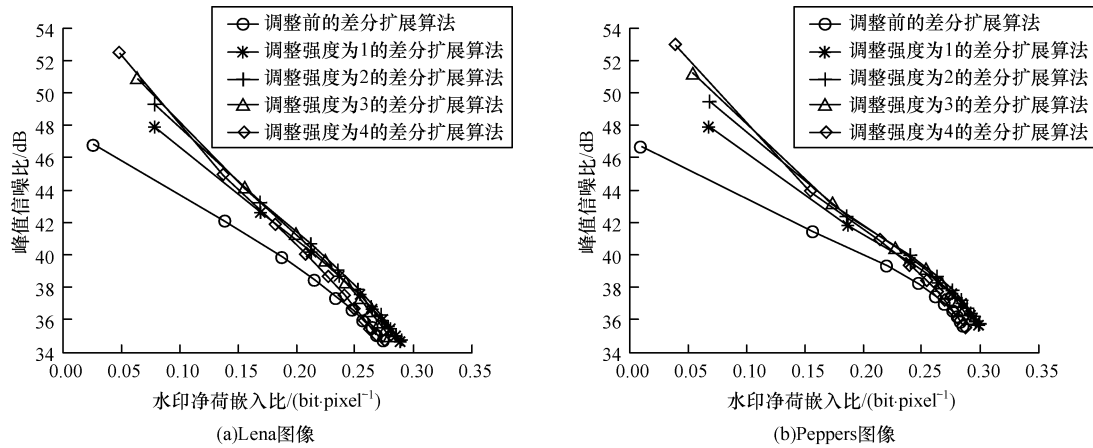


图 6 位置图调整算法的峰值信噪比对比

可见,位置图调整对差分扩展算法的性能是有明显改善的,调整部分短连续零组,既可以提升水印净荷嵌入比特率,又可以提升 PSNR 值;差值阈值  $T_d$  不同,最佳调整强度  $\lambda_a$  也不同,但一般不宜太大, $\lambda_a = 2$  或  $\lambda_a = 3$  为优选值;当  $T_d$  较小时,调整性能比较明显,因为此时的短连续零组个数比较多。

## 5 结束语

本文研究了位置图的 0/1 分布特点,明确了影响位置图压缩的关键原因是大量分散的可扩展差值存在,并针对该问题,提出了 LMA-DE 可逆水印嵌入算法,通过修改短连续零组,获得了更多的水印净荷嵌入空间,同时提升了嵌入水印图像的峰值信噪比。仿真算例证明该算法对差分扩展算法性能提升非常明显。但事实上,位置图是空间域算法中的公共问题,因此,对其他同类算法也具有类似的提升作用,这将作为下一步的研究方向。

### 参考文献

- [1] Barton J M. Method and Apparatus for Embedding Authentication Information Within Digital Data; USA, 5646997 [P]. 1997-08-07.
- [2] Honsinger C W, Jones P W, Rabbani M, et al. Lossless Recovery of an Original Image Containing Embedded Data; USA, 6278791 [P]. 2001-08-21.
- [3] Fridrich J, Goljan M. Lossless Data Embedding—New Paradigm in Digital Watermarking [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2002, (2): 185-196.
- [4] Tian Jun. Reversible Data Embedding Using a Difference Expansion [J]. IEEE Transactions on Circuits and

- Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 890-896.
- [5] Alattar A M. Reversible Watermark Using the Difference Expansion of a Generalized Integer Transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(8): 1147-1156.
- [6] 任洪娥, 常春武, 张健. 基于相邻两像素差值的无损数据隐藏算法 [J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(16): 3897-3902.
- [7] Kamstra L, Heijmans H J A M. Reversible Data Embedding into Images Using Wavelet Techniques and Sorting [J]. IEEE Transactions on Image Process, 2005, 14(12): 2082-2090.
- [8] Thodi D M, Rodriguez J J. Expansion Embedding Techniques for Reversible Watermarking [J]. IEEE Transactions on Image Process, 2007, 16(3): 721-730.
- [9] 宋伟, 侯建军, 李赵红. 一种基于块分类和差值扩展的可逆数据隐藏算法 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(3): 693-702.
- [10] 任泽民, 何传江, 李梦, 等. 自适应融合的小波域水印方法 [J]. 计算机工程, 2011, 37(15): 98-99, 115.
- [11] 邓小亚. 小波变换和奇异值分解的鲁棒水印算法 [J]. 激光杂志, 2015, 36(4): 86-89.
- [12] 刘志军. 基于小波域块分类的信息隐藏算法 [J]. 计算机工程, 2008, 34(12): 144-146.
- [13] 周立, 柳春华, 蒋天发. 基于小波变换和奇异值分解的图像水印算法 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2011, 44(1): 120-123.
- [14] 曾晴, 马苗, 孙莉, 等. 基于奇异值分解的小波域数字水印方法 [J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2014, 42(1): 19-23.
- [15] Lee S K, Suh Y H, Ho Y S. Reversible Image Authentication Based on Watermarking [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2006: 1321-1324.