

小波用于基于遥感影像特征的自适应二维盲水印算法

王贤敏 关泽群 吴沉寒

(武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079)

E-mail: wuchenhan@etang.com

摘 要 文章提出了一个有效的基于遥感影像特征的自适应二维盲水印算法。该算法使用灰度图像作为水印, 将水印灰度图像进行 Arnold 置乱加密和小波压缩后, 利用相邻特征平均值和奇偶判决法嵌入遥感影像的二阶小波变换域中所选择的子带上, 且水印检测不需要原始遥感影像。攻击测试和实验结果表明, 该算法具有较好的透明性, 强壮性, 以及水印检测结果准确, 算法复杂度低等优点, 对如 JPEG 有损压缩、中值滤波、附加噪声、伸缩、裁剪、旋转、几何变换、Stirmark 攻击等各种影像处理的攻击都具有较强的鲁棒性; 且嵌入水印后基本不会影响遥感影像的边缘检测和分类等一些应用。

关键词 遥感影像 数字水印 自适应 二维盲水印

文章编号 1002-8331-(2004)20-0037-05 文献标识码 A 中图分类号 TP391.4; TP309.2

Adaptive 2-Dimension Blind Watermarking Algorithm Based on Character of Remote Sensing Image

Wang Xianmin Guan Zequn Wu Chenhan

(Remote Sensing Information Engineering College of Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract: This article proposes an effective adaptive 2-dimension blind watermarking algorithm based on character of a remote sensing image. This algorithm uses a gray image as watermarks, deals with the watermarking image by Arnold confusion and wavelet compression, and embeds it into the selected subband of wavelet transformation domain of the remote sensing image according to neighboring symbol's mean value and odd-even judgement rule, moreover, detects watermarks without the original remote sensing image. The attack analysis and experimental results show that the watermarking algorithm is transparent and robust with accurate watermarking detecting results and low complexity, which also has strong robustness against many kinds of image processing attacks such as JPEG lossy compression, median filtering, additive noise, scaling, cropping, rotation, random geometrical transform and stirmark attack. Furthermore, after embedding watermarks, there is little influence on such applications of the remote sensing image as edge detection and image classification.

Keywords: remote sensing image, digital watermark, adaptive, 2-dimension blind watermark

1 引言

随着计算机及网络通讯技术的迅猛发展, 遥感影像的交换和传输变得异常方便和快捷; 并且遥感影像具有数据量庞大, 价格昂贵, 甚至含有机密信息等特点, 因此其安全与版权保护问题已显得日益重要。而数字水印技术(digital watermarking)作为一种能有效地保护知识产权和实现机密信息传递的潜在解决方案, 已受到人们的高度重视。因此基于遥感影像的数字水印技术将成为国际学术界兴起的一个前沿研究领域。

通过几年的研究发展, 数字水印技术取得了巨大的发展, 出现了许多优秀的算法, 其中包括文本、图像、图形、视频和音频数字水印算法^[1-9]。在这些算法中, 由于水印信息一般是一个随机信号, 即一维水印, 其水印嵌入是在时域或变换域中进行,

并采用假设检验(相关检验)来检测水印信息, 因此这些水印算法可称为一维水印算法^[9-12]。而对于以图像等有意义信号作为水印信息(可称为二维水印)却的算法却很少。这主要是由于图像信息的数据量太大, 难于嵌入。

近几年基于小波变换(DWT)的水印技术在水印研究者中引起强烈兴趣, 很多基于 DWT 的水印算法都是直接从大多数常用的基于 DWT 的压缩算法中得到启发, 这其中最有代表性的是 Podichuk I 等提出的利用视觉模型来判断水印加在图像上的位置及可加水印强度的上限^[1]。迄今为止, 大部分提议的水印算法尤其是基于小波的水印算法在检测水印时, 都需要将加水印后的图像与原始图像进行比较以提取水印^[9], 不能与水印在网络和数字图书馆上的自动验证结合起来, 所以水印的新热点是盲水印, 即不需要原始图像数据进行水印检测的水印

基金项目: 首届全国优秀博士论文奖项目资助(编号: 199936)

作者简介: 王贤敏, 女, 博士生, 研究方向: 计算机图形图像处理、遥感图像信息处理与应用、地理信息系统。关泽群, 男, 博士、教授、博导。武汉大学遥感信息工程学院副院长, 主要从事遥感、图像分析和地理信息系统的教学和科研工作。吴沉寒, 男, 博士生, 研究方向: 计算机图形图像处理、地理信息系统、空间数据挖掘、网络并行计算。

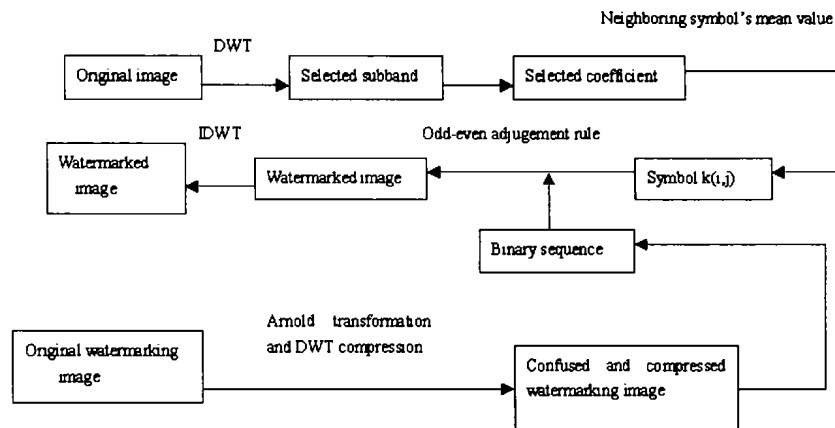


图1 水印内嵌处理的基本步骤

算法。

该文提出了一种新的基于遥感影像特征的自适应二维盲水印算法。该算法是以灰度图像为水印信息,从而将大数据量水印信息嵌入到载体遥感影像中。并且文章借鉴文献[10]的思想,采用遥感影像的相邻特征平均值和改进的奇偶判决法在遥感影像的小波域上内嵌水印灰度图像,因此该方法是自适应于影像特征的。此外该算法在水印检测过程中算法简单,不需要原始遥感影像,所以是一种盲水印算法。经过模拟实验表明:该算法水印隐藏效果好,对各种攻击,如影像缩放、旋转、裁剪、添加噪声、中值滤波 JPEG 有损压缩、几何变换以及 Stirmark 攻击等都具有很好的鲁棒性,且对遥感影像的边缘检测和分类等应用基本没有影响。

2 水印嵌入算法

水印嵌入算法的基本框图如图1所示。

该算法引入了一系列增强机制,其中包括通过对原始水印图像进行 Arnold 置乱来实现对水印的加密以及分散错误比特分布,从而提高数字水印的鲁棒性;此外,水印的嵌入是自适应于遥感影像的特征的,用相邻特征平均值和奇偶判决法内嵌水印于小波变换域的2阶子带上,既保证了含水印影像的逼真度,又进一步提高了水印的稳健性。

2.1 水印图像预处理

2.1.1 Arnold 置乱

数字图像置乱是一种加密方法,它利用某种算法将一幅图像各像素的次序打乱,但像素的总个数不变,直方图不变。并且在数字水印中,置乱技术主要考虑的是尽可能地分散错误比特的分布,提高数字水印的视觉效果来增强数字水印的鲁棒性^[11]。已提出的图像置乱方法有:Arnold 变换、幻方、Hilbert 曲线、Conway 游戏、Gray 码变换等。文章选 Arnold 变换作为水印嵌入的预处理,是因为它的直观、简单,并且具有周期性,实现方便;即 Arnold 变换兼具“尽可能小的计算量”和“尽可能大的置乱度”的优点。

Arnold 变换又称猫脸变换,通过下式变换:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod{1} \quad (1)$$

将 Arnold 变换应用到数字图像上,可以通过像素坐标的改变而改变图像像素点的布局。若将数字图像视为一个矩阵,则经 Arnold 变换后的图像会变得“混乱不堪”。但继续使用

Arnold 变换,一定会出现一幅与原图相同的图像,即 Arnold 变换具有周期性。该文将要嵌入遥感影像中的水印灰度图像进行置乱和压缩后,再嵌入到遥感影像中。当该遥感影像遭到用户的修改和恶意攻击时,遥感影像的某一部分通常会遭到损失或丢失(如裁剪),这样嵌入的数字水印的某一部分也会遭到损失或丢失,当将该遭到损失的数字水印提取出来解压缩后,再继续利用 Arnold 变换即可恢复水印图像。由于在恢复过程中,Arnold 变换将会把原先遭到损坏的比特分散开来,减少其对人视觉的影响,相应地提高了数字水印的鲁棒性。考虑到数字图像的需要,基于位置的图像置乱的 Arnold 变换可改写为:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod{N} \quad (2)$$

其中 $x, y \in (0, 1, 2, \dots, N-1)$, 表示某一像素点的坐标,而 N 为图像矩阵的阶数。

根据实验表明:对于不同阶数 N 的矩阵,Arnold 变换具有不同的周期 T ,且当进行 Arnold 变换的次数等于 Arnold 变换周期 T 的一半,即 $T/2$ 时,Arnold 变换次数为最佳变换次数,也就是水印图像在经过最佳变换次数的 Arnold 变换后,图像达到最乱,此时的水印图像的鲁棒性最强。所以该算法在水印图像预处理时,将水印图像 W 进行 $T/2$ 次 Arnold 置乱(T 为 Arnold 变换的周期),从而使水印图像达到最乱,具有最强鲁棒性。

2.1.2 水印图像压缩

由于图像数据量大,若将水印图像直接嵌入到载体图像中,是不现实的,因此必须对水印图像进行一定的压缩,以减少嵌入的数据量。通过对现有水印技术和图像压缩技术的研究,在充分考虑图像的压缩率和图像恢复的容错能力的基础上,该文选用 DWT 技术对水印图像进行压缩,即对经过 Arnold 置乱后的水印图像 $W^{\#}$ 进行 2 层小波分解,提取低频分量以实现压缩,从而得到水印压缩图像 W^* 。

2.1.3 水印信号生成

经过上述预处理后,水印信号 W^* 中已包含了水印图像 W 中的绝大部分信息,即完全可以从信号 W^* 中恢复出水印图像 W 。然后将水印信号 W^* 转换成二进制序列,其中, W^* 中的每一个数用 8bit 二进制码表示,即可得到只包含 0,1 数字的水印序列 Q 。

2.2 水印图像信息嵌入

2.2.1 遥感影像的小波分解和嵌入水印子带的选择

小波变换是构建一个分级的子带系统,它具有多分辨率特性和分级结构,以及没有 DCT 的方块效应等优点。将原始遥感影像进行 L 级离散小波变换,产生一个低频子带 LL 和相应于每级分解阶上的水平、垂直和斜向方向上的细节子带序列 $LHi,HLi,HHi(I=1,2,\dots,L)$ 。因为 LL 低频子带含有遥感影像的重要信息而不适合内嵌水印,否则会带来影像质量的退化,容易被人眼感知,甚至影响遥感影像的应用。在最低阶子带 $LL1,HL1,HH1$ 上内嵌水印,虽然会带来视觉上的低可见性,却不可避免地易受类似低通和中值滤波的攻击。而在例如 $LL3,HL3,HH3$ 等高阶子带上内嵌水印,由于这些子带小,所能内嵌的水印信号容量小,同时水印信号也不能完全覆盖到整幅图像上,无法有效地抵抗裁剪等攻击。至于 HHi 子带,由于这类子带在视觉上不敏感,大多数有损压缩算法都针对这样一个不敏感区域,从而导致内嵌水印的低生存率。因此该算法将遥感影像只进行 2 阶分解,并选择中阶分解区域的水平子带和垂直子带,即 $LH2$ 子带和 $HL2$ 子带作为水印的内嵌子带。

水印内嵌子带的具体选择方法如下:分别计算 $LH2$ 子带和 $HL2$ 子带的方差 Var_{LH2} 和 Var_{HL2} ,水印内嵌子带 I 选择为其中具有较大方差的子带,因为子带的方差越大,表示其中的边缘纹理信息就越丰富,适合隐藏信息且不易被感知,即:

$$I = \begin{cases} LH2 & \text{if } \text{Var}_{LH2} \geq \text{Var}_{HL2} \\ HL2 & \text{if } \text{Var}_{HL2} > \text{Var}_{LH2} \end{cases} \quad (3)$$

2.2.2 相邻特征平均值的计算

计算遥感影像上内嵌水印的系数的相邻特征平均值。首先将水印内嵌子带 I 上所有系数都加上一个实数 f ,从而使自带 I 上所有系数都变成正数。其中 f 为子带 I 上最大系数绝对值,即:

$$f = \max(|I_{k,1}|) \quad (4)$$

设 $I_{i,j}$ 为子带 I 上内嵌水印的系数的值,其相邻的邻居系数共有 8 个,分别是 $I_{i-1,j-1}, I_{i-1,j}, I_{i-1,j+1}, I_{i,j-1}, I_{i,j}, I_{i,j+1}, I_{i+1,j-1}, I_{i+1,j}, I_{i+1,j+1}$ 。为了更多地利用相邻系数之间的相关性,选择所有 8 个相邻系数来计算相邻特征平均值 $m_{i,j}$,即:

$$m_{i,j} = \text{mean}(I_{i-1,j-1}, I_{i-1,j}, I_{i-1,j+1}, I_{i,j-1}, I_{i,j}, I_{i,j+1}, I_{i+1,j-1}, I_{i+1,j}, I_{i+1,j+1})$$

为避免水印位置的交叠,选择在子带 I 系数上隔行、隔点内嵌水印,且边界的处理采用对边界系数进行对称循环扩展。

2.2.3 奇偶判决法内嵌水印

奇偶判决法的思想是根据水印序列值的不同,将小波系数分别修改为其标志所对应的、最相邻的奇区间或偶区间中的值。在所选择的子带系数 $I_{i,j}$ 上内嵌水印的具体算法如下:

(1)将相邻特征平均值 $m_{i,j}$ 进行加权计算,加权因子 a 即为水印内嵌强度,修改后的相邻特征平均值为 $m_{i,j}'$,则 $m_{i,j}' = a * m_{i,j}$;

(2)计算标志 $k_{i,j}$:

$$k_{i,j} = \text{round}(x_{i,j} / m_{i,j}')$$

(3)修改子带系数以嵌入水印:

①当水印信号值为 1 时,即 $Q_i = 1$ 时:

$$I_{i,j} = \begin{cases} k_{i,j} * m_{i,j}' & \text{if } \text{mod}(k_{i,j}, 2) = 1 \\ (k_{i,j}-1) * m_{i,j}' & \text{if } \text{mod}(k_{i,j}, 2) = 0 \text{ and } I_{i,j} \leq k_{i,j} * m_{i,j}' \\ (k_{i,j}+1) * m_{i,j}' & \text{if } \text{mod}(k_{i,j}, 2) = 0 \text{ and } I_{i,j} > k_{i,j} * m_{i,j}' \end{cases} \quad (5)$$

②当水印信号值为 0 时,即 $Q_i = 0$ 时:

$$I_{i,j} = \begin{cases} k_{i,j} * m_{i,j}' & \text{if } \text{mod}(k_{i,j}, 2) = 0 \\ (k_{i,j}-1) * m_{i,j}' & \text{if } \text{mod}(k_{i,j}, 2) = 1 \text{ and } I_{i,j} \leq k_{i,j} * m_{i,j}' \\ (k_{i,j}+1) * m_{i,j}' & \text{if } \text{mod}(k_{i,j}, 2) = 1 \text{ and } I_{i,j} > k_{i,j} * m_{i,j}' \end{cases} \quad (6)$$

2.2.4 生成加水印遥感影像

将嵌入水印信号后的子带 I' 上的所有系数都减去 f ,然后进行逆小波变换 IDWT,从而生成加水印遥感影像 B 。其中水印灰度图像 W 的尺寸与加权因子 a 作为密钥,用于水印检测。

3 水印检测算法

3.1 水印信号提取

水印检测是水印嵌入的逆步骤,该算法在水印检测过程中,不需要原始遥感影像数据,所以为盲水印算法。

水印信号的提取步骤为:

(1)加水印遥感影像 B 进行 2 级 DWT。

(2)计算相邻特征平均值:

在已知的水印内嵌子带 I' 上,计算相邻特征平均值 $m_{i,j}^*$ 。

(3)奇偶判决法提取水印信号 Q' :

利用水印内嵌步骤中所描述的算法产生 $m_{i,j}'$ 和计算标志 $k_{i,j}'$,然后运用奇偶判决法来提取水印信号:

$$Q' = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{mod}(k_{i,j}', 2) = 1 \\ 0 & \text{if } \text{mod}(k_{i,j}', 2) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

可以用相似函数来测试提取出的水印信号 Q' 和嵌入的水印信号 Q 之间的相似性:

$$\text{sim}(Q', Q) = \frac{\sum_{n=1}^{Q_i} Q(n) * Q'(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{Q_i} Q'(n)^2}} \quad (8)$$

$\text{sim}(Q, Q')$ 说明了嵌入水印信号与提取出的水印信号的相似度,若 $\text{sim}(Q, Q') > T^*$,则说明被测试的遥感影像中存在水印,否则,就不含水印。可由公式(8)计算出,当 $T^* = 6$ 时,判断水印信号存在的错检率小于 10^{-8} ,所以在算法中取阈值 $T^* = 6$ 。

3.2 水印图像恢复

水印图像的恢复是按水印信号产生的逆过程进行。

(1)将提取出的水印序列 Q' 中,以 8bit 为一组,将其转换为十进制表示,得到 W^* 。

(2)将 W^* 进行解压缩以及进行 $T/2$ (T 为 Arnold 变换的周期)次的 Arnold 变换,即可恢复出水印灰度图像 W' 。

除了可通过验证检测出的水印信号 Q' 和内嵌水印信号 Q 之间的相关性来进行版权认证,还可通过恢复出的水印灰度图像 W' 进行版权认证。

4 模拟实验

这里使用“遥感信息工程学院”(48×48×8)作为水印图像,以 SPOT5 遥感影像中的一块子影像(800×800)为载体影像,进行测试,如图 2~5 所示。对于 48×48 的水印图像,Arnold 置乱周期为 $T=12$ 。小波变换参数为 bior2.6 滤波器,小波分解为 2 阶。其中加权因子 a 如选择较大值,能增加水印对影像处理的免疫力,但将降低影像的逼真度;而选择较小值能提高加水印图像的不可见性,但却降低了水印图像的鲁棒性。经过实验,算法取 $a=0.05$ 而达到了有效地折衷。内嵌水印后的遥感影像的 PSNR=45.6042dB,PSNR 值和主观视觉效果都证实了该算法实现了水印的透明性和加水印影像的逼真度。

笔者对加水印遥感影像进行了一系列攻击实验,其中图 7 是标准 JPEG 有损压缩攻击下提取水印信号的检测响应曲线图,由于该文是在 DWT 域进行水印内嵌,因此该算法具有较好

的抵抗 JPEG 压缩的特性,实验结果也证实了这一点。图 8~15 分别是将加水印影像旋转 5°,添加 0 均值的高斯噪声,添加胡椒与盐噪声,放大 2 倍,缩小 2 倍,进行裁剪,中值滤波,品质因子为 82.4% 的标准 JPEG 有损压缩等攻击后提取出的水印灰度图像。表 1 为相应攻击实验下,水印检测响应测试数据和提取的水印图像的 PSNR 值。

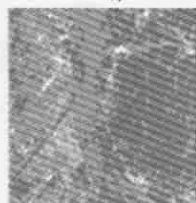


图 2 原始遥感影像

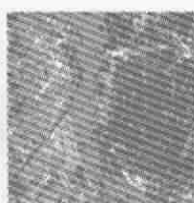


图 3 加水印遥感影像

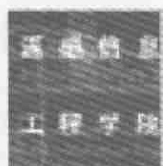


图 4 原始水印灰度图像



图 5 经过 T/2 次 Arnold 置乱后的水印图像



图 6 无攻击时提取的水印图像

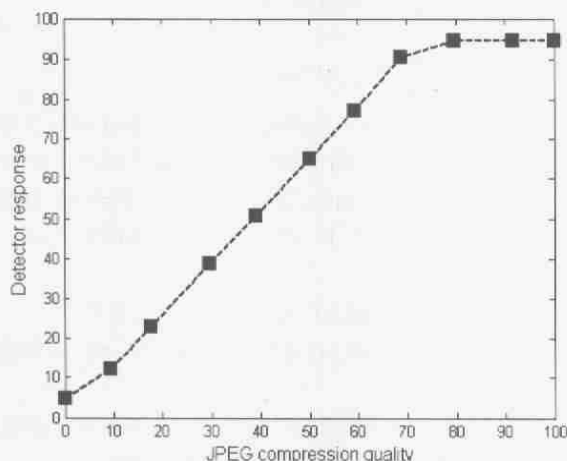


图 7 标准 JPEG 有损压缩的检测响应曲线图



图 8 旋转 5°

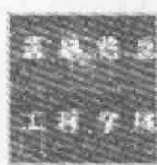


图 9 添加 0 均值高斯噪声

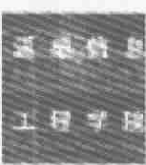


图 10 添加胡椒与盐噪声



图 11 放大 2 倍

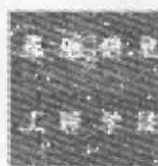


图 12 缩小两倍



图 13 中心裁剪(10%)

由实验结果可以看出,加水印遥感影像的 PSNR 值很高,说明水印隐藏效果好。且面临各种影像攻击,即使含水印影像的质量已经有很大的失真,PSNR 值较低的情况下,水印仍能

很好的生存,具有很强的鲁棒性,说明该文提出的算法具有较好的透明性、强壮性,以及水印检测结果准确,算法复杂度低等优点,是一个有效的自适应二维盲水印算法。



图 14 中值滤波

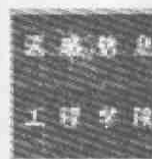


图 15 标准 JPEG 有损压缩 (品质因子:82.4%)

表 1 在不同攻击下提取水印的检测响应以及提取的水印图像的 PSNR 值

Attack types	Detector responses	PSNR values
No attack	1	45.6042
rotation 5°	0.5084	14.4216
Gaussian noise (mean value 0 variation 0.002)	0.8250	31.0281
Salt & pepper noise	0.9153	39.1320
Scale up 2 times	0.9289	38.6042
Scale down 2 times	0.6041	23.6053
Center cropping(10%)	0.6455	35.1941
Median filter(3×3)	0.8382	33.8722

然后笔者用 StirMark 软件模拟了 87 幅具有不同分辨率的遥感影像的 11 种失真情形。为了证实该文提出的基于 DWT 的遥感影像自适应二维盲水印算法的有效性和鲁棒性,实验中还用 Stimark 对 Cox 方法进行了鲁棒性测试^[6,12],表 2 中列出了实验结果。

从表 2 中可以看出,中值滤波、中心裁剪、尺度变换(缩小)、几何变换、图像旋转以及 x-y 方向修剪等多种情形都会导致 Cox 方法失效;而基于 DWT 的遥感影像自适应二维盲水印算法只有在尺度变换(缩小)、中心裁剪和图像旋转这三类图像失真的情形下,可能不能正确地检测到水印,而对其它情形,包括 StirMark 攻击,嵌入的水印均能被正确检测到;此外,从总的正确率来看,基于 DWT 的遥感影像自适应二维盲水印算法的总正确率为 76/87=87.36%,大于 Cox 方法的正确率 58/87=66.66%。并且,在对不同分辨率的遥感影像进行实验时,可以发现,在分辨率越高,纹理信息越复杂的遥感影像中内嵌水印,水印抵抗各种攻击的鲁棒性越强。

对原始遥感影像和加水印遥感影像分别进行边缘提取(使用 canny 算子)和影像分类的应用实验,结果如图 16~19 所示。在影像分类时,加水印遥感影像的错分像元数为 20592,占遥感影像总像元数的百分比为 0.2288%。

从实验结果可看出该文提出的基于遥感影像特征的自适应二维盲水印算法对遥感影像的边缘检测和分类等应用基本没有影响,是一种适用于遥感影像的水印算法。

5 结论

文章提出了一个基于遥感影像特征的自适应二维盲水印算法,该算法使用灰度图像作为水印,通过对水印灰度图像进行 Arnold 置乱加密和图像压缩后,利用相邻特征平均值法和奇偶判决法内嵌到载体遥感影像的小波变换域中。该算法自适应于遥感影像特征,且水印图像提取过程不需要原始遥感影像。攻击测试和实验结果表明,该算法具有较好的透明性、强壮

表2 Cox方法和基于DWT的遥感影像自适应水印盲算法的实验结果对比

测试类型	测试数目	Cox方法正确检测数目	基于DWT的遥感影像自适应水印盲算法正确检测数目
滤波(中值、高斯、FMLR、锐化)	5	4	5
JPEG压缩	10	10	10
对称及非对称地移去图像的行和列	5	5	5
通用线性几何变换	5	2	5
改变x-y轴的显示比例	10	10	10
尺度变换	5	4	4
x-y方向的修剪	5	3	5
带裁剪、不带尺度变换的旋转	15	7	11
带裁剪和尺度变换的旋转	15	8	10
中心裁剪	10	3	9
StirMark随机弯曲	2	2	2
合计	87	58	76



图16 原始遥感影像的边缘检测结果

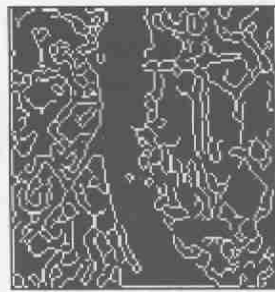


图17 加水印遥感影像的边缘检测结果

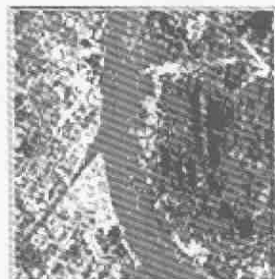


图18 原始遥感影像的分类结果

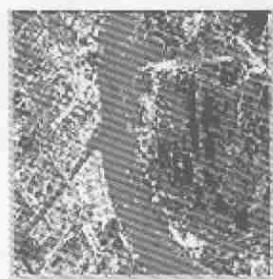


图19 加水印遥感影像的分类结果

性,以及水印检测结果准确,算法复杂度低等优点,对各种影像处理技术都具有较强的鲁棒性,且对遥感影像的边缘检测和分类等应用基本没有影响,是一个易于推向遥感影像实用的水印算法。(收稿日期:2004年4月)

参考文献

- 1.Cox I J,Killian J,Leighton F T et al.Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J].IEEE Trans Image Processing,1997;6(12):1673~1687
- 2.Christine I,Podilchuk,Wenjun Zeng.Digital image watermarking using visual models[C].In:Proceeding of SPIE on Human Vision and Electronic Imaging,San Jose,1997;3016:100~111
- 3.Podilchuk C I,Zeng W.Image-adaptive watermarking using visual models[J].IEEE Journal on Special Areas in Communications,1998;14(4):525~539
- 4.Xia X.A multi resolution watermark for digital images[C].In:Proc 4th IEEE Int Conf Image Processing'97,Santa Barbara,CA,1997:548~551
- 5.Podilchuk C I,Zeng W.Image-adaptive watermarking using visual models[J].IEEE Journal on Special Areas in Communications,1998;16(4):525~539
- 6.Cox I J,Matt L Miller.A review of watermarking and the importance of perceptual modeling[C].In:SPIE Proceeding on Human Vision and Electronic Imaging,Finland,1997:92~99
- 7.Yi Kaixiang,Shi Jiaoying,Sun Xin.Digital Watermarking Techniques: An Introductory Review[J].Journal of Image and Graphics,2001;6(2):111~117
- 8.He Renya,Cheng Qiansheng.Digital Watermarking Embedded in the Discrete Wavelet Domain for Authentication[J].Journal of Computer-aided Design&Computer Graphics,2001;13(9):812~815
- 9.Huang Daren,Liu Jiufen,Huang Jiwu.An Embedding Strategy and Algorithm for Image Watermarking in DWT Domain[J].Journal of Software,2002;13(7):1290~1296
- 10.Wang Pei,Yu Songyu,Yuan Xiaobing.Adaptive blind watermarking algorithm based on wavelet transform[J].Optics and Precision Engineering,2002;10(3):247~252
- 11.Zhang Huaxiong,Chou Peiliang.Application of Shuffling Technique in Watermarking[J].Journal of Circuits and Systems,2001;6(3):32~36
- 12.Liu Ruizhen,Wang Yunhong,Tang Tieniu.Image Content-based Watermarking Model[J].Journal of Image and Graphics,2001;6(6):558~562