

文章编号:1001-9081(2005)10-2348-03

基于多位平面嵌入的二元纯位相滤波器水印

桑 军^{1,2}, 王成良¹, 李宗志³, 祝伟华¹

(1. 重庆大学 软件学院, 重庆 400044; 2. 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3. 重庆大学 计算机学院, 重庆 400044)

(sangjun@tom.com)

摘 要:在简要分析基于单一幅值位平面嵌入 BPOF 水印的基础上, 讨论了使用多个幅值位平面嵌入水印并进行了性能分析。通过仿真实验得到了优化方案: 以多个幅值位平面嵌入水印, 而从其中的最高位平面中提取水印可以明显提高水印性能。

关键词:位平面; 二元纯位相滤波器(BPOF); 数字水印; 图像认证; 离散 Fourier 变换

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Multiple bit planes embedding based binary phase-only filter watermarking

SANG Jun^{1,2}, WANG Cheng-liang¹, LI Zong-zhi³, ZHU Wei-hua¹

(1. School of Software Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Key Laboratory of Education Ministry for Image Processing and Intelligent Control, Wuhan Hubei 430074, China;

3. College of Computer Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Based on the brief analysis of embedding the BPOF(binary phase-only filter) watermark into single bit plane, the watermark embedding with multiple bit planes and analyzed its performances was discussed. The optimized scheme is obtained via simulation experiments: embedding the watermark into multiple magnitude bit planes, while extracting the watermark from the highest one of them, will improve the watermark performance markedly.

Key words: bit plane; binary phase-only filter (BPOF); digital watermarking; image authentication; discrete Fourier transform

0 引言

基于二元纯位相滤波器(Binary Phase-Only Filter, BPOF)数字水印是一种用于图像真实性认证的半脆弱水印技术^[1,2]。它作用于图像 Fourier 变换域, 由离散 Fourier 变换后的幅值和相位分别得到幅值位平面及 BPOF, 并将 BPOF 作为水印嵌入到幅值位平面中。其优点在于以图像内在特征(即 BPOF)作为水印, 不需要传递大量额外数据, 可以有效地实现图像自认证。文献[1]和[2]介绍了采用单一幅值位平面嵌入 BPOF 水印。文献[3]通过仿真实验对其进行了详细讨论, 包括采用不同幅值位平面嵌入 BPOF 对于水印不可感知性、检测可靠性及稳健性的影响。

为了提高水印检测的可靠性及稳健性, 可以考虑采用多个幅值位平面嵌入 BPOF 水印。但它同时会影响到图像质量。因此, 必须考虑如何选择合适的多个幅值位平面嵌入水印, 以及如何有效地提取水印, 从而保证在不降低或不明显降低图像质量的基础上, 尽可能提高算法性能。

1 基于单一幅值位平面嵌入的 BPOF 水印

基于单一幅值位平面嵌入的 BPOF 水印算法可简述如下^[1,2]。

嵌入水印:

1) 对于原始图像 I_o 作 DFT 变换, 得到幅值 $|H(u, v)|$ 和相位 $\phi(u, v)$;

2) 对于幅值 $|H(u, v)|$ 取整, 并将取整后的值分解为一系列位平面表达。对于相位 $\phi(u, v)$, 计算 $b(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{if } \cos\phi(u, v) \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$, 得到 BPOF。显然, 这里的 BPOF 与幅值位平面具有相同对称性;

3) 对于 BPOF 加密置乱(注意保持其对称性不变)。使用加密置乱后的 BPOF 替换某一选定的幅值位平面完成 BPOF 水印的嵌入;

4) 通过二维离散 Fourier 逆变换(IDFT), 得到嵌入水印后图像 I_w 。

检测水印:

1) 对于待检测图像 I_T 作 DFT 变换, 得到幅值 $|T(u, v)|$ 和相位 $\phi_T(u, v)$;

2) 对于幅值 $|T(u, v)|$ 取整, 分解为一系列位平面表达, 提取嵌入的信息, 并将其由 $\{0, 1\}$ 映射为 $\{-1, 1\}$ (即以 -1 代替 0), 以 b' 表示。对于相位 $\phi_T(u, v)$, 计算纯位相滤波器(POF) $T_{POF} = \exp[-j\phi_T(u, v)]$;

3) 计算相关平面 $\text{Corr}(u, v) = \text{IDFT}(T_{POF}(u, v) * b'(u, v))$;

4) 使用两个指标^[4]——峰值——均值比 $PACE =$

收稿日期: 2005-04-13; 修订日期: 2005-06-10 基金项目: 教育部重点实验室开放基金资助项目(TKLJ0301)

作者简介: 桑军(1968-), 男, 重庆人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向: 计算机信息安全、数字水印、图像处理; 王成良(1964-), 男, 江苏人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 软件工程、数据库技术; 李宗志(1964-), 男, 四川都江堰人, 博士研究生, 主要研究方向: 数据库应用开发、多媒体技术、计算机网络; 祝伟华(1970-), 男, 重庆人, 讲师, 主要研究方向: 人工智能、分布式计算。

$20\log_{10}(\frac{P_{\max}}{\mu})$ 和峰值-次峰值比 $PSR = 20\log_{10}(\frac{P_{\max}}{P_{\min}})$ 判断水印的存在性。其中 P_{\max} 和 P_{\min} 分别为相关平面上的最大和次大峰值(计算 P_{\min} 时排除对应 P_{\max} 点附近 7×7 邻域), μ 为相关平面的均值。PACE 用于判断水印的存在性,其值越大,越可能存在水印。PSR 用于判断水印的虚警可能性,其值越大,虚警可能性越低。

基于单一幅值位平面嵌入 BPOF 的数字水印算法性质在文献[3]中有详细讨论,这里只做简要叙述。理想情况下,将原始图像 I_o 的 Fourier 变换 BPOF 嵌入到幅值位平面中,不会影响到图像 BPOF,得到的嵌入水印后图像 I_w 与 I_o 具有相同 BPOF,并且可以从 I_w 的 Fourier 变换幅值位平面中提取出与嵌入 BPOF 完全相同的信息。然而,由于在嵌入水印及提取水印过程中存在一系列取整操作,特别是在嵌入水印后进行 Fourier 逆变换以得到 I_w 时,为了保证获得取值为 $0 \sim 255$ 整数的灰度图像,需要对于 Fourier 逆变换得到的实数值进行处理,使得 I_w 与 I_o 的 BPOF 不会完全相同,也使得从 I_w 的 Fourier 变换幅值位平面中提取的信息不会与原来嵌入的 BPOF 完全相同。如果存在某些图像处理操作(例如 JPEG 压缩),则会产生进一步影响。因此,需要合理选择适当的幅值位平面嵌入 BPOF,保证水印的不可感知性,检测可靠性以及对于某些图像处理操作的稳健性。

在水印不可感知性方面:嵌入 BPOF 的幅值位平面越高,对于图像质量影响越大, I_o 的 BPOF 与 I_w 的 BPOF 的差异也越大。

在水印检测可靠性方面:低位嵌入 BPOF,由于取整操作的影响,由幅值位平面提取信息的变形较大;高位嵌入 BPOF,不仅由幅值位平面提取信息的变形较大,而且图像 BPOF 的变形也较大。

在水印稳健性方面:一般来说,随着嵌入 BPOF 的幅值位平面的提高,抗 JPEG 压缩的能力越强。

综合考虑以上三方面因素,在使用单一幅值位平面嵌入 BPOF 水印时,通常取居中的某一个幅值位平面。

2 基于多个幅值位平面嵌入的 BPOF 水印

通过单一幅值位平面嵌入和提取 BPOF 水印,仅仅使用了众多可能用于嵌入水印的幅值位平面中的一个(通常为居中的一个幅值位平面)。例如,对于 512×512 lena 图像,其 Fourier 变换的幅值取整后可以分解为 25 个位平面,取第 13 个位平面嵌入水印,水印性能最优^[3]。一个很自然的想法是,如果通过多个幅值位平面嵌入水印,则可能提高水印检测的可靠性及稳健性。在文献[1]和文献[2]中提到了这一可能性,但未就如何选择多个幅值位平面嵌入水印,如何提取水印进行深入讨论。我们选取 512×512 lena 图像对此进行了研究。

嵌入水印:按照与单一幅值位平面嵌入水印相似的方法,使用加密置乱后的 BPOF 替换用于嵌入水印的幅值位平面。如果需要更强的安全性,可以对于不同的幅值位平面,嵌入以不同方式加密置乱的 BPOF。

提取水印:在提取嵌入的水印时,我们设计了两种方法。一种是从嵌入了水印的多个幅值位平面中同时提取信息,按照各对应位出现 1 的个数多还是 0 的个数多,决定该位恢复的水印值为 1 或 0(此时一般要求选择的嵌入幅值位平面为奇数个)。另一种是仅从所有嵌入了水印的幅值位平面的最

高位平面中提取信息作为恢复的水印。我们将会看到,后者更有利于提高水印的检测可靠性及稳健性。

根据文献[3]中的分析,对于 512×512 lena 图像,第 10 ~ 14 幅值位平面较适于嵌入水印。考虑到本文讨论的是使用多个幅值位平面嵌入水印,我们选择嵌入水印的幅值位平面为第 9 ~ 13 幅值位平面。

我们总共选取了如下 14 个方案进行多个幅值位平面嵌入 BPOF 水印的研究:方案 1 ~ 方案 4 分别使用第 11、12、13、14 幅值位平面嵌入水印,它们属于单一幅值位平面嵌入水印,在这里主要是用于与其他方案进行比较;方案 5 ~ 方案 8 分别使用第 9 ~ 11、10 ~ 12、11 ~ 13、9 ~ 13 幅值位平面嵌入水印,并分别使用第 9 ~ 11、10 ~ 12、11 ~ 13、9 ~ 13 幅值位平面提取水印,即从所有嵌入了水印的幅值位平面中提取水印;方案 9 ~ 方案 14 分别使用第 9 ~ 11、10 ~ 12、9 ~ 12、11 ~ 13、10 ~ 13、9 ~ 13 幅值位平面嵌入水印,并分别使用第 11、12、12、13、13、13 幅值位平面提取水印,即从所有嵌入了水印的幅值位平面中的最高位平面中提取水印。

3 实验结果

1) 水印不可感知性

水印不可感知性使用信噪比 SNR 及峰值信噪比 PSNR 衡量。其结果如表 1 所示。其中 Sxx 代表方案 xx。

表 1 采用不同方案嵌入水印的不可感知性

	SNR	PSNR		SNR	PSNR
S01	40.132 7	45.781 6	S08	24.561 4	30.210 3
S02	34.344 9	39.993 9	S09	37.581 9	43.230 8
S03	28.363 2	34.012 2	S10	31.688 3	37.337 2
S04	22.351 2	28.000 1	S11	31.315 9	36.964 8
S05	37.581 9	43.230 8	S12	25.039 7	30.688 6
S06	31.688 3	37.337 2	S13	24.722 5	30.371 5
S07	25.039 7	30.688 6	S14	24.561 4	30.210 3

根据表 1 我们有如下结论:多个幅值位平面嵌入水印对于图像质量的影响较单一幅值位平面嵌入水印大。水印的不可感知性稍有下降;使用多个幅值位平面嵌入水印时在其中的最高幅值位平面相同的情况下,使用的幅值位平面的个数对于图像质量影响不大。例如,使用第 10 ~ 12 幅值位平面嵌入水印(方案 6)时 SNR/PSNR 为 31.6883/37.3372,而使用第 9 ~ 12 幅值位平面嵌入水印(方案 11)时 SNR/PSNR 为 31.3159/36.9648。二者差别不大;多个幅值位平面嵌入水印对于图像质量的影响主要取决于其中的最高幅值位平面。例如,使用第 11 ~ 13、10 ~ 13、9 ~ 13 幅值位平面嵌入水印(方案 12、13、14)时,对于图像质量的影响主要来自于第 13 幅值位平面,均比使用第 14 幅值位平面进行单一幅值位平面嵌入水印效果好(前三者 PSNR 均大于 30,而后者为 28)。

2) 水印检测可靠性

水印检测可靠性使用从未受攻击的嵌入水印后图像中检测水印的 PACE/PSR 表示。其结果如表 2 所示。其中 Sxx 代表方案 xx。

由表 2 我们有如下结论:使用多个幅值位平面嵌入水印可以明显提高水印检测的可靠性。在使用单一幅值位平面嵌入水印的四种方案中 PACE 均小于 50,PSR 均小于 35。而在使用多个幅值位平面嵌入水印的十种方案中 PACE 均大于 54,PSR 均大于 36;在使用多个幅值位平面嵌入水印的方案

中,从嵌入水印的最高幅值位平面中提取水印比从所有嵌入水印的幅值位平面中提取水印效果好。例如,使用第 11~13 幅值位平面嵌入水印并从第 13 幅值位平面提取水印的检测效果(PACE/PSR 为 56.452 7/37.997 4)好于使用第 11~13 幅值位平面嵌入水印并从第 11~13 幅值位平面提取水印(PACE/PSR 为 54.626 3/36.948 4);在使用多个幅值位平面嵌入水印并从其中最高幅值位平面中提取水印的方案中,使用的幅值位平面的个数对于水印检测的可靠性影响不大。例如,使用第 11~13、10~13、9~13 幅值位平面嵌入水印(方案 12、13、14)并从第 13 幅值位平面提取水印,其水印检测效果差别不大(其 PACE/PSR 分别为 56.452 7/37.997 4, 56.600 0/38.649 7, 56.733 6/38.997 0)。

表 2 采用不同方案嵌入水印的检测可靠性

	PACE	PSR		PACE	PSR
S01	49.718 6	33.517 7	S08	54.684 1	38.065 9
S02	49.937 4	34.671 6	S09	55.789 0	39.326 6
S03	49.966 9	34.103 0	S10	56.272 2	39.117 5
S04	47.888 6	29.691 5	S11	56.399 4	39.233 9
S05	54.145 7	38.141 2	S12	56.452 7	37.997 4
S06	54.892 0	38.689 0	S13	56.600 0	38.649 7
S07	54.626 3	36.948 4	S14	56.733 6	38.997 0

3) 水印稳健性

这里主要讨论水印抗 JPEG 压缩能力。同样使用 PACE/PSR 表示。其结果如图 1~3 所示。它们对应于嵌入水印的最高幅值位平面分别为 11、12、13 的各种方案抗 JPEG 压缩能力。

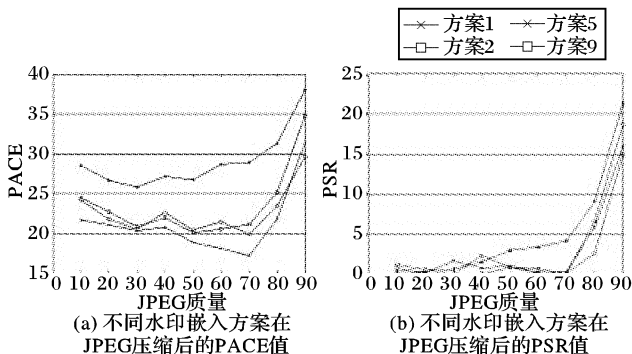


图 1 抗 JPEG 压缩能力

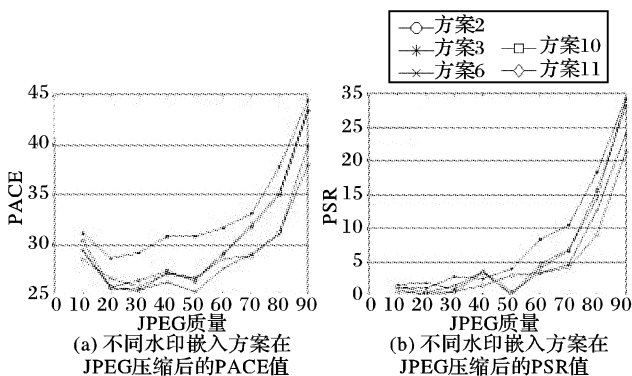


图 2 抗 JPEG 压缩能力

由图 1 可见,就抗 JPEG 压缩能力而言,方案 2 > 方案 9 > 方案 5 > 方案 1。由图 2 可见,方案 3 > 方案 10,11 > 方案 6 > 方案 2。它们均表明,使用高一级单一幅值位平面嵌入水印 > 使用多个幅值位平面嵌入水印并且从最高幅值位平面提取水印 > 使用多个幅值位平面嵌入水印并且从所有使用的嵌入

水印幅值位平面提取水印 > 使用同一级单一幅值位平面嵌入水印。同时,由图 2 可见,方案 3 与方案 10,11 的抗 JPEG 压缩能力已相当接近,表明随着嵌入水印的幅值位平面的提高,使用多个幅值位平面嵌入水印并且从最高幅值位平面提取水印抗 JPEG 压缩能力已经接近于使用高一级单一幅值位平面嵌入水印。

由图 3 可见,方案 12、13、14 > 方案 4 > 方案 7 > 方案 3 > 方案 8。此时使用多个幅值位平面嵌入水印并且从最高幅值位平面提取水印抗 JPEG 压缩能力已经部分超过使用高一级单一幅值位平面嵌入水印。注意到方案 12、13、14 抗 JPEG 压缩能力基本相同,表明嵌入水印时使用的幅值位平面个数对于抗 JPEG 压缩能力影响不大。

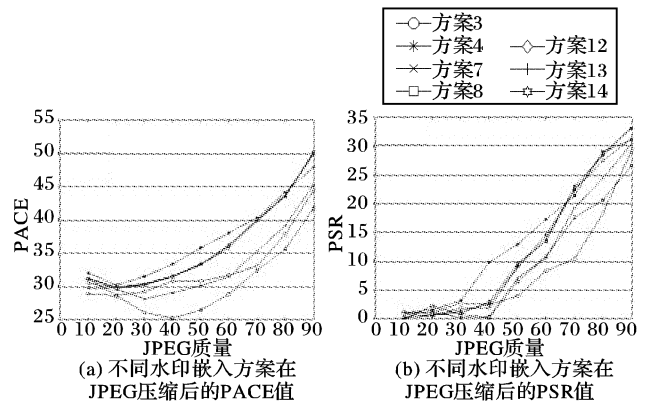


图 3 抗 JPEG 压缩能力

综合水印不可感知性、检测可靠性、稳健性(抗 JPEG 压缩),我们得到如下结论:

第一,使用多个幅值位平面嵌入水印,而从其中的最高幅值位平面提取水印,其检测可靠性及稳健性明显提高。并且由于使用的幅值位平面个数对于水印性能影响不大,一般取三个幅值位平面同时嵌入水印即可获得较好效果。

第二,使用多个幅值位平面嵌入水印,而从所有使用的幅值位平面中提取水印,其检测可靠性比使用单一幅值位平面嵌入水印有明显提高,而稳健性有一定提高。

4 结语

本文针对基于 BPOF 的数字图像水印,通过使用多个幅值位平面嵌入水印,对于原有的使用单一幅值位平面嵌入水印算法进行了改进,并且就如何选择合适多个幅值位平面嵌入水印,以及如何有效地提取水印,从而保证在不降低或不明显降低嵌入水印后图像质量的基础上,尽可能提高算法性能进行了讨论。仿真实验表明:使用多个(一般取三个)幅值位平面嵌入水印,而从其中的最高幅值位平面提取水印可以有效地提高水印性能。

参考文献:

- [1] AHMED F, MOSKOWITZ IS. Correlation - based watermarking method for image authentication applications[J]. Optical Engineering, 2004, 43(8): 1833 - 1838.
- [2] AHMED F, MOSKOWITZ IS. The binary phase only filter as an image watermark[DB/OL]. <http://chacs.nrl.navy.mil/publications/CHACS/2004/index2004.html>, 2005.
- [3] KUMAR BVKV, HASSEBROOK L. Performance measures for correlation filters[J]. Applied Optics, 1990, 29: 2997 - 3006.