

# 基于矢量量化的数字图像水印技术研究

陈佳萍, 张登银

(南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 基于矢量量化的数字水印是数字水印技术一个新的研究领域。主要研究基于矢量量化的数字图像水印技术的原理和性能。在简要介绍水印技术和矢量量化技术后阐述了基于矢量量化的数字水印算法的基本原理。通过分析几种典型的矢量量化水印算法, 总结出基于矢量量化水印算法的特点是在嵌入容量和算法易行性方面有绝对优势, 并且对于VQ压缩攻击有很好的鲁棒性, 但水印图像的质量对于版权保护来说还有待提高。指出进一步研究的方向是结合DCT、DWT、HVS来改善。

**关键词:** 数字水印; 矢量量化; 不可感知性; 容量; 鲁棒性

**中图分类号:** TP309

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2008)07-0139-04

## Research on VQ-Based Digital Image Watermarking

CHEN Jia-ping, ZHANG Deng-yin

(Sch. of Computer Sci. and Tech., Nanjing Univ. of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Vector quantization (VQ)-based digital watermarking technique plays a newly developed branch in digital watermarking research fields recently. Mainly researched on the VQ-based digital image watermarking technology. After briefly introducing watermarking technology and vector quantization, the principle of VQ-based digital watermarking technique is explicated. By analyzing several typical VQ-based digital image watermarking algorithms, the characteristic of VQ-based digital image watermarking algorithms is summed up. It is superior in the capability and embedded facility and has a very good robustness against VQ compression, but the watermark image quality needs to be enhanced. Further research is to combine it with the DCT, DWT and HVS to improve the imperceptibility.

**Key words:** digital watermarking; VQ; imperceptibility; capacity; robustness

## 0 引言

网络技术的发展为数字媒体的传播提供了有效的通道, 同时也引发人们对数字媒体版权保护的关注。数字水印技术(Digital Watermarking)<sup>[1]</sup>是近年来出现的数字产品版权保护技术, 它使数字产品携带版权保护信息和认证信息, 以鉴别非法复制和盗用的数字产品, 从而保护数字产品的合法拷贝和传播。数字水印算法有三大特征要求: 不可感知性(Imperceptibility)、鲁棒性(Robustness)和嵌入容量(Capacity)。较早的数字水印算法<sup>[2]</sup>基于空间域, 具有算法简单、速度快、嵌入容量大等优点, 但鲁棒性较差, 因此目前大多研究在变换域中嵌入水印的算法。常用的变换有离散傅里叶变换(DFT)<sup>[3]</sup>、离散余弦变换(DCT)<sup>[4]</sup>、离散小波变换

(DWT)<sup>[5]</sup>等。变换域水印算法各有特点, 能抵抗住一种或几种攻击, 与空间域算法相比有更好的稳健性, 但嵌入量非常有限。理想的水印算法应在满足不可感知性的基础上, 既能隐藏大量数据, 又可以抗各种信道噪声和信号变形。然而实际上这些性能指标往往不能同时满足, 因此一般是针对不同的应用而有所侧重。

矢量量化(VQ)<sup>[6]</sup>作为近年来发展起来的一项重要的图像压缩技术, 其简单性和有效性已经得到了证实, 目前广泛应用于语音编码、图像和视频压缩系统。将矢量量化的思想应用于数字水印, 能够在保证一定鲁棒性的基础上大大提高嵌入水印的容量。特别是对于矢量量化的图像压缩, 这类数字图像水印算法有更好的鲁棒性。

文中在介绍水印技术和矢量量化的基础上, 阐述了基于矢量量化的数字图像水印技术, 分析了已经提出的几种典型基于矢量量化的数字图像水印算法。

## 1 矢量量化

矢量量化是一种将实际信号之间的相关性考虑后

收稿日期: 2007-10-09

基金项目: 江苏省“六大人才高峰”资助项目(DZXX23)

作者简介: 陈佳萍(1982-), 女, 江苏无锡人, 硕士研究生, 研究方向为信息安全、数据融合; 张登银, 博士, 副研究员, 研究方向为无线IP与多媒体应用、计算机网络。

再进行编码的量化手段,在图像压缩领域引起了越来越多的重视。传统的均匀量化和非均匀量化方法是对信号的各个取样点进行逐点量化,而矢量量化把若干个取样点集成为一个矢量作为量化单位,而不是以单独的点进行量化,符合数字图像各像素点具有相关性的特点。

定义 1: 矢量量化是把一个  $k$  维矢量  $X \in \tilde{X} \subset R^K$  映射为另一个  $k$  维矢量  $Y \in \tilde{Y}_N = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_N | Y_i \in R^K\}$ , 即  $Y = Q(X)$ 。其中  $X$  为输入矢量;  $\tilde{X}$  为信源空间;  $R^K$  为  $k$  维欧氏空间;  $Y$  为量化矢量,  $Y_i = \{Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{ik}\}$  为码书中的  $k$  维码字;  $\tilde{Y}_N$  为输出空间(大小为  $N$  的码书);  $Q(\cdot)$  为量化符号。

定义 2: 失真测度  $d(X, Y)$  是一个由乘积空间  $\tilde{X} \times \tilde{Y}_N$  到非负实轴的映射, 即:  $d: \tilde{X} \times \tilde{Y}_N \rightarrow [0, \infty]$

定义 3: 信源空间  $\tilde{X}$  的任一矢量  $X, X \in S_j$ , 如果它和码字  $Y_j$  的失真小于它和其他码字  $Y_i \in \tilde{Y}_N$  的失真, 即  $S_j = \{X | X \in \tilde{X}, \text{且 } d(X, Y_j) \leq d(X, Y_i), i \neq j, \forall i \in I_N\}$  则  $S_j$  为其中一个最佳划分。

定义 4: 给定划分  $S_i$  后, 为了使码书的平均失真最小, 码字  $Y_i$  必须为相应划分  $S_i (i=1, 2, \dots, N)$  的形心, 即  $Y_i = \min_{Y \in R^K}^{-1} E[d(X, Y) | X \in S_i]$ , 这样得到的码书  $\tilde{Y}_N$  为最佳码书。

矢量量化的过程如图 1 所示, 是对照最佳码书将划分好的图像块映射到码书的索引值然后进行传输, 从而达到压缩目的的过程。整个过程包括码书设计、编码和解码 3 个关键环节。

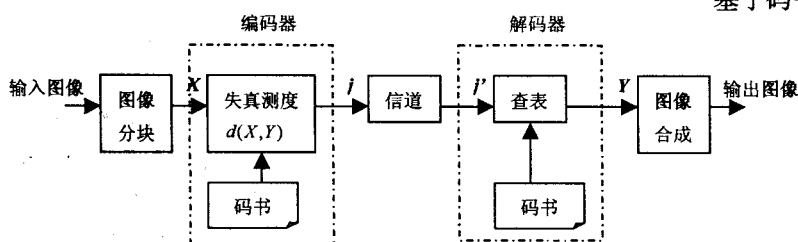


图 1 矢量量化示意图

### (1) 码书设计。

码书设计是矢量量化中的一个关键问题。码书设计越适合带编码的图像类型, 矢量量化器的性能越好。因为不可能为每一幅待编码的图像单独设计一个码书, 所以通常是以一些代表性的图像构成的训练集为基础, 为一类图像设计一个码书。码书设计就是在给定训练矢量集的基础上由初始码矢量寻找最佳划分, 并以量化误差最小为准则不断修正码矢量, 得到最佳

码书的过程。码书设计常用的算法是 LBG(Linde - Bray - Guzo)<sup>[7]</sup>。

### (2) 编码。

在编码阶段, 图像分块中的  $k$  个像素构成一个  $k$  维矢量  $X$ 。将得到的每个矢量  $X$  与码书中预先按一定顺序存储的码矢量集合  $\{Y_i | i=1, 2, 3, \dots, N\}$  相比较, 得到距离最近的码字  $Y_j$ , 并将该码字的索引值  $j$  存入索引表。编码结束后, 将索引表存储或者通过网络进行传输。

### (3) 解码。

在解码阶段, 根据此索引表从相同的码书中找到相应的码字, 并用其替换原始图像中相应矢量构成的区块以恢复图像。

## 2 基于矢量量化的数字图像水印算法

在大多数水印处理系统中, 嵌入水印的图像在传输之前常需要进行编码以便于传输。含水印图像对于有损压缩必须具备足够的稳健性。由于 JPEG 是目前静态图像压缩标准, 所以文献中绝大多数水印技术都基于离散余弦变换或小波变换以增强抗 JPEG 压缩的能力。近年来, 矢量量化技术开始应用到实际的语音编码和图像压缩中。矢量量化技术因其高压缩率和在多媒体信息中的应用越来越受到重视, 这也促使人们开始致力于矢量量化数字水印技术的研究。目前国内对这方面的研究几乎没有, 国外虽然有研究者提出了一些算法, 但还不成熟。文中对已经提出的矢量量化水印算法进行了归类, 并对每一类算法的特点进行了归纳。

### 2.1 基于码书划分的 VQ 水印算法

基于码书划分的 VQ 数字图像水印算法是用得比较多的一种算法, 主要是通过 VQ 索引值携带秘密的版权信息实现嵌入水印。码书划分的目的是把相邻码字归为一个簇集。

定义 5: 对于给定失真阈值  $D > 0$ , 如果  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_M\}$  满足以下 4 个条件, 则  $S$  为码书  $\tilde{Y}_N$  对于域值  $D$

的划分。

- 1)  $S = \bigcup_{i=1}^M S_i$
- 2)  $S_i \cap S_j = \emptyset \quad (\forall i \neq j)$
- 3)  $d(Y_l, Y_p) \leq D \quad (\forall Y_l, Y_p \in S_i)$
- 4)  $||S_i|| = 2^{n(i)}$

其中  $1 \leq i, j \leq M, 0 \leq l, p \leq N-1$ ;  $d(Y_i, Y_j)$  为  $Y_j$  到  $Y_i$  的欧几里得距离;  $||S_i||$  为子集  $S_i$  中的码字个

数; $n(i)$ 为自然数,对应于子集 $S_i$ 中的水印信息量(比特)。

在嵌入水印之前,载体图像首先要进行分块。对于分成的每一块,从码书中找到与之最相配的码字,获得索引值。然后根据相应的嵌入算法对这个索引值进行修改。如果在嵌入算法中保证输入矢量的最近码字和含水印码字落在同一子集内,根据定义5可知由于码字改变所引起的平均额外失真将不会超过失真阈值 $D$ 。所以,如何获得一个优化的码书划分是这一类矢量量化数字图像水印算法的关键问题。文献[8]的码书划分由Tabu搜索算法<sup>[9]</sup>生成;文献[10]的码书划分则是先由LBG算法获得基本码书,然后在阈值范围内扩充码书得到的。这两种码书划分方法都能保证不可感知性。

该类算法<sup>[11]</sup>的特点是对水印的加密基于矢量量化,大大提高了水印的嵌入容量;码书是公开的,码书划分是私钥;对于运用性能较优码书的VQ压缩,JPEG压缩和空间处理有鲁棒性,但对运用低性能码书的VQ压缩和旋转比较脆弱。

## 2.2 基于索引属性的VQ水印算法

这类水印算法的主要思想是利用相邻索引值的相关性。文献[12]提出了一种利用邻近VQ索引值的相关性将水印信息(二值图像)嵌入到公钥中的算法。该算法首先将大小为 $M_w \times N_w$ 的二值图像水印 $W$ 用密钥 $K_1$ 随机置乱得到嵌入水印 $W_p$ ,然后将大小为 $M \times N$ 的原始图像 $X$ 分割为 $M_w \times N_w$ 个大小为 $M/M_w \times N/N_w$ 的图像块实施嵌入,嵌入算法步骤如下:

Step1:矢量 $x(m, n)$ ,  $m = 1, 2, \dots, M_w$ ,  $n = 1, 2, \dots, N_w$ 用来表征每个图像块。对照用LBG算法生成的码书 $C$ 进行VQ编码,将得到的索引值 $y(m, n)$ 代替 $x(m, n)$ ;

Step2:由索引矩阵 $Y = \{y(m, n)\}$ ,生成方差矩阵 $D = \{\sigma^2(m, n)\}$ ,其中 $\sigma^2(m, n)$ 是以索引 $y(m, n)$ 为中心的矩形窗的方差。

Step3:对于给定阈值 $T$ ,由方差矩阵得到极性矩阵 $P = \{p(m, n)\}$ ,当 $\sigma^2(m, n) > T$ 时,则 $p(m, n) = 1$ ,否则为0。

Step4:得到公钥 $K_2$ ,  $K_2 = P \oplus W_p$ ;

Step5:由索引表查找码书重构图像块,将图像块合成得到水印图像 $X'$ ;

发送端将公钥 $K_2$ 和水印图像 $X'$ 一起发送传输。接受端在收到水印图像 $X'$ 后用上述步骤1~4得到 $P'$ ,再由 $W_p' = P' \oplus K_2$ 得到嵌入水印,最后利用密钥 $K_1$ 提取出原始水印 $W'$ 。

该算法用索引值来进行嵌入,大大简化了处理复

杂度。而且秘密信息被嵌入至公钥中,称为“零水印”,不会影响水印图像的质量,所以不可感知性可以得到很好的保证。对JPEG、VQ、filtering、旋转、抖动、切割都有很好的鲁棒性。但该算法在没水印的情况下也能提出水印,虚警率较高。而且码书必须作为一个密钥,不然用户也可以嵌入自己的水印。

## 2.3 多级VQ水印算法

该类水印的基本思想把嵌入的任务分级进行。如图2所示,第一级用小码书对输入矢量进行比较粗糙的量化。在第一级别码书中找到其最相近码字后,用原始矢量减去该码字得到误差矢量。第二级对第一级的量化误差矢量进行量化,以减少量化误差。第三级再对第二级的量化误差矢量进行量化以进一步减少量化误差。依此类推,级数越多,量化误差越小。多级量化的优点是可以降低计算量和存储量。

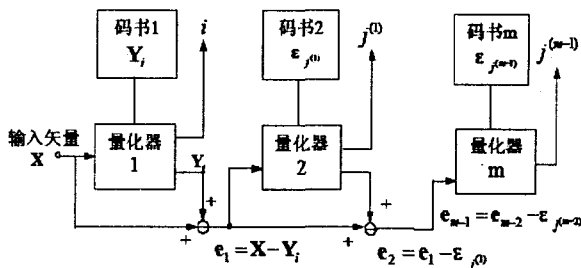


图2 多级量化

文献[13]提出了一种二级矢量量化数字水印图像算法。它利用上面提到的基于索引属性的水印算法在第一级VQ编码时嵌入强水印信息,再在第二级VQ编码时用一种简单的索引约束算法(ICVQ)嵌入弱水印。受到攻击后的水印图像索引值会变化,但是相邻索引值之间的差异变化很小,所以第一级水印有很好的鲁棒性,可用来进行版权保护。另外,ICVQ中,索引值的变化导致提出水印比特的变化,所以第二级水印是脆弱的,可用来进行图像认证。

多级水印算法的优点是可以嵌入多种水印来达到多种目的(数字签名,图像认证,版权保护等)。它采用多级矢量量化,可以减少传输比特数。缺点是这类算法水印图像的质量不是很高,嵌入的弱水印还不能识别受到攻击的类型以及多个水印嵌入顺序不同效果就不同。

## 3 VQ数字水印算法分析

为了比较基于矢量量化水印算法与其他域水印算法的性能,在 $512 \times 512$ 的Lena载体图像嵌入水印来考察不同算法的容量和不可感知性,表1列出了这些算法的嵌入容量以及原始图像和水印图像间的PSNR值。可以看出基于矢量量化的数字图像水印算法与在

其它域嵌入水印的算法相比较,水印嵌入量要大很多。但也可看到,当在原始图像中嵌入的水印容量增大后,PSNR 值也下降了。这正是水印系统的矛盾所在——水印系统的性能只能是各项性能指标的折衷。基于矢量量化的水印算法是以牺牲不可感知性来换取高嵌入容量的。所以 VQ 水印算法的目标是在嵌入水印容量一定时最大限度地保证不可感知性和鲁棒性。

表 1 不同水印算法的容量和 PSNR

算法	容量(水印大小)	PSNR
基于 DCT 的图像公开水印算法 <sup>[4]</sup>	4096 bits 64×64;1 bit/pixel	36.81 dB
基于 DWT 的鲁棒盲水印算法 <sup>[5]</sup>	356 bits;1 bit/pixel	44.8 dB
基于矢量量化的图像水印算法 <sup>[10]</sup>	32768 bits 64×64;8 bits/pixel	30.59 dB
基于矢量量化的鲁棒高效率水印算法 <sup>[12]</sup>	16384 bits 128×128;1 bit/pixel	31.53 dB
一种基于矢量量化的图像信息隐藏算法 <sup>[11]</sup>	524288 bits 256×256;8 bits/pixel	28.83 dB

矢量量化数字水印算法最大的优点,是提高了水印嵌入的容量。但是文献[14]指出随着水印容量的增加,误警率(BER)也会增大。

基于矢量量化的数字图像水印算法的特点,可以归纳为:

(1) 矢量量化用码书中的索引值代替矢量,使图像处理过程变得更加简便,从而简化了水印算法,使嵌入和提取的效率有了很大提高。

(2) 用索引值代替矢量必然引入额外失真,但是如果能够获得一个优化的码书划分,就能够最大限度地保证水印算法的不可感知性。

(3) 水印的嵌入基于矢量量化,对于图像的矢量压缩处理,该类算法有更好的鲁棒性。

(4) 矢量量化起初用于压缩,基于压缩的理论可以使嵌入的水印容量明显提高,减少信息的传输量。

(5) 水印的嵌入和提取都是基于码书,码书的设计至关重要。现在主要是用全局搜索方法来获得码书,这种方法开销比较大。所以要找到一种更加优化的码书设计算法来提高矢量量化水印算法的效率。

## 4 结束语

基于矢量量化的数字水印因其高嵌入容量受到很多学者的青睐,各种研究算法陆续出台。文中首先介绍矢量量化技术,然后阐述了基于矢量量化数字水印算法的基本原理,通过对水印算法的分析,归纳了基于矢量量化数字水印算法的特点。基于矢量量化的数字水印算法在嵌入容量和算法易行性方面有绝对优势,对于 VQ 压缩有很好的鲁棒性。但是水印图像的质量和鲁棒性对于版权保护来说还有待提高,今后可以考

虑结合 DCT、DWT 来改善。同时,在现有算法中没有考虑到人类视觉特性,可以考虑结合 HVS 设计算法来提高水印的不可感知性。利用多级矢量量化嵌入多重水印的顺序对水印系统的影响也是研究的一个方向。

## 参考文献:

- [1] Cox I J, Miller M J, Bloom J A. Digital Watermarking[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [2] Van Schyndel R G, Tirkel A Z, Mee N, et al. A digital watermark[C]//First IEEE Image Processing Conference. Houston, TX: [s. n.], 1994: 86-90.
- [3] Fung W W L, Kunisa A. Rotation, scaling, and translation - invariant multi-bit watermarking based on log-polar mapping and discrete Fourier transform[C]//IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). Amsterdam: [s. n.], 2005.
- [4] Yang Hengfu, Chen Xiaowei. Image-adaptive Public Watermarking Based on DCT[J]. Computer Engineering, 2003, 15(29): 88-90.
- [5] Hongmei, Liu Jiufen, Huang Jiwu, et al. A robust DWT-based blind data hiding algorithm[J]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2002(2): 672-675.
- [6] Gersho A, Gray R M. Vector Quantization and Signal Compression[M]. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [7] Linde Y, Buzo A, Gray R M. An algorithm for vector quantizer design[J]. IEEE Trans COM, 1980, 28(1): 84-95.
- [8] Lu Z M, Sun S H. Digital image watermarking technique based on vector quantization[J]. Electron. Letters, 2000, 36(4): 303-305.
- [9] Glover F, Laguna M O. Tabu search[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [10] Lu Zhe-ming, Pan Jeng-shyang, Sun Sheng-he. VQ-based digital image watermarking method[J]. Electronics Letters, 2000, 36(6): 1201-1202.
- [11] Wang Feng-Hsing, Pan Jeng-Shyang, Jain L C, et al. A VQ-Based Image-in-Image Data Hiding Scheme[C]//IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). Taipei, Taiwan: [s. n.], 2004.
- [12] Huang H C, Wang F H, Pan J S. Efficient and robust watermarking algorithm with vector quantization[J]. Electronics Letters, 2001, 37(13): 826-828.
- [13] Lu Z M, Xu D G, Sun S H. Multipurpose image watermarking algorithm based on multistage vector quantization[J]. IEEE Trans. Image Process., 2005, 14(6): 822-831.
- [14] Zhang Fan, Zhang Hongbin. Capacity and reliability of digital watermarking[C]//IEEE International Conference on the Business of Electronic Product Reliability and Liability. Beijing: [s. n.], 2004: 162-165.