# 基于 PSNR 空域量化索引调制水印参数定量估算

# 景 丽 李淑红

(河南财经政法大学计算机与信息工程学院 郑州 450002)

摘 要 量化索引调制方法是常用的水印嵌入和信息隐藏方法,量化步长是该方法中决定嵌入深度的参量,目前往往 是通过反复试验方法确定该参量的取值,因此影响水印嵌入速度。针对此问题,以抖动量化调制方法为例,根据量化 误差的分布情况给出了基于量化步长的量化误差定量估算;以该定量估算为基础,以空域像素为量化系数推导出了量 化步长、水印数据量与 PSNR之间的定量关系式。实验结果显示,在相同情况下通过实验测得的 PSNR 值和定量关系 式计算的 PSNR 值基本一致,验证了推导的定量关系式的正确性。

关键词 量化索引调制,空域,PSNR,量化步长,量化误差,量化系数

中图法分类号 TP309 文献标识码 A

# Quantitative Estimation of Parameters in Quantization Indexing Modulation Watermarking Method of Spatial Domain Based on PSNR

JING Li LI Shu-hong

(School of Computer and Information Engineering, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** Quantization Indexing Modulation (QIM) method is usually used in watermarking and information hiding. Quantization step is a key parameter of quantization modulation method. Its value connects with watermark embedding degree. Now there is no theoretical method to decide its value except through experiments, and this will reduce watermark inserting efficiency. To overcome this difficulty, a quantitative estimation method of quantization error for Ditherquantization Modulation was provided based on its distribution at first. Then based on the estimation method, selecting spatial pixels as quantization coefficients, the quantitative relationship equation of quantization step, watermark sequence length and PSNR was deduced. Experiments results show PSNR values calculated through quantitative equation are in good agreement with those obtained from experiments under equal conditions. It demonstrates that the deduced quantitative relationship equation is accurate.

Keywords Quantization indexing modulation(QIM), Spatial domain, Peak signal-to-noise ratio (PSNR), Quantization step, Quantization error, Quantization coefficients

## 1 引言

量化索引调制是一种经典的水印嵌入与提取技术,其由 于信息容量大、盲检测、计算复杂度低、容易实现等优点,目前 广泛应用于水印嵌入和信息隐写领域<sup>[1-4]</sup>。量化索引调制方 法是 Chen 等<sup>[5]</sup>在前人工作基础上总结出的一种水印嵌入算 法,该算法首先根据水印信息对量化器的索引值进行调制,然 后根据索引值对应的量化器对载体信号进行量化。随后 Chen 等对 QIM 算法进行改进,提出了抖动量化调制(DM)、 带失真补偿的抖动量化调制(DC-DM)和扩展变换抖动调制 (STDM)<sup>[6,7]</sup>。其中 DM 由于操作简单、容易实现而被广泛应 用。

在设计具体量化调制水印方案时,需要确定水印数据量、

量化参数和量化步长等参量取值,这些参量的取值大小关系 到算法的性能<sup>[8,9]</sup>。水印量由待嵌入的水印信息确定,量化 系数由水印嵌入位置确定,这两个参量由客观要求所决定。 而量化步长对应于水印嵌入深度,可以进行局部调节,是影响 算法性能的一个关键参量,当水印数据量和量化系数一定时, 其取值大小直接影响到含水印图像的视觉质量和水印鲁棒性 之间的关系。量化步长取值增大,水印的鲁棒性增强,水印不 容易被擦除,但是含水印图像的视觉质量会随之降低,即水印 的不可感知性降低;相反,量化步长取值减小,水印的鲁棒性 减弱,但是含水印图像将保持好的视觉质量,水印的不可感知 性增强。鲁棒性和不可感知性是数字水印要满足的两个重要 特性,而且是相互矛盾的,在设计水印算法时要考虑二者之间 的平衡问题,量化步长是量化调制水印算法中平衡二者关系

到稿日期:2013-01-24 返修日期:2013-03-29 本文受国家自然科学基金项目(61202285),河南省政府决策研究项目(2012B026),河南省科 技攻关项目(122102310301)资助。

景 酮(1971-),女,博士,副教授,主要研究方向为图像处理、多媒体信息安全,E-mail;jingli776@126.con;李淑红(1972-),女,博士,教授,主 要研究方向为图像处理、多媒体信息安全。 的关键参量。目前很多文献在使用量化调制嵌入水印时是通 过反复试验确定量化步长值,即首先设定一个量化步长值嵌 入水印,然后根据含水印图像的视觉质量调整量化步长值,如 此反复,直到含水印图像的鲁棒性和视觉质量达到一定的折 中时为止。这种试验方法的缺点是反复试验花费时间长且很 难得到一个较好均衡鲁棒性和不可感知性之间的量化步长 值,影响了其实用性。

为了解决这个问题,本文以抖动量化调制方法为研究对 象,以灰度图像的空域像素为量化参数,根据量化误差的分布 情况,对量化误差进行估算,在此基础上推出量化步长与含水 印图像视觉质量评价参量 PSNR 之间的定量关系式。这样, 在设计水印方案时根据对含水印图像 PSNR 的要求,不用反 复试验,直接推导出量化步长值。定量估算量化步长和图像 质量 PSNR 之间的定量关系,有利于平衡不可见性和鲁棒性 之间的矛盾,而且在水印嵌入时无需反复试验来确定量化步 长值,提高了水印系统的运行效率。

## 2 抖动量化调制方法

抖动量化调制首先根据水印信息对载体信号进行抖动, 然后采用与水印信息相对应的量化器对经过抖动的载体信号 进行量化,实现水印信息的嵌入。

最常用的抖动量化调制方法是奇偶量化调制方法,即根 据水印 bit 位把对应的载体数据量化调制到奇数区间或偶数 区间,如图1所示。图1是双极性数据,即载体数据既有正 数,也有负数(如离散 DCT 系数和 DWT 系数)。



图1 奇偶量化调制示意图

设载体数据是 P={p(1),p(2),…,p(N)},水印是 W= {w(1),w(2),…,w(N)},下面是具体的奇偶量化调制方 法<sup>[10]</sup>:

首先利用量化函数给每个载体数据 p(i)(i=1,2,...,N) 设置奇偶标志"0"或"1",量化函数如下式:

 $Q(i) = \begin{cases} 0, \text{ if } k \leq p(i)/D < (k+1), \ k=0, \pm 2, \pm 4, \cdots \\ 1, \text{ if } k \leq p(i)/D < (k+1), \ k=1, \pm 3, \pm 5, \cdots \end{cases}$ 

(1)

式中,D表示量化步长。

然后利用下式计算量化误差:

$$x(i) = p(i) - \left\lfloor \frac{p(i)}{D} \right\rfloor \cdot \mathbf{D}$$
(2)

式中,し・」表示向下取整。

在对载体数据 p(i)进行量化时,为了增强鲁棒性,应尽 量使修改后数据的数值处于相应的量化区间的中间<sup>[11]</sup>。载 体数据的修改量由下式确定:

$$u(i) = \begin{cases} -x(i)+0.5D, & \text{if } Q(i) = w(i) \\ -x(i)+1.5D, & \text{if } Q(i) \neq w(i), x(i) > 0.5D \\ -x(i)-0.5D, & \text{if } Q(i) \neq w(i), x(i) \leqslant 0.5D \end{cases}$$
(3)

最后通过下式修改载体数据得到嵌入水印的数据 p'(i): p'(i) = p(i) + u(i) (4)

从上述奇偶量化调制过程可以看出,载体数据的量化误差分布在区间[-D,D]上。

上述量化调制方法描述了奇偶量化调制的整个过程,为 了计算方便,往往使用下面的量化调制公式,可以得到相同的 量化调制结果。

$$p_{i}' = \begin{cases} \lceil round(P(i)/D) - 0.5 \rceil \times D, \\ if \lceil round(P(i)/D) + w(i) \rceil \mod 2 = 1 \\ \lceil round(P(i)/D) + 0.5 \rceil \times D, \\ if \lceil round(P(i)/D) + w(i) \rceil / \mod 2 = 0 \end{cases}$$
(5)

式中,round()是就近取整。

## 3 量化步长与 PSNR 的定量关系

量化调制带来的图像失真是由量化误差引起的。所谓量 化误差,就是载体数据被量化调制前后的改变量。由于在水 印嵌入前无法精确计算量化误差,我们根据量化误差的分布 情况对其进行估算,然后以 PSNR 作为图像失真评价标准、以 图像空域像素灰度值作为量化系数探讨量化步长与含水印图 像质量之间的定量关系。

#### 3.1 量化误差定量估算

峰值信噪比(PSNR)是一种评价图像的客观标准,常用 来定量评价含水印图像的质量。灰度图像 PSNR 的定义如 下:

$$PSNR(I, I') = 10\log_{10} \frac{255^2}{MSE}$$
(6)

式中, $MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I(x,y) - I'(x,y))^2$  是含水印图 像 I'与原始图像 I 之间空域像素的均方误差。M,N 是图像 的两个边长,I(x,y)和 I'(x,y)分别是原始载体图像和含水 印图像对应的像素灰度值。

由 PSNR 的定义可知,在确定量化步长 D 与 PSNR 之间 的数量关系时,需要明确量化调制算法对载体数据量化调制 前后的量化误差。但是精确计算每个量化系数的量化误差困 难很大,我们通过量化误差的分布情况进行定量估算。由量 化调制过程可知,量化误差分布在某一区间,且在该区间服从 均匀分布。因为量化误差的取值落在该区间的概率与区间的 位置无关,只依赖于该区间的长度,所以量化误差在该区间服 从均匀分布。而量化误差的分布区间长度和量化步长取值、 具体的量化调制方法有关。

设 I 是图像载体,p(i)是载体 I 中的部分像素的灰度值, p(i)被量化调制后为 p'(i), $1 \leq i \leq n, x(i) = p(i) - p'(i)$ 是量 化误差,量化误差集合  $X\{x(1), x(2), \dots, x(n)\}$ 中元素相互 独立且服从[-D,D]上的均匀分布,其概率密度是:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2D}, & x \in [-D, D] \\ 0, & x \notin [-D, D] \end{cases}$$
(7)

所以,X的数学期望 $E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx = \int_{-D}^{D} \frac{x}{2D}dx$ • 129 •

=0,进一步有 
$$E(X^2) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx = \int_{-D}^{D} \frac{x^2}{2D} dx = \frac{D^2}{3}$$
。  
根据数学期望  $E()$ 和方差  $D()$ 的关系<sup>[12]</sup>  
 $D(X) = E(X^2) - [E(X)]^2$  (8)

可以推出:

$$D(X) = E(X^2) - [E(X)]^2 = E(X^2) = \frac{D^2}{3}$$
(9)

不同抖动量化调制方法的量化误差分布区间是不一样的,如本文讨论的奇偶量化调制方法的量化误差分布区间是 [-D,D],Chen 的抖动量化调制方法的量化误差分布区间是  $\left[-\frac{D}{2}, \frac{D}{2}\right]^{[7]}$ ,Tsai 等人<sup>[13]</sup>的量化调制方法的量化误差分布 为 $\left[-\frac{3}{4}D, \frac{3}{4}D\right]$ 。如果量化误差 X 服从 $\left[-\frac{D}{2}, \frac{D}{2}\right]$ 上的 均匀分布,则 $E(X)=0, E(X^2)=\frac{D^2}{12}, D(X)=\frac{D^2}{12}$ ;如果量化误 差 X 服从 $\left[-\frac{3}{4}D, \frac{3}{4}D\right]$ 上的均匀分布,则 $E(X)=0, E(X^2)$  $=\frac{3}{16}D^2, D(X)=\frac{3}{16}D^2$ 。不管何种量化调制方法,其量化误 差的分布区间都和量化步长相关,在实际应用中对于具体量 化调制方法应首先分析其量化误差分布区间,再按上述方法 计算出量化误差的方差。

### 3.2 空域量化调制中的量化步长定量估算

在空域中通过量化调制嵌入水印,量化系数是空域中随机选取的部分像素,量化误差是像素灰度值量化调制前后的改变量。设水印长度为L,载体图像的大小是 $M \times N$ ,Lbit的水印被随机嵌在L个像素中,I(x,y)是载体图像中的像素灰度值,I'(x,y)是量化调制后的像素灰度值。在量化调制之后图像灰度值的均方误差 MSE 是:

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I(x, y) - I'(x, y))^2$$
(10)

由前设条件可知在 M×N 个像素中,只有 L 个像素被修改,因此有:

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^{L} (I_i(x, y) - I_i'(x, y))^2$$
(11)

因为量化误差均匀分布在区间[-D,D]上,根据 3.1 节的推理结果式(9)可知:

$$E(I_i(x,y) - I_i'(x,y))^2 = \frac{D^2}{3}$$
(12)

由此可以得到:

$$E(MSE) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{L-1} E(I_i(x, y) - I_i'(x, y))^2$$
$$= \frac{L}{M \times N} \cdot \frac{D^2}{3}$$
(13)

设 $\rho = \frac{L}{M \times N}$ 为水印嵌入率,由 PSNR 的定义式(6)可以 得到:

$$PSNR = 10\log\frac{3 \times 255^2}{D^2 \times \rho} \tag{14}$$

进而可以推出:

$$D = 255 \cdot \left[\frac{1}{3}\rho \cdot 10^{\frac{PSNR}{10}}\right]^{-0.5}$$
(15)

由式(14)和式(15)可以看出,在 PSNR 一定时量化步长 与水印的嵌入率有关,嵌入率变大,量化步长就要减小,以保 证嵌入水印图像的 PSNR。同样,在嵌入率一定的情况下,量 化步长越大,PSNR 越小,即含水印图像的质量越差。

含水印图像 PSNR、量化步长值 D、水印数据量三者之间 的关系是:在 PSNR 一定时,量化步长与水印数据量成反比关 系;在水印数据量一定时,PSNR 与量化步长成反比关系;在 量化步长 D 一定时,PSNR 与水印数据量成反比关系。由此 看出三者之间的矛盾关系,在设计水印嵌入算法时,要考虑三 者之间的平衡问题。

#### 4 实验结果与分析

实验选用大小为 512×512 的 Lena 灰度图像作为载体, 水印是随机生成的"0,1"序列,对第 3 节给出的量化步长、水 印数据量与 PSNR 之间的定量关系式进行验证。图像嵌入水 印后计算出的含水印图像的 PSNR 值为实验测得值,利用第 3 节的理论估算式(14)计算出的 PSNR 值为理论估算值,如 果理论估算值和实验测得值拟合得很好,就可以验证本文给 出的理论估算式的正确性。实验中水印嵌入采用式(5)的奇 偶量化调制方法,量化误差分布在[-D,D]上,D是量化步 长。

在测试图像 Lena 中随机选择 N 个像素,每个被选择像 素嵌入 1bit 水印。根据水印位信息对选择像素的灰度值进 行奇偶量化调制嵌入水印,为了检验水印数据量、量化步长与 PSNR 之间的关系,分别设置水印序列的长度 N 为L(512× 512)/100 J,L(512×512)/10 J,L(512×512)/5 J,512×512, 其对应的嵌入率 ρ 分别是 0.01,0.1,0.2,1。

图 2-图 5 分别是嵌入率ρ等于 1,0.2,0.1,0.01 时实验 测得的 PSNR 值和理论估算式(14)计算出的 PSNR 值。从这 几幅图可以看出实验测得值和理论估算值拟合得较好,它们 之间的误差都在 1dB 之内,属于正常的误差范围,实验验证 了本文推理的理论估算值的正确性。实验过程中图像嵌入水 印需要对图像进行离散化和重新合成,像素值会有一定的误 差,因此 PSNR 的实验测得值和理论计算值之间有小的误差 是合理的。



• 130 •

从图 2-图 5 还可以看出,在嵌入率一定时,PSNR 随着 量化步长 D 的增加而减小,因为量化步长增加,水印嵌入深 度加深,量化误差增大,图像的视觉质量随之降低,PSNR 随 之减小;在量化步长一定时,PSNR 随着嵌入率的增加而减 小,因为嵌入率增加说明在相同的载体中嵌入的水印数据量 增加,被量化调制像素增加,从而量化误差增大,PSNR 减小; PSNR 一定时,量化步长随着嵌入率的增加而减小,嵌入率增 加,为了保证一定的 PSNR,水印嵌入深度要减小,量化步长 要减小。

结束语 量化调制方法因其嵌入信息多、计算复杂度低, 在数字水印和信息隐藏领域得到了广泛应用。但是无论是隐 藏信息还是嵌入水印都要保证嵌入后载体的视觉质量,量化 调制方法中影响载体视觉质量的参数有量化步长、水印数据 量和量化系数,水印数据量和量化系数往往是事先确定的,而 量化步长对应于嵌入深度,是可以调节的。目前确定量化步 长值的方法是通过反复试验,在实际应用中进行大批量嵌入 时是不现实的,针对这个问题本文对含水印图像的 PSNR 和 量化步长的定量关系进行了估算,在水印量固定时,根据嵌入 后载体的 PSNR 要求,可以直接计算出量化步长值,无需反复 试验。本文虽仅以奇偶量化调制方法为例进行研究,但研究 结果可以很容易扩充到其它量化调制方法。本文仅对空域像 素这种量化系数进行了研究,实际上量化调制方法还经常用 于其它量化系数,如 DCT 系数、DWT 系数等,我们下一步的 工作是针对这些量化系数对量化步长与视觉质量之间的定量 关系进行研究。

# 参考文献

- [1] Subramanyam A, Emmanuel V, Sabu, et al. Robust Watermarking of Compressed and Encrypted JPEG2000 Images[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2012, 14(3): 703-716
- [2] 凌洁,刘琚,孙建德,等. 基于视觉模型的迭代 AQIM 水印算法

#### (上接第127页)

- [2] Park J S, Sadi M G, Kim D S, et al. A Novel Pairwise Key Predistribution Scheme for Ubiquitous Sensor Network [C] // MADNES 2005. Singapore, 2005; 2-13
- [3] Kausar F, Hussain S, Park J H, et al. A Key Distribution Scheme Preventing Collusion Attacks in Ubiquitous Heterogeneous Sensor Networks[C]//IFIP International Federation for Information Processing 2007. Taipei, Taiwan, 2007;745-757
- [4] Ge H. An Efficient Key Management Scheme for Pervasive computing[C] // IEEE International Conference on Multimedia. Irvine, USA, 2005;657-661
- [5] Moon J S, Park J H, Lee D G. Authentication and ID-Based Key Management Protocol in Pervasive environment [J]. Wireless

[J].电子学报,2010,38(1):151-155

- [3] 邓艺,赵险峰,冯登国.基于非均匀 DCT 的量化索引调制隐写[J].电子与信息学报,2010,32(2):323-328
- [4] 胡青,龙冬阳. 基于 DWT-SVD 的奇异向量量化水印算法[J]. 计 算机科学,2011,38(11):30-33
- [5] Chen B, Wornell G W. Provably robust digital watermarking [C] // Proceedings of SPIE. Vol. 3845 of Multimedia Systems and Applications II, San Jos'e, USA, 1999:43-54
- [6] Chen B, Womell G. Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001,47(4):1423-1443
- [7] Chen B, Wornell G W. Quantization index modulation methods for digital watermarking and information embedding of multimedia [J]. Journal of VLSI Signal Processing Systems, 2001, 27 (1):7-33
- [8] 肖俊,王颖.扩展变换抖动调制水印算法中投影向量的研究[J]. 中国图象图形学报,2006,11(12):1799-1805
- [9] 肖俊,王颖,李象霖.带失真补偿的抖动调制水印算法中的补偿 因子研究[J].电子学报,2007,35(4):786-790
- [10] 李雷达,郭宝龙,武晓钥. 一种新的空域抗几何攻击图像水印算 法[J]. 自动化学报,2008,34(10):1235-1242
- [11] Zhu Xin-shan. Image-adaptive Spread Transform Dither Modulation Using Human Visual Model [C]//Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Security, Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI) 4456. Springer-Verlag, 2007; 913-923
- [12] 肖筱南. 新编概率论与数理统计[M]. 北京:北京大学出版社, 2008:141-142
- [13] Tsai M J, Yu K Y, Chen Y Z, Joint wavelet and spatial transformation for digital watermarking [J]. IEEE Transactions on Consumer electronics, 2000, 46(1): 241-245

Personal Communications, 2009, 50(3): 221-233

- [6] Shamir A. Identity Based Cryptosystems and signature schemes [C]//Proc. CRYPTO'84. New York, USA, 1984: 47-53
- [7] Sun H, Zheng X F, Deng Z Q. An Identity-based and Threshold Key Management Scheme for Ad hoc Networks[C]//IEEE International Conference on Networks Security Wireless Communications and Trusted Computing. Wuhan, 2009; 520-523
- [8] Koblitz P, Menezes P, Vanstone S. The state of elliptic curve cryptography[J]. Designs, Codes and Cryptography, 2000, 19: 173-193
- [9] Barreto P, Kim H, Lynn B, et al. Efficient algorithms for pairingbased cryphosystems [C] // CRYPTO2002. California, USA, 2002;354-368