

基于 FGSE 的快速分形图像编码算法及其多描述编码方案

刘美琴, 赵 耀

(北京交通大学信息科学研究所, 北京 100044)

摘 要: 本文在基于分形图像编码的多描述编码方案(MDFIC)的基础上,做了两处改进:一是引入提出的基于FGSE的快速分形图像编码算法,以提高编码速度;二是利用相邻值域块均值间的相关性,以减少比特率.实验结果表明,本方案与MDFIC相比,可以在保持解码图像质量几乎不变的情况下,提高编码速度和减少比特率,并具有较高的鲁棒性.

关键词: 分形图像编码; 多描述编码; Fine Granularity Successive Elimination (FGSE)

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 03-0658-06

A Fast Fractal Image Coding Algorithm Based on FGSE and Its Multiple Description Coding Scheme

LIU Mei-qin, ZHAO Yao

(Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Multiple description coding (MDC) has emerged as an attractive framework for robust transmission over unreliable channels and it has recently attracted the interest of many researchers. In order to solve that the parameters of fractal image coding are not suitable to be transmitted over the unreliable channels, the multiple description coding scheme based on fractal image coding (MDFIC) was proposed. The paper improves MDFIC on two aspects, i. e. using the fast fractal image coding algorithm based on FGSE to speed up the coding procedure and the corrections between the means of the closed range blocks to reduce the bit rate. Simulation results show that compared with the traditional scheme, with nearly the same quality of the decoded image, the proposed scheme has higher robustness and can efficiently speed up the encoding process and decrease the bit rate.

Key words: fractal image coding; multiple description coding; fine granularity successive elimination (FGSE)

1 引言

为了解决传统图像编码算法在遭受误码或丢包后引起的图像质量下降严重的问题,多描述编码(Multiple Description Coding,简称MDC)在近年来越来越受到研究人员的关注.最典型的MDC模型^[1]是将一个信源编码成两个描述,分别在两个独立的信道上传输.在解码端,当只收到信道1(或信道2)的描述,则通过相应的边缘解码器1(或边缘解码器2)恢复出可以接受的单路重建信号,如果两个信道的描述都收到,则通过中心解码器,恢复出高质量的双路重建信号.

以压缩映射定理、迭代函数系统定理和拼帖定理为理论基础的分形图像编码(Fractal Image Coding,简称FIC)以分形几何为模型,构造原图像的迭代函数系统(Iterated Function System,简称IFS).1987年,M. F. Barsley和A. D. Sloan首先提出了FIC的概念,次年他们又将

Barsley提出的IFS理论^[2]应用到图像编码中,得到了高达10000:1的压缩比^[3],这种压缩方法突破了传统熵压缩编码的思路.1990年,A. E. Jacquin设计了第一个实用的基于块分割的FIC^[4].

由分形图像编解码的原理可知,分形参数稍有变化就会对解码图像质量造成很大的影响,不适宜在传输条件恶劣的信道中传输.因此,我们提出了基于分形图像编码的多描述编码方案(Multiple Description Image Coding based on Fractal Image Coding,简称MDFIC)^[5],该方案将变换后的分形参数分成两个独立的描述,分别在两个独立的信道中传输.本文在MDFIC的基础上做了两处改进,提出了基于FGSE的快速分形图像编码算法及其多描述编码方案(Multiple Description Coding Based on Fast Fractal Image Coding,简称MDFIC):一是利用所提出的基于FGSE的快速分形图像编码算法,以提高编码速度;二是利用相邻值域块均值间的相关性,以减少比特

率,进一步提高编码性能.实验结果表明,所提方案与 MDFIC 相比,不仅提高了编码速度,而且改善了压缩性能,实现了图像的高效鲁棒传输.

2 FIC 及 MDFIC 方案

2.1 Jacquin 编码方案

Jacquin 方案是国内外学者改进 FIC 的主要基础,其编码过程是:

(1)分割图像.将图像分割成若干个互不重叠、大小为 $B \times B$ 的值域块 $R_1, R_2 \cdots R_k \cdots R_N$ 和可以重叠、大小为 $2B \times 2B$ 的定义域块 $D_1, D_2 \cdots D_m \cdots D_M$.

(2)寻找合适的紧缩仿射变换 ω_k ,使得 $\omega_k(D_m)$ 和 R_k 在 Hausdorff 测度下尽可能的接近.在实际应用中, ω_k 等价地分解为几何变换 φ_k 、同构变换 τ_k 和亮度变换 G_k ,即 $\omega_k = G_k \circ \tau_k \circ \varphi_k$.其中 ω_k 将大小为 $2B \times 2B$ 的定义域块抽样为 $B \times B$ 大小的定义域块,得到 $\varphi_k(D_m)$; τ_k 是 4 种对折和 4 种旋转变换,得到 $\tau_k(\varphi_k(D_m))$; G_k 包括尺度因子 s 和补偿因子 o ,得到 $G_k(\tau_k(\varphi_k(D_m)))$.

若 $G_k(\tau_k(\varphi_k(D_m)))$ 和值域块 R_k 满足下式最小,就认为找到了与 R_k 匹配的定义域块 D_m 和变换参数 φ_k, τ_k, G_k :

$$E^2(R, D) = \sum_i \sum_j (r_{i,j}^{(k)} - (s \cdot d_{i,j}^{(m)} + o))^2 \quad (1)$$

其中, $r_{i,j}^{(k)}$ 和 $d_{i,j}^{(m)}$ 分别为值域块 R_k 和经过 φ_k 和 τ_k 变换的定义域块 $\tau_k(\varphi_k(D_m))$ 在 (i, j) 点的像素值.具体过程如图 1 所示^[6].

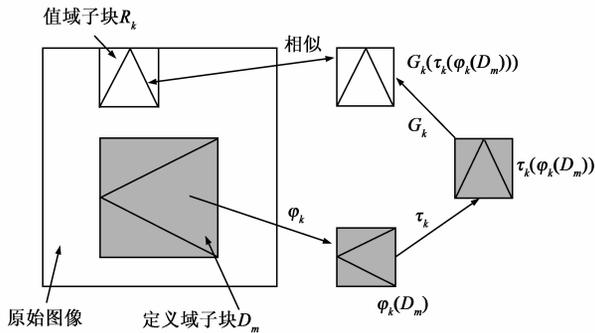


图1 FIC的基本过程

(3)保存分形变换参数.找到所有值域块的最佳仿射变换 φ_k, τ_k, G_k 及定义域块 D_m 后,经量化,就得到整个图像的 IFS.

解码端,利用紧缩仿射变换定理,对任意图像进行若干次迭代后均可恢复出原图像.

2.2 MDFIC

由上文可知,分形解码图像是通过任意初始图像经过若干次迭代而获得的,若分形代码发生微小的变化,解码图像就会受到很大的影响,使它不适宜在恶劣的环境中传输,因此,我们提出了 MDFIC 方案^[5],根据 FIC 参数的特点——每个值域块的分形参数之间存在的相关性和相邻值域块的分形参数之间存在的相关性,修改分形参数以满足多路传输的要求.

由于值域块的最优尺度因子 s 和补偿因子 o 之间的相关性非常强^[7,8],接近 -1 ,而值域块的均值 \bar{R} 与其 s 间的相关性很小,在解码端,用 s, \bar{R} 和匹配定义域块的位置信息 p 采用正交解码同样可以恢复出解码图像^[8],因此 MDFIC 中 FIC 记录的分形参数就为 s, \bar{R} 和 p .对 s 采用基于 A_2 格的多描述矢量量化(Multiple Description Lattice Vector Quantization, MDLVQ)量化为 s_1 和 s_2 .对 \bar{R} 采用多描述标量量化(Multiple Description Coding based on Scale Quantization, MDSQ),量化为 \bar{R}_1 和 \bar{R}_2 .对 p 采用重新匹配,得到在解码端收到一路描述时对应的位置信息 p_1 和 p_2 .解码端对不同的分形参数分别采用不同的解码方式,恢复出双路和单路解码图像.

3 MDFIFC

MDFIFC 在 MDFIC 基础上做了两处改进:一是图像编码方式采用所提出的基于 FGSE 的快速分形图像编码方案;二是 MDFIC 未考虑相邻值域块均值间的相关性,而在 MDFIFC 中考虑了这一相关性,不仅进一步去除了值域块间的相关性,另一方面由于差值的动态范围比均值的小,还减少了量化所需的比特数,从而进一步提高了压缩比.因此,本方案先对值域块的均值采用预测编码,然后采用 MDSQ 将这些系数量化成两路描述后进行传输.图 2 为该方案的实现框图,下文详细介绍各功能模块的实现原理.

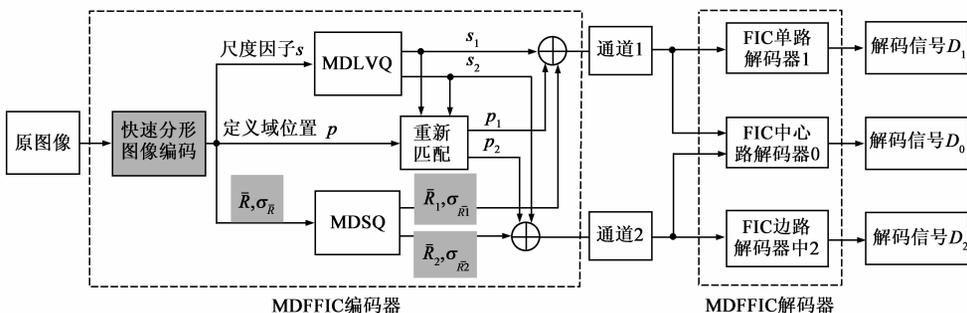


图2 基于快速分形图像编码方案框图(MDFIFC)

3.1 基于 FGSE 的快速分形图像编码方案

MDFVIC 方案采用基于 FGSE 的快速分形图像编码算法.

由第 2 部分可知, Jacquin 方案虽然实现了自动分形图像编码, 但搜索匹配对的过程耗时量非常巨大. 迄今为止, 国内外学者提出的很多提高 FIC 编码速度的算法是以损失解码图像质量为代价. 本文提出的基于 FGSE 的快速分形图像编码算法, 可以不损失解码图像质量, 而提高编码速度.

FGSE^[9]是一种可以达到全局最优的快速块运动估计算法. 它基于和范数的数学不等式排除法, 通过块分割得到一系列精细渐近尺度界值, 依据界值间的关系, 预先排除不可能与当前块匹配的候选块, 节省了尽可能多的计算量, 从而达到快速搜索最优匹配对的效果. 当块大小为 4×4 时, 块分割过程如图 3 所示.

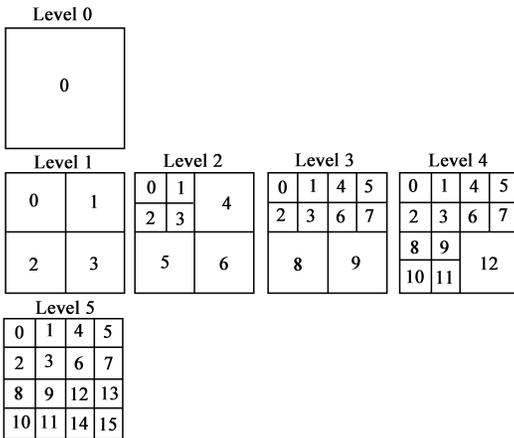


图3 FGSE的块分割过程

由图 3 可以看出 FGSE 的优点: (1) 利用分割产生的界值可以及早的排除大约 90% 的不可能匹配的候选块^[9]; (2) 相邻两层间的差别仅仅是一个子块, 即在 $l-1$ 层未被分割的子块, 在 l 层被分割为四个更小的子块, 其他块的界值保持不变. 因此, l 层的界值 BV_l 可利用 BV_{l-1} , 且界值的计算仅仅是加减操作, 运算非常简单, 极大地减小了计算复杂度; (3) FGSE 是一种可快速、准确的找到全局最优匹配块的运动估计算法.

由上可知, FGSE 与 FIC 类似, 都是在某种误差匹配准则下寻找最优匹配对, 本文依据该思想, 达到在不损失解码图像质量的前提下, 提高编码速度的目的. 基于以下几点, FGSE 不能被直接应用于 FIC 中:

(1) FGSE 寻找的是同尺度的匹配对, 而 FIC 寻找的却是不同尺度的匹配对.

(2) FGSE 采用的误差匹配准则是 SAD (Sum of Absolute Difference, 差值绝对值之和), 而 FIC 采用的是 rms (均方根误差准则) 或者 $E^2(R, D)$ (差值的平方和).

(3) FGSE 只要找到与当前块 SAD 最小的候选块即

可, 而 FIC 还要考虑 s ($|s| < 1$ 压缩映射定理) 和 o 对 $E^2(R, D)$ 的影响.

基于以上几点, 下文先建立 $E^2(R, D)$ 与 SAD 间的关系 (如引理所示)^[10], 同时去除了 s 和 o 对 $E^2(R, D)$ 的影响, 然后利用 FGSE 这种快速运动估计算法来搜索每个值域块的匹配定义域块.

引理 令 R 和 D 分别代表值域块和经过几何变换、同构变换后的定义域块, $\phi(R)$ 和 $\phi(D)$ 分别表示归一化之后的 R 和 D , r_{ij} 和 d_{ij} 分别是 $\phi(R)$ 和 $\phi(D)$ 在 (i, j) 点的像素值. 则 $E^2(R, D)$ 和 SAD 之间的关系为:

$$E^2(R, D) \geq \frac{1}{2} \cdot \|R - \bar{R} \cdot I\| \cdot \text{SAD}$$

其中 $\phi(R) = \frac{R - \bar{R} \cdot I}{\|R - \bar{R} \cdot I\|}$, $\phi(D) = \frac{D - \bar{D} \cdot I}{\|D - \bar{D} \cdot I\|}$, \bar{R} 为值域块 R 的均值, $\text{SAD} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |r_{ij}^2 - d_{ij}^2|$.

证明 FIC 中, R 和 D 的误差准则 $E^2(R, D)$ 为:

$$\begin{aligned} E^2(R, D) &= \min_{D \in \Omega} \min_{g, q} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (R_{i,j} - (g \cdot D_{i,j} + q))^2 \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (R_{i,j} - (s \cdot D_{i,j} + o))^2 \\ &= \|R - (s \cdot D + o \cdot I)\|^2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $N \times N$ 表示块的大小, $R_{i,j}$ 和 $D_{i,j}$ 分别为 R 和 D 在坐标点 (i, j) 的像素值. g 表示尺度因子, q 表示补偿因子. 利用最小二乘法得到最优的尺度因子 s 和补偿因子 o , 为:

$$s = \frac{\langle R - \bar{R} \cdot I, D - \bar{D} \cdot I \rangle}{\|D - \bar{D} \cdot I\|^2}, o = \bar{R} - s \cdot \bar{D} \quad (3)$$

其中: I 表示全 1 矩阵, $\|\cdot\|$ 表示 2-范数, \bar{X} 表示 X 的均值.

由式(2)和式(3)可知:

$$\begin{aligned} E^2(R, D) &= \|R - \bar{R} \cdot I\|^2 - s^2 \cdot \|D - \bar{D} \cdot I\|^2 \\ &= \frac{1}{4} \|R - \bar{R} \cdot I\|^2 \\ &\quad \cdot \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (r_{ij} - d_{ij})^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (r_{ij} + d_{ij})^2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中:

r_{ij} 和 d_{ij} 分别为 $\phi(R) = \frac{R - \bar{R} \cdot I}{\|R - \bar{R} \cdot I\|}$ 和 $\phi(D) = \frac{D - \bar{D} \cdot I}{\|D - \bar{D} \cdot I\|}$

在 (i, j) 点的像素值, 且有 $\sum_{i=1}^{N \times N} (r_{ij})^2 = \sum_{i=1}^{N \times N} (d_{ij})^2 = 1$.

又 $\sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n b_i^2}$, $a_i, b_i \geq 0$ (柯西不等式), 得到:

$$E(R, D) \geq \frac{1}{2} \cdot \|R - \bar{R} \cdot I\| \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |r_{ij}^2 - d_{ij}^2| \quad (5)$$

若令 $SAD = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |r_{ij}^2 - d_{ij}^2|$, 则有:

$$E(R, D) \geq \frac{1}{2} \cdot \|R - \bar{R} \cdot I\| \cdot SAD \quad (6)$$

证毕.

该引理就是所提算法的基本依据. 式(6)和式(2)相比, 去除了 s 和 o 对 $E(R, D)$ 的影响, 也将 $E(R, D)$ 与 SAD 联系起来. 对于给定 R , $\frac{1}{2} \cdot \|R - \bar{R} \cdot I\|$ 是常数, 不影响不等号的方向, 因而可以先利用 FGSE 搜索出 SAD 准则下的最匹配块, 再进行一次搜索就可以找到 FIC 中的给定值域块的最优匹配定义域块.

当图像块的大小为 4×4 时, FGSE 的分割层数为 $L = 5$, 得到 6 个界值 ($BV_l, l = 0, 1, 2, 3, 4, 5$), 界值间的关系为:

$$SAD = BV_5 \geq BV_4 \geq BV_3 \geq BV_2 \geq BV_1 \geq BV_0 \quad (7)$$

由引理和式(7)可得:

$$\frac{2 \cdot E(R, D)}{\|R - \bar{R} \cdot I\|} \geq SAD = BV_5 \geq BV_4 \geq BV_3 \geq BV_2 \geq BV_1 \geq BV_0 \quad (8)$$

式(8)就是本算法的理论支柱, 对于任意的 R 和 D , 若 $E(R, D)$ 很小, 则 R 和 D 的 SAD 也很小; 若 R 和 D 的 SAD 很大, 那么 $E(R, D)$ 也会很大, 导致 R 和 D 根本不可能是最优的匹配对. 换句话说, 该式表明除非 R 和 D 的 SAD 很小, 否则二者就一定不是匹配对.

实际操作时, 先计算 r_{ij}^2 和 d_{ij}^2 , 分别用 a_{ij} 和 b_{ij} 表示, 即 $a_{ij} = r_{ij}^2, b_{ij} = d_{ij}^2$; 与 FGSE 类似, 界值用 $BV_l = \sum_{l=0}^{s_l-1} |a_{n(k,l) \times n(k,l)}^{(k)} - b_{n(k,l) \times n(k,l)}^{(k)}|$ ($l = 0, 1, 2, 3, 4, 5$) 表示, 其中 $a_{n(k,l) \times n(k,l)}^{(k)}, b_{n(k,l) \times n(k,l)}^{(k)}$ 表示 $\phi(R)$ 和 $\phi(D)$ 第 l 层分割后第 k 个子块的和范数, $n(k, l) \times n(k, l)$ 是第 l 层第 k 个子块的尺度, $s_l = 3 \cdot l + 1$ 表示第 l 层的子块数. 此处的 SAD 虽与 FGSE 中形式类似, 但本质不同, 它表示归一化后值域块和定义域块像素平方差的绝对值之和. 下面列出在定义域池中搜索某一给定值域块的最优匹配块的过程:

(1) 令 $E(R, D)_{\min} \rightarrow \infty$, 阈值 $T = 2 \cdot E(R, D)_{\min} / \|R - \bar{R} \cdot I\|$, 并初始化: $l = 0$.

(2) 计算界值 BV_l . 若 $BV_l \geq T$, 转(5), 否则令 $l = l + 1$.

(3) 重复(2)直到 $l = 5$. 若 $BV_5 \geq T$, 转(5), 否则计算 $E(R, D)$.

(4) 若 $E(R, D) \geq E(R, D)_{\min}$, 转(5), 否则用 $E(R, D)$ 更新 $E(R, D)_{\min}$.

(5) 检测下一个定义域块并重复上述步骤.

对于所有的值域块都要执行上述操作来搜索其匹

配块.

综上所述, 该算法利用 FGSE 渐近排除法, 在计算 $E(R, D)$ 之前排除了大量不可能与值域块匹配的定义域块, 这是安全的, 不会对解码图像质量造成影响, 同时还可以加快搜索匹配对的进程.

3.2 MDLVQ

与 MDFIC 类似, 该方案对尺度因子 s 采用 MDLVQ 来处理. 由于相邻值域块对应的 s 间仍然存在一定的相关性^[7,8], 因此, 该方案将相邻值域块的 s 组成一个 2-维矢量, 采用基于 A_2 格的格型矢量量化^[11]量化为 s_1 和 s_2 , 分别在两个独立信道上传输 (显然有 $s \neq s_1, s \neq s_2$).

3.3 重新搜索匹配块

在只收到一路描述时, 由于 $s \neq s_1, s \neq s_2$, 若仍利用 FIC 找到的 p 和 s 就不可能恢复出与其匹配的值域块. 因此, 为使在只收到一路描述的情况下也可恢复出原始图像, 需要重新搜索与值域块匹配的定义域块. 本方案采用与 MDFIC 方案中重新搜索匹配块相同的方法, 根据接收到的信息分别在对应域池中搜索值域块的匹配块, 在此不再赘述.

3.4 MDSQ

与 MDFIC 类似, 本方案对 \bar{R} 采用 MDSQ^[12]量化为 \bar{R}_1 和 \bar{R}_2 . 不同的是 MDFIC 还考虑了相邻值域块均值间的相关性, 对它们之间的差值 σ_R 采用预测编码后进行 MDSQ, 量化为 σ_{R_1} 和 σ_{R_2} , 不仅可以进一步去除值域块间的相关性, 而且由于差值的动态范围比均值的小, 也可以减少量化所需的比特数, 从而进一步提高压缩比.

3.5 单路和双路解码器

该方案的解码端与 MDFIC 类似, 对接收到的分形参数分别采用不同的解码方式. 另外, 由于在发送端对值域块均值采用预测编码, 所以在接收端需进行相应的解码, 最后将得到的分形参数在任意初始图像上迭代若干次后, 恢复出解码图像.

4 实验结果与分析

仿真实验采用大小为 512×512 (8 bits/pixel) 的经典图像 “Lena”、“Girl”、“Peppers” 来评估 MDFIC 的性能. FIC 采用基于 FGSE 的快速分形图像编码方案. 图像分割采用二叉树, 分割深度为 5, 6, 7, 即值域块的大小分别为 $4 \times 4, 8 \times 8, 16 \times 16$, 定义域块的步长与值域块的尺度相同. 用 3 比特量化尺度因子, 7 比特量化值域块的均值, 4 比特量化相邻值域块均值的差. 实验结果如表 1 所示, 与 MDFIC 相比, MDFIC 在解码图像质量稍有损失的情况下, 不仅提高了编码速度, 还提高了编码效率. 具体分析如下:

(1) 解码质量的轻微下降. 由第3部分可知, 基于FGSE的快速分形图像编码算法是不会对解码图像质量造成损失的, 此处的损失是在编码过程中, 由于量化、传输相邻值域块的均值之差引起的.

(2) 编码速度提高了30%左右. 经过实验分析可知, 基于FGSE的快速分形图像编码算法在计算 $E(R, D)$ 前, 可以预先排除大约50%的定义域块, 编码速度本应提高50%, 但该算法对所有的值域块和定义域块的归一化消耗了编码时间, 这使得MDFPIC只能比MDFIC的编码速度提高30%左右.

(3) 比特率的下降. MDFPIC利用了相邻值域块均值之差, 不仅进一步去除了相邻值域块间的相关性, 而且量化差值比量化均值所用的比特数少, 从而降低了比特率.

表1 MDFPIC与MDFIC的性能比较

图像	MDFIC			MDFPIC			提速 (倍数)
	PSNR(dB)		bpp	PSNR(dB)		bpp	
	D_0	D_1/D_2		D_0	D_1/D_2		
Lena	34.55	32.78	0.48	34.53	32.72	0.39	1.30
Girl	35.99	34.28	0.30	35.96	34.27	0.22	1.32
Peppers	33.82	32.21	0.49	33.82	32.19	0.40	1.34

MDFPIC和MDFIC方案解码恢复的图像质量PSNR(纵坐标)和比特率(横坐标)之间的关系如图4所示, 在比特率相同的情况下, 解码端接收到两路信号和只接

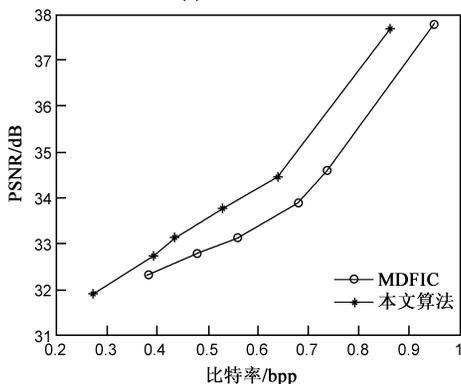
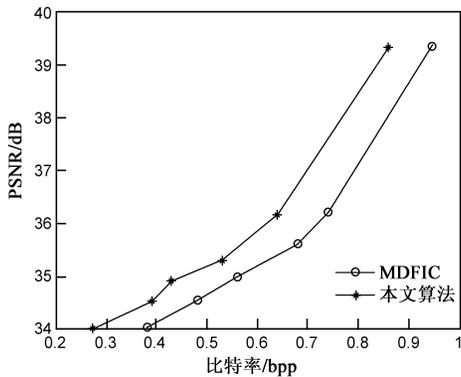


图4 MDFPIC和MDFIC的解码图像质量和比特率的比较(Lena)

收到一路信号时, MDFPIC比MDFIC的PSNR分别高0.6~1.3dB(如图4(a)所示)和0.4~1.3dB(如图4(b)所示). 由图4还可明显看出, 与MDFIC相比, 在解码质量稍有损失的情况下, MDFPIC的比特率降低了0.08~0.14bpp(图4(a))和0.05~0.12bpp(图4(b)), 这也显示了该方案的优越性能.

此外, 图5表示当 $\text{bpp} = 0.5$ 时, 中心路和单路解码器得到的解码图像, 与原始图像(图5(a))相比, 图5(b)和5(c)都可以满足人的视觉特性.



图5 MDFPIC方案中心路和边路解码图像质量的比较(0.5bpp)

5 结论

本文提出了基于FGSE的快速分形图像编码算法的多描述编码方案(MDFPIC). 在MDFIC的基础上, 通过进一步分析分形参数, 利用了相邻值域块均值间的相关性, 引入了基于FGSE的快速分形图像编码算法, 对分形参数值域块均值和尺度因子分别采用MDSQ和MDLVQ方法量化, 对定义域块的位置信息重新搜索匹配, 以适合多描述编码的要求. 仿真实验结果表明, 与MDFIC相比, MDFPIC在解码质量几乎相同的情况下, 不仅提高了编码速度, 也降低了比特率, 具有较高的鲁棒性.

参考文献:

- [1] 沈兰荪, 卓力. 小波编码与网络视频传输[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 333-334.
- [2] BARNESLEY M F, DEMKO S. Iterated function systems and the global construction of fractals[A]. Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences [C]. Great Britain: The Royal Society, 1985. 243-275.
- [3] BARNESLEY M F, SLOAN A D. A better way to compress images[J]. Byte Magazine, 1988, 13(1): 215-223.
- [4] JACQUIN A E. A novel fractal block-coding technique for digital image[A]. Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. New Mexico USA: IEEE Press, 1990. 2225-2228.
- [5] ZHANG Z Y, ZHAO Y. Multiple description image coding based on fractal[J]. International Journal of Innovative, Computing Information and Control, 2007, 3(6B): 1615-1623.
- [6] 赵耀, 王红星, 袁保宗. 分形图像编码研究的进展[J]. 电子学报, 2000, 28(4): 95-100.

- ZHAO Yao, WANG Hong-xing, YUAN Bao-zong. Advances in fractal image coding[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(4): 95 - 100. (in Chinese)
- [7] TONG C S, PI M. Fast fractal image encoding based on adaptive search[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(9): 1269 - 1277.
- [8] PI M H, et al. A new decoding algorithm based on range block mean and contrast scaling[A]. Image Processing[C]. Barcelona, Spain; SuvSoft, 2003. 271 - 274.
- [9] ZHU C, QI W S, SER W. A new successive elimination algorithm for fast block matching in motion estimation[A]. Circuits and Systems (ISCAS '04) [C]. Vancouver, Canada; IEEE Press, 2004. 23 - 26.
- [10] LIU M Q, ZHAO Y, et al. A fast fractal image coding algorithm based on FGSE[A]. Signal Processing[C]. Beijing: IEEE Press, 2006. 1153 - 1156.
- [11] BAI H H, ZHU C, ZHAO Y. Optimized multiple description lattice vector quantization for wavelet image coding[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(7): 912 - 917.

- [12] V. A. Vaishanmpayan. Design of multiple description scalar quantizes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1993, 39(3): 821 - 834.

作者简介:



刘美琴 女, 1980 年 12 月出生于山西柳林. 2007 年毕业于北京交通大学信息科学研究所, 获信号与信息处理专业硕士学位, 现留所任教, 主要研究方向为分形图像编码、多描述编码等. E-mail: mqliu@bjtu.edu.cn



赵耀 男, 1967 年 12 月出生于江苏徐州, 教授, 博士生导师. 现为北京交通大学信息科学研究所所长, 北京市“现代信息科学与网络技术”重点实验室主任, 2004 年入选教育部新世纪优秀人才支持计划. 研究方向为图像编码、数字水印、基于内容的图像与视频检索、多媒体信息处理等. E-mail: yzhao@bjtu.edu.cn