

基于小波变换的嵌入式图像压缩编码算法

张志武, 季桂树, 王 鹏

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要:小波变换具有良好的空间-频率局部化特性, 给图像编码算法提供了广阔的发展空间。嵌入式图像编码算法能很好地满足图像编码的新要求, 因此也成为了静态图像编码新标准 JPEG2000 的基础。对基于小波变换的嵌入式图像编码方法进行了研究, 分析比较了几种典型的编码算法的原理和编码性能, 指出了改进方案和适用性, 探讨了小波图像压缩研究的发展方向。

关键词:小波变换; 零树; 嵌入式图像编码; JPEG2000

中图分类号:TP301.6; TN919.81

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2006)05-0047-03

Wavelet - Transform - Based Embedded Image Compression Coding Algorithms

ZHANG Zhi-wu, JI Gui-shu, WANG Peng

(School of Info. Sci. and Eng., Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Wavelet transform affords wide space for image coding algorithms because of its excellent space - frequency localization characterizations. The embedded image coding methods meet some new requirements on image coding, so they have laid the foundation for the new still image compression standard JPEG2000. This paper discusses wavelet - transform - based embedded image coding methods. The principles and performances of representative algorithms are analyzed, and the improved schemes and applicability are pointed out, and then this paper discusses their development in future.

Key words: wavelet transform; zerotree; embedded image coding; JPEG2000

0 引言

随着图像多媒体应用的不断扩大, 人们对图像压缩性能、处理灵活性、功能性等方面有进一步要求。具有低复杂度、高压缩比和可扩展性要求的图像压缩算法得到广泛探索。基于小波变换的嵌入式编码算法的目的是: 对于给定比特率得到最佳的重建图像质量; 以嵌入式编码方式实现, 即在较低比特率下的码流都嵌入目标码流前端。其实质是通过对变换系数按重要性排序, 只需要一次编码即可在解码端得到满足不同码率或失真度要求的最佳质量的重建图像。

实现嵌入式小波编码算法需要解决两个关键问题: a. 如何按重要性进行小波系数排序和编码, 并隐含编码稀疏分布的重要小波系数的位置; b. 如何实现重要系数的渐进编码。位平面编码方法很好地解决了重要系数的渐进编码。对于第一个问题的不同解决方案形成了目前广泛应用的两类嵌入式编码方法: 基于零树或零块结构的编码和基于上下文模型的块编码。前者通过零树分裂或集分裂

过程间接定位重要系数并排序, 如 EZW, SPIHT, SPECK 等算法; 后者则把所有系数按照其上下文进行分类和排序, 并综合利用小波系数分布的统计特征建立有效的基于上下文的概率模型实现自适应算术编码, 如 EBCOT, PCAS 等算法。

1 嵌入式零树小波(EZW)编码算法

EZW(Embedded Zerotree Wavelet)算法^[1]主要包括以下 3 个过程: 零树预测, 用零树结构编码重要图, 逐次逼近量化(SAQ)。一幅经过小波变换的图像按其频带从低到高形成树状结构, 树根是最低频子带的结点, 它有 3 个孩子分别位于 3 个次低频子带的相应位置。如图 1 所示。

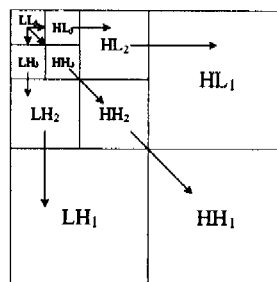


图1 三级小波分解图

定义用来表示重要图的 4 个符号: 一个小波系数 X ,

收稿日期: 2005-09-16

作者简介: 张志武(1981-), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为图像压缩; 季桂树, 副教授, 主要从事多媒体图像、视频、医学图像存储方面的研究。

对于给定阈值 T , 若 $|X| < T$, 则称 X 不重要, 相反称为重要的, 根据系数符号正负定义为 POS 和 NEG; 若根结点是不重要的且其所有后代结点也是不重要的, 称为零树 ZTR, 若其后代有重要系数则称为孤立零 IZ。并建立两个列表: 主表存放不重要系数或以其为根结点的树, 辅表存放重要系数。系数扫描采用锯齿形 (zig-zag) (或称 Z 字形) 扫描顺序。对于给定阈值 T 通过两步实现编码:

a. 主扫描扫描所有系数并输出相应符号, 若是 ZTR 则不必扫描其后代系数, 否则继续扫描其后代, 直到分裂出后代中的所有重要系数, 扫描结束生成主表和辅表;

b. 辅扫描采用 SAQ 方法细化辅表中重要系数。通过使用阈值按指数方式递减, 重复主扫描过程实现嵌入式编码。其核心思想是通过层次树的层层扫描实现稀疏分布重要系数位置的隐含编码, 通过定义零树在阈值意义下用根结点预测其后代系数的幅值。

EZW 的编码思想是不断扫描变换后的图像, 生成多棵零树来对图像编码。研究发现 EZW 算法存在的问题是:

(1) 对所有的频域进行同等重要度的编码, 不能充分利用小波变换的特点。改进办法是把最低频子图与其它子图分开处理。

(2) 编码时形成多棵零树, 要多次扫描, 造成效率很低。每一棵树必须在前一棵树形成后才能形成, 难用并行算法优化。

(3) 在一棵零树中包含的元素越多, 则越有利于数据压缩。在 EZW 算法中存在这样的树间冗余, 在 SPIHT 算法中则进一步利用了这种树间冗余。

(4) 同一子带中相邻元素间有一定的相关性, 尤其在高频子带存在大量的低值元素, 所以可以通过子带中的集合把大量的这种低值元素组织到一起, 达到数据压缩的目的。而 EZW 算法并没有充分利用这种相关性。在 SPECK 算法中利用了这种相关性。

2 多级树集合分裂算法 (SPIHT)

A. Said 和 W. A. Pearlman 提出了多级树集合分裂算法 SPIHT (Set Partitioning in Hierarchical Trees)^[2]。它采用与 EZW 算法相同的层次树结构, 引入系数集以更好表征以下情况: 根结点重要而后代结点都不重要; 对具有同一重要的父结点的 4 个子结点, 它们的后代组成集合的重要性有很大的相关性。

用 3 个有序表可以对 SPIHT 进行解释: 显著系数表 (LSC); 不显著系数表 (LIC); 系数的不显著集合表 (LIS)。系数集定义如下: 对于位置 $[i, j]$ 的给定系数, 设 $C[i, j]$ 为它的孩子集合, $D[i, j]$ 为它的后代集合, $G[i, j]$ 为它的孙子、曾孙子等的集合 (即 $G[i, j] = D[i, j] - C[i, j]$)。在 LIS 中项 (i, j) 代表集合 $D(i, j)$ 或 $G(i, j)$, 并分别标记为 A、B 两类以示区分。设 $S_k(\cdot)$ 为从任意一个系数集合到 $\{0, 1\}$ 的映射。确切地说, 如果 β 是一个系数集合,

β 中每个系数有 $q_k = 0$, 则 $S_k(\beta) = 0$ 。否则, β 中至少有一个系数有 $q_k = 1$, $S_k(\beta) = 1$ 。则 SPIHT 算法定义如下:

0) 初始化 (Initialization)

· 设 $k = 0$, $LSC = \emptyset$, $LIC = \{LL_0$ 中系数的所有坐标 $[i, j]\}$, $LIS = \{LIC$ 中有孩子的系数的所有坐标 $\}$ 。将 LIS 中的所有项设为类型 A。

1) 显著性过程 (Significance Pass)

· 对每个 $[i, j] \in LIC$, do:

– 输出 $q_k[i, j]$ 。如果 $q_k[i, j] = 1$, 输出 $s[i, j]$ 并将 $[i, j]$ 移到 LSC 末尾。

· 对 LIS 中的每个 $[i, j]$, do:

– 如果集合属于类型 A, 输出 $S_k(D[i, j])$ 。如果 $S_k(D[i, j]) = 1$, 则

* 对每个 $[l, m] \in C[l, m]$, 输出 $q_k[l, m]$ 。如果 $q_k[l, m] = 0$, 将 $[l, m]$ 加到 LIC 中; 否则, 输出 $s[l, m]$, 将 $[l, m]$ 加到 LSC 中。

* 如果 $G[i, j] \neq \emptyset$, 将 $[i, j]$ 移到 LIS 末尾, 作为类型 B 的集合。否则, 从 LIS 中删除 $[i, j]$ 。

– 如果集合属于类型 B, 输出 $S_k(G[i, j])$ 。如果 $S_k(G[i, j]) = 1$, 则将每个 $[l, m] \in C[l, m]$ 加到 LIS 末尾 (作为类型 A 的集合) 并从 LIS 中删除 $[i, j]$ 。

2) 改进过程 (Refinement Pass)

· 对每个 $[i, j] \in LSC$, 输出 $q_k[i, j]$ 。对这一步, 应该采用最近的显著性过程前的 LSC。也就是说, 在最近的显著性过程中加到 LSC 中的系数不应该改进。

3) 设 $k = k + 1$ 并转到第 1) 步。

步骤 1) 进行到 LIS 中的所有集合都被处理过为止。

SPIHT 算法初始化过程、细化过程类似于 EZW 算法, 它改进了 EZW 重要图的表示方法, 使得集合的表示更为精简, 从而提高了编码效率。SPIHT 算法在不同的比特率下比 EZW 算法的峰值信噪比都有所提高。

3 集合分裂嵌入块编码器 (SPECK)

SPECK (Set Partitioned Embedded Block Coder) 算法^[3]采用基于块的集合组成和分裂方法以充分利用子带内不重要系数的相关性。整个小波系数矩阵记为集合 X , 每一子带定义一个相应的块, S 类集合放置待处理的块 (用最低频子带系数初始化), X 中去除 S 后剩余部分定义为集合 I (初始为整个系统矩阵除去最低频子带后剩余所有子带)。建立 LIS 和 LSP 两个链表, LSP 为重要系数链表, 存放重要系数以便进一步量化, LIS 为不重要集合链表 (用最低频子带系数初始化) 并按集合大小递增顺序排列。

对于给定的阈值, S 类集合作如下处理: 测试其重要性并输出结果, 若不重要且不在 LIS 中加入 LIS, 如果为重要系数输出其符号并加入 LSP, 若为重要集合 (元素个数大于 1), 对此集合做如图 2(a) 所示的四叉树分裂——等分为 4 个子集 S_0, S_1, S_2, S_3 , 如果此集合在 LIS 中则

从中删除;对于每个子集重复上述过程直到分离出此集合中所有重要系数并加入 LSP,所有不重要子集加入 LIS。若集合 I 不为空,作如下处理:测试其重要性并输出结果,如果重要,则对其做如图 2(b)所示的倍频带分裂得到 4 个集合;对于 3 个 S 类集合采用上述 S 类集合处理过程,对新分离出的集合 I 继续作上述处理,直到得到集合 I 为不重要的或为空集。

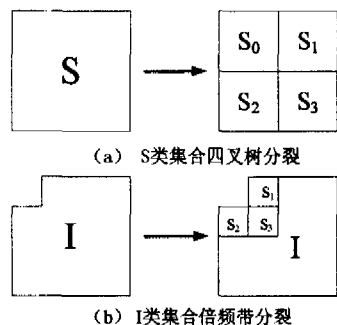


图2 SPECK 算法中两类集合的分裂方式

SPECK 算法的特点如下:

(1)在对不重要系数的表示方法上,SPECK 采用块结构,易于计算和并行处理的块结构,提高了编码速度。

(2)SPECK 算法需要小的动态存储,误码扩散小,有强的容错性。

4 优化截断嵌入式块编码(EBCOT)

为了同时实现分辨率和质量可分级性、最优的率失真性能和对信道误差的鲁棒性,EBCOT(Embedded Block Coding with Optimized Truncation)算法^[4]采用以下编码策略:

(1)把子带分割为 64×64 或 32×32 的码块,对各码块进行独立编码;

(2)码块被进一步分割为 16×16 的子块,并在重要子块编码之前,利用二叉树编码各子块的重要性;

(3)充分利用码块内系数的相关性建立相应的基于上下文的条件概率模型实现自适应算术编码;

(4)采用部分位平面编码,通过上下文模型把各给定位平面的量化符号分配在不同的编码步骤中;

(5)采用压缩后率失真(PCRD)最优化方法,实现各码块码流的最优截断以得到目标比特率下的最小失真。

EBCOT 编码产生的图像压缩码流不仅具有 SNR 可扩展而且具有分辨率可扩展,还可以支持图像的随机存储。由于采用独立编码有利于硬件实现和并行处理,比较而言,EBCOT 算法的复杂度较 EZW 和 SPIHT 有所提高,但压缩性能比 SPIHT 略有提高。

5 系数分类和排序的编码算法(PCAS)

PCAS(Pixel Classification and Sorting)算法^[5]是把所有系数按照其上下文进行分类和排序,并利用小波系数分布的统计特征建立有效的基于上下文的概率模型实现自

适应算术编码,它对 EBCOT 算法作了如下改进和推广:

(1)通过训练建立更复杂精确的上下文模型——子带间和子带内重要性模板,基于重要性模板建立更高层的概率模型用于自适应算术编码;

(2)定义反映系数重要程度的因子,利用重要性模板估计系数的重要性因子,根据重要性因子进行系数的分类和排序。重要性因子大的系数集先编入码流,避免了 PCRD 优化步骤。因此,PCAS 算法更好地利用了子带间和子带内系数间的非线性相关性,提高了编码效率。

6 图像编码新标准——JPEG2000

JPEG2000^[6]是新一代图像压缩标准,其核心算法为离散小波变换(DWT)和 EBCOT。其中小波变换滤波器有两种选项,一是支持无损压缩编码的整数定点小波滤波器(B57),另一种是支持有损压缩编码的浮点小波滤波器(B97)。熵编码选用的是比特面上基于上下文的自适应算术编码。每个比特面有 3 个编码通道,即重要性演化通道、幅值细化通道和清除通道。这 3 个编码通道是由 4 个编码操作即重要性编码、符号编码、幅值细化编码和清除编码来协调完成。JPEG2000 采取的是基于码块的分层编码,基本操作与 EBCOT 类似,最后采取分组打包方法产生码流以支持容错。同基线 JPEG 相比,JPEG2000 至少要提高 30% 的压缩效率,并且要支持更多的基线 JPEG 所没有提供的高级功能选项,如同时支持无损压缩和有损压缩,空间和品质可扩展编码,容错编码,ROI 编码,顺序组合、拼接以及码流的随机存取和处理等。

7 编码性能的比较

表 1 给出了 EZW, SPIHT, SPECK, EBCOT, PCAS 和 JPEG2000 对 Lena 图像在 0.25bpp, 0.5bpp, 1.0bpp 比特率下的峰值信噪比(PSNR)的比较。EZW 算法由于需多次扫描图像及忽视树间冗余,影响了编码效率和压缩能力。SPIHT 算法在集合分裂的框架下实现系数分类和渐进编码。上两种算法采用层次树结构编码,不具备分辨率可分级性,抗误码性能差。尽管 SPECK 和 EBCOT 算法的 PSNR 与 SPIHT 算法相当,但由于采用基于子带块的编码,很容易同时实现图像质量和分辨率可分级,同时具

表1 几种嵌入式编码算法的性能(PSNR)比较
($512 \times 512 \times 8$ bit 的 Lena 图像)

比特率(bpp) \ PSNR(dB)	0.25	0.50	1.00
EZW	33.17	36.28	39.55
SPIHT	34.11	37.21	40.41
SPECK	34.03	37.10	40.25
EBCOT	34.16	37.29	40.48
PCAS	34.38	37.47	40.61
JPEG2000	34.28	37.43	40.61

$n/2$ 时值达到最大,而且其概率以 $n/2$ 为中心,向两侧逐渐递减。图中纵轴表示概率,横轴表示 a, b 之间的汉明距离(本图在横轴上应该是离散分布的,但为了便于观察,笔者采用了连续分布图)。

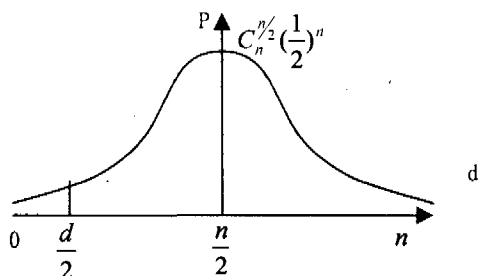


图1 a, b 之间汉明距的概率分布图

算法发生误判的几率就是图中 d 小于等于 $d/2$ 的那部分的积分和。只要选择合适的 n 和 d , 误判的几率可以得到有效控制。就整个指纹方案的跟踪方案来说,产生误判的原因主要有两个:维特比算法本身的差错概率 P_E 和 a, b 间的汉明距离小于等于 $d/2$ 的概率。当 a, b 间的汉明距离小于等于 $d/2$ 时,不管维特比算法本身译码是否正确,跟踪方案都将出错;而当距离大于 $d/2$ 时,出错几率则取决于维特比算法的差错概率。所以得到整个算法的误判率就约为 $P = P_E * (1 - P(d_{a,b} \leq d/2)) + P(d_{a,b} \leq d/2)$

5 结束语

文中介绍了一种利用纠错码构造数字指纹的方案和此方案的基本理念、主要的问题及解决方法。从总体上

(上接第49页)

有很强的抗误码性能。PCAS 算法通过采用更复杂的上下文模型实现系数分类和自适应算术编码取得了更好的编码性能,但增加编解码的复杂性。一般来说,基于集合分裂的算法比基于上下文模型的算法编解码快、复杂性低^[7]。

8 结论

对嵌入式小波编码算法进行了研究,指出了它们的算法原理和改进方案,对比了它们的性能。充分利用小波变换系数的能量聚集特性和子带间、子带内的非线性相关性,并结合人体视觉系统(HVS)有效分类和组织小波系数,以快的排序速度和少的重要图编码来寻找重要图,对不同统计特性的小波系数采用不同的编码策略,设计适于硬件实现的快速编解码算法以及从对重要系数量化方法上进行研究,进一步提高数据的压缩率,仍是此类算法发展的重要方向。

参考文献:

[1] Shapiro J. Embedded image coding using zerotrees of wavelet

看,这个方案适于合谋人数不大于两人(出于保密考虑,合谋集团的人数是很有限的),且用户数量不是太多的情况。至于这种方案的缺点则是随着用户数量的增长,计算量增长的很快,这也是以后需要改进的地方。

参考文献:

- [1] Boneh D, Shaw J. Collusion - Secure fingerprinting for digital data[A]. In: Coppersmith D. Advances in Cryptology: Proceedings of the CRYPTO'95[C]. Berlin: Springer - Verlag, 1995. 452 - 465.
- [2] Liu Z H, Yin P. Techniques and Applications of Information Hiding[M]. Beijing: Science Press, 2002. 178 - 180.
- [3] Guth J, Pfitzmann B. Error - and collusion - secure fingerprinting for digital data[A]. In: Pfitzmann A. Proceedings of the 3rd International Workshop on Information Hiding (IH'99)[C]. Berlin: Springer - Verlag, 2000. 134 - 145.
- [4] Safavi - Naini R, Wang Y. Collusion secure q - ary fingerprinting for perceptual content[A]. In: Sander T. Security and Privacy in Digital Rights Management: Proceedings of the ACM Digital Rights Management Workshop [C]. Berlin: Springer - Verlag, 2002. 57 - 75.
- [5] Cohen G, Encheva S, Schaathun H G. On separating codes [R]. Paris: ENST, 2001.
- [6] Wolf J K. Efficient maximum likelihood decoding of linear block codes using atrellis[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1978, 24: 76 - 80.
- [7] 曹雪虹, 张宗橙. 信息论编码[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
- [8] coefficients [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3445 - 3462.
- [2] Said A, Pearlman W A. A new, fast and efficient image code based on set partitioning in hierarchical trees[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3): 243 - 250.
- [3] Islam A, Pearlman W A. An Embedded and Efficient Low - Complexity Hierarchical Image Coder[A]. Visual Communications and Image Processing '99, Proceeding of SPIE[C]. [s. l.]: [s. n.], 1999. 294 - 305.
- [4] Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT[J]. IEEE Trans Image Processing, 2000, 9(7): 1158 - 1170.
- [5] Peng K, Kieffer J C. Embedded image compression based on wavelet pixel classification and sorting[J]. IEEE Trans Image processing, 2004, 13(8): 1011 - 1017.
- [6] Taubman D S, Marcellin M W. JPEG2000 图像压缩基础、标准和实践[M]. 魏江力, 柏正亮, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [7] 朱向军, 朱善安. 基于小波变换的嵌入式图像编码算法综述[J]. 信号处理, 2004, 20(1): 54 - 58.