

基于混合域的改进 SPIHT 图像编码算法

王学春¹ 刘申晓¹ 常朝稳²

(黄河科技学院信息工程学院 郑州 450006)¹ (解放军信息工程大学电子技术学院 郑州 450004)²

摘要 为使图像压缩编码算法同时具有较高的压缩比和较好的图像复原质量,提出了一种基于 Contourlet 与小波变换的混合域图像编码方案,并在分析 SPIHT 算法的基础上进一步改进,取消了 SPIHT 算法中对 LIS 表的分类,统一按照先子代后孙代的小波空间树顺序进行编码。仿真实验结果表明,提出的混合域图像压缩编码方案是一种高效的数字图像压缩算法,与 SPIHT 算法相比,该算法的重建图像具有更好的视觉效果,而且提高了编码速度。

关键词 图像编码, Contourlet 变换, 小波变换, SPIHT 算法

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.4.062

Improved SPIHT Image Coding Algorithm Based on Hybrid Domain

WANG Xue-chun¹ LIU Shen-xiao¹ CHANG Chao-wen²

(School of Information Engineering, Huanghe Science and Technology College, Zhengzhou 450006, China)¹

(Institute of Electronic Technology, The PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450004, China)²

Abstract In order to make image compression algorithm have higher compression ratio and better visual effect, this paper proposed an hybrid domain image coding scheme based on wavelet transform and Contourlet. On the basis of the analysis of the SPIHT algorithm, we cancelled the classification of LIS tables in the SPIHT algorithm, and made image coding uniformly according to the first offspring after sun generation wavelet space tree coding sequence. The comparing results show that the new image compression scheme is superior to that of SPIHT in the recovery image quality and coding time.

Keywords Image coding, Contourlet transform, Wavelet transform, SPIHT algorithm

1 引言

随着数字多媒体时代的到来,人们对海量的数字图像进行传输和存储时,都会利用图像数据本身的空间、结构、时间、视觉等各方面的冗余性来对其进行编码压缩。小波分析由于具有多分辨率的特性,与人眼的视觉系统很相似,在图像压缩领域中得到了广泛的应用。很多著名的算法都是基于小波变换的,如 Shapiro 提出的嵌入式零树编码(Embedded Zerotree Wavelet, EZW)方案^[1], A. Said 和 W. A. Pearlman 提出的分层树的集划分(Set Partitioning In Hierarchical Trees, SPIHT)算法^[2],以及现在常见的静止图像压缩标准 JPEG2000 的核心基础算法优化截取嵌入块编码(Embedded Block Coding with Optimized Truncation, EBCOT)算法^[3]等。对类似于图像扫描线的一维分段光滑信号,小波变换与传统的傅立叶方法相比取得了优异的效果,这是因为小波变换能够在一定程度上为一维分段光滑信号提供有效的最佳表示^[4]。但二维小波变换是由两个一维小波通过张量积扩展而形成的,在处理具有二维分段光滑的信号或一维直线或者面奇异的图像时就显示出一定的局限性,缺乏相应的方向性。

因此,小波变换在表示二维图像时并不是最优或最“稀疏”的基函数表示方法^[5]。研究人员为克服小波变换在处理高维信号时的不足,提出了多尺度几何分析这种新的信号分析的方法,其中 Do 和 Vetterli 提出的 Contourlet 变换就是一种很好的多尺度几何分析方法^[6],其具有很好的方向性与各向异性,可以全面地表现出图像的几何特征,因此很多学者在 Contourlet 域进行了各种图像处理,如图像增强^[7]、图像压缩感知^[8]、图像融合^[9]以及图像压缩^[10,11]。其中,文献^[10]是一种结合 Contourlet 变换与小波变换的类似 SPIHT 算法;文献^[11]则是基于 Contourlet 变换和 SPIHT 算法的彩色医学图像压缩算法。

本文在分析 Contourlet 变换的基础上,为消除 Contourlet 变换所使用的 LP (Laplacian Pyramid)分解带来的额外的冗余度,借鉴文献^[10]中提出的方案,先对数字图像进行 Contourlet 变换,提取出方向信息,然后对变换后的低频子带进行多级小波变换,这样的混合域编码不但能够保留图像的方向性信息,还能够表现出图像的轮廓和纹理信息。另外,还对 SPIHT 算法进行了研究,该算法虽然是目前国际上图像编码压缩领域最先进的算法之一,但在实际应用中仍存在一定的

到稿日期:2014-06-19 返修日期:2014-08-09 本文受河南省教育厅科学技术研究重点项目(12B510018),郑州市嵌入式系统应用技术重点实验室(121PYFZX177)资助。

王学春(1982-),女,硕士生,讲师,主要研究方向为数字图像处理、嵌入式系统应用, E-mail: 38856735@qq.com; 刘申晓(1980-),男,硕士,讲师,主要研究方向为数字图像处理、计算机网络;常朝稳(1966-),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为图像处理、可信计算。

不足,如编码速度较慢、对缓存要求较高、在低比特率压缩时重构图像质量较差等。本文针对这些问题,对 SPIHT 压缩方案进行了改进,取消了对 LIS 表的分类,统一地按照先子代后孙代的小波空间树顺序来进行编码,减少了计算机系统开销,在一定程度上克服了 SPIHT 算法存在的不足,结合混合域变换来获得系数,重构图像也有更好的视觉效果。

2 图像的混合域变换

Contourlet 变换是一种具有良好的多分辨率、局部化的、多方向性的图像二维表示方法,能较好地捕捉到数字图像本身所具有的几何特性。它的基本思想就是先利用一个类似于小波的多尺度分解,捕捉到边缘奇异点,然后根据方向信息将临近的奇异点连接成轮廓,并且使用一个系数来进行表示,使得 Contourlet 系数中表示图像边缘的系数能量更加集中,也就是说,可以用少量的系数来表示图像的平滑轮廓。因此,相较于塔式小波分解,Contourlet 变换能够更“稀疏”地表示图像。

此外,Contourlet 变换相比传统的小波变换能够分解出更多的方向子带,从而具有更多的方向信息。Contourlet 变换在每一尺度上所能分解出的方向子带个数是可以自由选择的,而传统小波变换在每一尺度上只能分解出 4 个方向子带,因此 Contourlet 变换可以更加灵活地选择参数,从而能够更加有效地表示图像。图 1 是 1 个尺度上 8 个方向的频域子带 Contourlet 分解示意图。

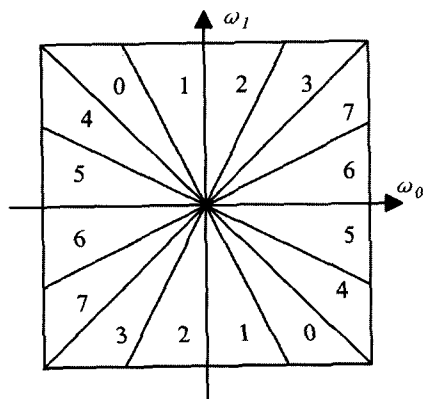


图 1 Contourlet 频域分解示意图

离散 Contourlet 变换由 LP(Laplacian Pyramid)滤波器和方向滤波器组(Directional Filter Bank,DFB)两个步骤完成。LP 分解不具有方向性,而方向滤波器 DFB 对高频部分能很好分解,二者的结合能够很好地弥补双方的不足。但由于 LP 变换在处理高频信息时没有进行下采样操作,存在 4/3 的冗余度,因此会影响图像的压缩效果。为解决 Contourlet 变换中的冗余问题,Eslami 和 Radha 提出了基于小波的 Contourlet 变换(Wavelet-Based Contourlet Transform,WBCT),并提出了基于 WBCT 的 SPIHT 编码算法^[12]。相比于 Contourlet 变换,WBCT 更适合用于图像编码压缩。不过,采用 WBCT 方法对图像处理时,先进行小波变换会导致丢失部分方向信息,重构时不能很好地恢复图像的一些纹理与轮廓等细节信息。冯燕等人提出了一种基于 Contourlet 和小波相结合的变换的类似 SPIHT 编码算法^[10]。本文借鉴这种图像的混合域

变换方法,先对原始图像进行 Contourlet 分解,得到图像变换后的高频子带与低频子带,接下来再通过对低频子带进行小波分析,完成图像的混合域变换。这样就可以先通过 Contourlet 变换保留图像的方向性信息,从而避免了 WBCT 方案中先进行小波变换导致丢失方向性信息的影响,能够更好地得到图像自身的纹理、边缘等细节特点;同时,因为小波对图像的高频子带采样会因为频率的不规则而导致更多的失真,所以只对由 Contourlet 变换得到的低频子带进行小波变换,就可以更好地去逼近编码图像的低频率部分。仿真实验证明,相比 WBCT 方案,这种混合域变换方法能够保留更多的图像方向性信息,同时也很好地得到了图像的边缘、轮廓等细节信息,是一种很好的图像与处理方案。

3 SPIHT 编码算法分析与改进

3.1 SPIHT 算法描述

A. Said 和 W. A. Pearlman 以零树结构为基础,提出了分层树的集划分(Set Partitioning In Hierarchical Trees, SPIHT)算法^[2]。该算法是目前最具代表性的嵌入式图像编码算法之一,可以支持多种码率,通过对不同集合的定义与分割,可以得到有效的嵌入式码流。

SPIHT 算法采用空间方向树结构处理小波变换后的系数,再对各个节点进行逐次逼近量化,从而生成一个嵌入式的比特流,SPIHT 算法中定义的空间方向树如图 2 所示。为了有效地编码每一个图像,空间方向树结构中,树的每个节点与一个小波系数对应,我们用坐标 (r,c) 来标识节点或系数 $C_{r,c}$,把每一个节点 (r,c) 及其所有后继节点划归为同一集合,首先引入下面的 4 个集合符号: $O(r,c)$ 是节点 (r,c) 的 4 个孩子节点集合; $D(r,c)$ 是节点 (r,c) 的所有子孙(包括孩子)的集合; $L(r,c)=D(r,c)-O(r,c)$,即节点 (r,c) 的所有非直系子孙(不包括孩子)的集合; H 是在多级小波塔形分解中的所有树根的坐标集。然后,SPIHT 算法又引入了 3 个队列来存放重要性信息:重要系数队列 LSP;不重要系数队列 LIP;不重要集合队列 LIS(待编码的集合)。

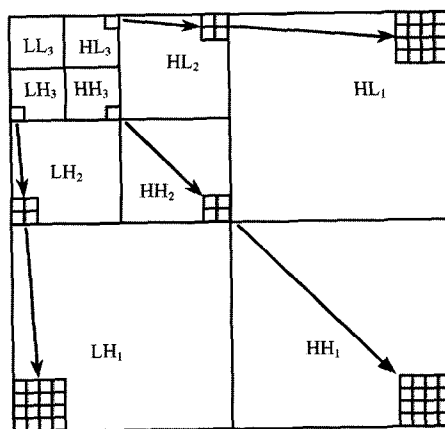


图 2 空间方向树

下面简单分析 SPIHT 算法的工作原理,SPIHT 编码主要是采用适当的队列集合排序策略,由进行初始化、重要性扫描并分类处理、细化扫描和更新阈值指数 4 个过程组成。

在初始化时,将 LSP 队列置空,将空间方向树分裂成树

根节点 $C(r,c)$ 和剩余节点集合 $D(r,c)$, 分别放入到队列 LIP 和 LIS 中。接下来进行重要性扫描, 如果 $C(r,c)$ 重要, 则将其放入到 LSP 队列, 然后根据阈值测试 LIS 的重要性, 若元素不重要, 就编码输出; 当某一集合表现出重要性时, 则继续分裂成 $O(r,c)$ 和 $L(r,c)$ 。若分裂所得的新的集合包含的元素数目大于 1, 则将 (r,c) 移到 LIS 的最后, 否则根据该元素的重要性进行移动, 若重要则移入到 LSP 的尾部, 不重要则移入到 LIP 的尾部。细化扫描时, 根据 LSP 队列中存储的元素, 把具有重要性的小波系数的坐标进一步细化, 并转化成二进制传输/存储。最后, 更新阈值再重复扫描, 不断地将节点进行分裂, 直到找到符合重要性的节点、达到所要求的比特率码流为止。

SPIHT 算法的初始化过程与细化过程类似于 EZW 算法, 但在系数子集的分割和重要性信息的传输方面采取了较为独特的方式, 能够在实现重要的系数优先传输的同时, 隐式地传递系数的排序信息。但是, 理论分析和实际应用表明, 该算法仍然存在一些不足, 比如: 计算复杂度依然较高, 占用内存较多; 对所有的频率域和子带都进行了相同重要的编码, 因此编码效率有待提高; 在低比特率的情况下, 细节丰富的图像的重构图像质量还有待改进。为有效地克服 SPIHT 算法的这些弱点, 研究人员又在 SPIHT 算法的基础上提出了各种各样的改进方法。Moinuddin 等人提出了基于空间方向树的图像编码算法, 该算法通过利用小波系数相关性等一些措施以及取消辅助链表, 来减少内存消耗^[13]。文献[14]通过结合人眼视觉特点来提高重构图像的视觉效果。在文献[15]中, 作者根据小波变换后系数的数值特征与分布特性对其动态分组, 实现了在 FPGA 上利用较少的存储空间来记录图像小波系数信息。

3.2 SPIHT 编码算法的改进

根据以上分析, 本文针对 SPIHT 算法编码效率的不足进行改进。

在 SPIHT 方案中, 进行重要性扫描时, 将待编码的集合 LIS 中的节点分成两种类型分别处理。第一种类型表示该节点的孩子节点可能重要, 第二种类型表示该元素节点的孩子不重要, 但是后面的非直系子孙有可能重要, 在进行细化扫描编码时, 将首先判断非直系子孙的重要性。但是, 经过统计, 原始图像经小波变换后得到的系数大多是非零的。所以, 把 LIS 队列进行分类实际上起不到精简的目的, 反而由于对每个 LIS 中的元素都要进行分类和测试, 从而增加了编码器的开销。因此, 经过仿真实验, 本文给出一个改进的精简优化方法。具体过程描述如下, 其中, 重要性判断规则 $S_n(*)$ 定义为:

$$S_n(*) = \begin{cases} 1, & \max_{(r,c) \in *}\{|C_{r,c}|\} \geq 2^n \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

(1) 初始化

定义: $n = \lceil \log_2(\max_{(r,c)}\{|C_{r,c}|\}) \rceil$; LSP 为空集, LIP = $\{(r,c) | (r,c) \in H\}$; LIS = $\{D(r,c) | (r,c) \in H, \text{且}(r,c)\text{具有非零子孙}\}$ 。

(2) 重要性扫描并排序

对于 LIP 队列中的每一个节点元素 (r,c) :

①输出 $S_n(r,c)$ (判断 (r,c) 的重要性);

②if $S_n(r,c) = 1$, 输出 $C_{r,c}$ 的符号, 并把节点 (r,c) 移到 LSP 队列;

③else 输出 0 到排序编码码流。

对于 LIS 队列中的每一个节点 (r,c) :

①输出 $S_n(D(r,c))$ 。

②if $S_n(D(r,c)) = 1$, 则对 $O(r,c)$ 中的每一个节点 (x,y) 进行重要性判断。

• 输出 $S_n(x,y)$;

• if $S_n(x,y) = 1$, (x,y) 移到 LSP 队列中并输出 $C_{x,y}$ 的符号;

• if $S_n(x,y) = 0$, (x,y) 移入到 LIP 队列中。

③判断 $L(r,c)$ 是否为空集。

if $L(r,c)$ 非空, 将 (r,c) 的 4 个孩子放入 LIS 队列的尾部, 并从 LIS 中直接删除 (r,c) ;

else (r,c) 从 LIS 中出队。

(3) 细化扫描

对于 LSP 队列中的每一个节点 (r,c) , 输出小波系数 $|C_{r,c}|$ 的第 n 个最重要位到精细码流。

(4) 更新阈值指数

将阈值指数 n 减 1, 转移至步骤(2)进行下一级扫描。

在 SPIHT 编码算法中, 在对 LIS 队列进行循环处理时, 当 LIS 中的节点 (r,c) 为第二种类型时, 需要先输出非直系子孙 $L(r,c)$ 的重要性码元, 以判断该节点元素是否是重要的, 若的确是重要的, 则将孩子集合 $O(r,c)$ 移入到 LIS, 并改成第一种类型, 再从 LIS 队列中删除节点 (r,c) 。该算法采用先分类再循环判断的方法, 每一次的循环都又增加了分类和测试判断, 大大增加了编码器的开销, 降低了程序运行速度和编码效率。

在改进后的算法中, 在对 LIS 队列进行循环测试处理时, 在 (r,c) 的孩子节点处理结束后, 直接判断非直系子孙 $L(r,c)$ 还有无孙代, 如果没有孙代, 则从队列 LIS 中删除节点 (r,c) ; 否则, 将所有孩子集合 $O(r,c)$ 移入 LIS 中, 然后再从 LIS 队列删除节点 $O(r,c)$ 。这样一来, 我们就不需要再对 LIS 队列中的节点元素进行分类测试, 而是直接把第二类节点处理修改后直接合并到第一类节点的处理流程中。全部按照先孩子节点后子孙节点的小波空间方向树顺序进行编码输出比特流, 这样做可以减少对不重要集合队列进行测试分类而增加的系统开销; 同时, 也节省了对第二类节点进行处理的过程中所输出的判断码元。因此, 相比原算法, 改进后的算法的流程更简单、速度更快, 提高了编码效率, 也得到细致的嵌入式码流结构。

4 本文算法整体流程

基于混合域的改进 SPIHT 图像编码算法流程如图 3 所示。为了更好地提取出图像的纹理与轮廓等细节信息, 对原始图像进行 Contourlet 与小波相结合的混合域变换。首先通过 Contourlet 变换, 提取出图像的方向信息, 再对 Contourlet 变换后产生的低频子带进行多级小波变换, 这样可以对图像的低频部分进行更好的逼近, 同时消除 Contourlet 变换所产

生的冗余。然后对变换后的系数利用改进后的 SPIHT 算法思想进行编码。最后输出嵌入式编码码流。

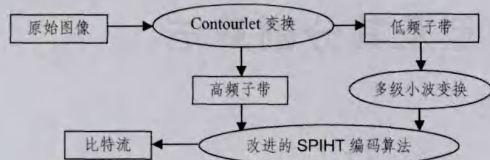


图3 本文图像编码算法流程

5 实验结果及分析

为了验证本文所提的图像编码算法的有效性,下面以 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ 标准灰度图像 Lena、Baboon 为例进行实验,并与基于小波变换的 SPIHT 算法进行比较,都进行了 5 级分解与重构。实验结果如图 4 和表 1 所示,其中图 4 为两幅图像在比特率为 0.125 时的重构对比;表 1 给出了不同码率下重构图像的峰值信噪比和编码时间对比。

表1 不同码率下重构图像的峰值信噪比和编码时间

Image	0.125bbp		0.25bbp		0.5bbp		1.0bbp	
	SPIHT	本文算法	SPIHT	本文算法	SPIHT	本文算法	SPIHT	本文算法
Lena	31.09dB	30.23dB	34.11dB	32.95dB	37.21dB	37.89dB	40.44dB	41.17dB
	0.91s	0.65s	1.26s	0.84s	1.67s	1.09s	1.89s	1.20s
Baboon	23.03dB	21.88dB	24.55dB	23.79dB	27.02dB	27.71dB	31.00dB	32.29dB
	1.12s	0.78s	1.43s	1.01s	1.95s	1.34s	2.57s	1.78s



图4 标准图像(Lena, Baboon)重构视觉效果对比

从图 4 可以看出,采用本文算法重构图像质量较好,由于使用了 Contourlet 与小波相结合的混合域变换,保留了更多的细节信息,对于细节丰富的图像 Baboon 尤为明显;根据表 1 所列数据,重构图像的峰值信噪比与 SPIHT 接近;编码压缩时间则耗费更少,这与理论分析一致。

结束语 本文以提高编码效率和改善压缩重构图像的视觉效果为出发点,通过原始图像的混合域编码,对 SPIHT 进行进一步简化改进等,提出了一种基于混合域的改进 SPIHT 图像编码方案。实验结果表明,改进后的算法是一种高效的图像压缩算法,其图像复原质量、编码速度等关键技术均优于 SPIHT 编码算法,有一定的应用前景。

参考文献

[1] Shapiro J M. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12):3445-3462
 [2] Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3):243-250

[3] Taubman H. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2000, 9(7): 1158-1170
 [4] 杨红颖,金海波,王向阳. 基于视觉特性的 Contourlet 域图像压缩编码算法[J]. 计算机科学, 2008, 35(1):250-254
 [5] Park S I, Smith M J T, Mersereau R M. Improved structures of maximally image analysis [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2004, 13(11), 1424-1431
 [6] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2005, 14(12):2091-2106
 [7] Hua Zhen, Li Ye-wei, Li Jin-jiang. Image Nonlinear Enhancement Algorithm Based on Nonsubsampled Contourlet Transform [J]. International Journal of Digital Content Technology and Its Applications, 2011, 5(7): 43-51
 [8] 倪雪,王华力,陈亮,等. Contourlet 域方向子带稀疏表示的图像压缩感知[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(6):1889-1891, 1898
 [9] Hua Zhen, Li Hong-Juan, Li Ye-wei. Remote Sensing Image Fusion Algorithm Using Dyadic Contrast Contourlet Transform [J]. International Journal of Advancements in Computing Technology, 2011, 3(7):132-140
 [10] 冯燕,吕嘉凯,贾蒙,等. 一种结合 Contourlet 和小波变换的图像编码算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6):1323-1326
 [11] 汤敏,陈秀梅,陈峰. 基于 Contourlet 变换和 SPIHT 算法的彩色医学图像压缩[J]. 计算机科学, 2014, 41(1):303-306
 [12] Eslami R, Radha H. Wavelet-based contourlet transform and its application to image coding[J]. Proc. of IEEE International Conference on Image Processing. Singapore, 2004(5):3189-3192
 [13] Moinuddin A, Khan E, Ghanbori M. Efficient algorithm for very low bit rate embedded image coding[J]. IET Image Processing, 2008, 2(2):59-71
 [14] 李玲,王向阳. 基于视觉敏感特性的小波域图像编码算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(4):780-783
 [15] 侯宏录,姚思源. 基于 FPGA 的图像压缩与编码算法设计[J]. 光电技术应用, 2013, 28(1):42-46