

基于系数聚类离散余弦变换的嵌入式图像编码

张立保^{1,2} 杨宁³ 朱童¹

¹北京师范大学信息科学与技术学院, 北京 100875
²北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100875
³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 离散余弦变换(DCT)应用于图像压缩与编码具有实现简单、压缩效率高等优点,但是无法与快速、高效的嵌入式零块编码算法相结合。提出一种新的基于嵌入式零块编码的离散余弦变换系数分布模型,通过系数聚类使离散余弦变换后的图像系数能够具有小波变换后图像系数的分布特点。在编码过程中,对嵌入式零块编码中的四叉树分割框架进行了优化。实验结果表明,新算法不仅降低了嵌入式零块编码的编码复杂度,而且在相同输出码率条件下,峰值信噪比(SNR)高于联合图像专家组(JPEG)图像压缩标准。

关键词 图像压缩;离散余弦变换;嵌入式编码;系数聚类

中图分类号 TN919.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s209003

Embedded Image Coding Based on Coefficient Clustering Discrete Cosine Transform

Zhang Libao^{1,2} Yang Ning³ Zhu Tong¹

¹ College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
² State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
³ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Discrete cosine transform (DCT) is an excellent transform because of its simple realization and high efficiency of compression. However, DCT cannot be combined with the fast and efficient zero-block coding algorithm perfectly. A new image coefficient distribution model using DCT is proposed based on the embedded zero-block coding algorithm. This model can make the same image coefficient distribution of DCT as that of discrete wavelet transform by coefficient clustering. During coding, the quadtree partitioning scheme of embedded zero-block coding is optimized. Experiment results show that the new algorithm can not only reduce the coding complexity, but also provides peak signal to noise ratio (SNR) performance better than baseline joint picture expert group (JPEG) at the same output bit rates.

Key words image compression; discrete cosine transform; embedded coding; coefficient clustering

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 100.2960

1 引言

现代通信迫切需要大量的图像信息快速、高效地远距离传输,然而海量数据与有限的信道带宽间存在着尖锐的矛盾,缓解该矛盾的一个重要手段是对图像进行有效的编码与压缩。图像压缩的实质是用某种编码方法减少图像数据间的相关性与冗余

度,在尽量不损害图像信源有效信息量的前提下,用尽量少的数据表示图像信息^[1]。目前已有多种高效的图像压缩算法。其中最著名的压缩算法是基于离散余弦变换(DCT)的静止图像编码,该方案已被写入联合图像专家组(JPEG)国际标准之中,并得到广泛的应用。但是,基于DCT的图像编码也存在两

收稿日期: 2012-05-29; **收到修改稿日期**: 2012-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(60602035,61071103)和中国科学院遥感应用研究所、北京师范大学遥感科学国家重点实验室开放基金(OFSLRSS201001)资助课题。

作者简介: 张立保(1977—),男,博士,副教授,主要从事图像压缩方面的研究。E-mail: libaozhang@163.com

个难以克服的缺点:压缩效率并非最高;在低码率下,存在一定的方块效应^[2,3]。当前,基于离散小波变换的图像压缩算法已经得到了深入研究。Shapiro^[4]提出的嵌入式零树小波(EZW)框架和 Said等^[5]提出的分树集合分裂(SPIHT)算法是基于零树结构的最优秀的编码算法,并且获得了更高的图像压缩效率。但是该算法的最大缺点是无法实现图像的多分辨率渐进编码。Islam等^[6]提出了集合分裂嵌入式(SPECK)算法。该算法将SPIHT的集合分割及链表编码技术与块编码思想有机结合起来,利用小波变换后图像中各子带内部系数间的相关特性,通过集合分割与倍频分割在各子带内部分块编码,并借助链表组织系数输出。由于SPECK算法采用了块编码,因此支持多分辨率下的渐进编解码^[7]。

尽管嵌入式零树编码方法首先使用于小波变换,但是基于DCT的嵌入式零树编码方法依然可以取得很好的压缩效果。1998年,Nister等^[8]提出一种基于图像DCT系数的类似小波变换的零树编码结构,其性能优于直接采用DCT的JPEG标准。本文提出一种基于系数聚类DCT的嵌入式子带分割编码(ESP)(ESP-DCT)。该算法对传统的DCT采用聚类操作,并对修改后的系数采用嵌入式子带分割编码,实验结果表明该算法不仅提高了静止图像的有损压缩效率,而且实现了渐进式传输,降低了编码的复杂度。

2 基于系数聚类的 DCT

2.1 DCT

设图像数据是一个 $M \times N$ 的矩阵,每个数据用 $x(m,n)$ 表示。为了减弱或去除图像数据的空间相关性,用二维 DCT 将图像从空间域转换到 DCT 域。二维 DCT 写成矩阵形式:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{TX}\mathbf{T}^T, \quad (1)$$

式中

$$\mathbf{T} = \sqrt{\frac{2}{M}} \left[C(k) \cos \frac{(2m+1)k\pi}{2M} \right]_{M \times M}, \quad (2)$$

$$k, m = 0, 1, 2, \dots, M-1,$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{N}} \left[C(k) \cos \frac{(2n+1)l\pi}{2N} \right]_{N \times N}, \quad (3)$$

$$n, l = 0, 1, 2, \dots, N-1,$$

式中 $C(k)$ 为系数。DCT 并不是对整幅图像一次编码,而是将图像划分成相同尺寸的块,分别对每一块进行 DCT。其原因是小块图像变换的计算更容易,

而且距离较远的像素之间相关性比距离较近的像素之间相关性小。经过 DCT 后,其低频分量都集中在矩阵左上角,包含了图像的主要信息;高频分量分布在矩阵右下角,反映了图像的细节部分。DCT 后的系数之间的相关性明显下降,能量集中于低频区域中,这样就容易实现码率的压缩,而且大大降低了实现的难度。

2.2 系数聚类

对图像进行 $N \times N$ 的子块 DCT 后,每一块系数都符合 DCT 后分布特点,对全体系数进行聚类操作。即将所有的 DCT 子块重组为一个新的分层子带结构,把所有的直流(DC)系数聚为最低频子带,相应的交流(AC)系数分别构成高频子带,这样经聚类后把这些 DCT 系数变成 $\text{lb } N$ 级类似小波分解的子带结构。图 1 给出了 2 块 $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$ DCT 系数经聚类后重组得到新分层子带结构的过程。

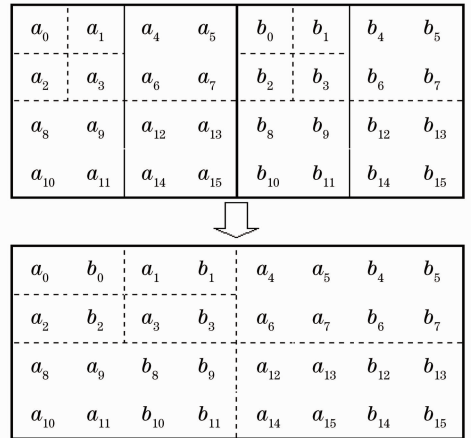


图 1 重组的 DCT 子带结构

Fig. 1 Reconstructed DCT subband structure

3 嵌入式子带分割编码

3.1 集合重要性的确定

ESP 选用 2 的整数幂作为编码的阈值平面,并按照阈值平面 n 递减的顺序从最大阈值平面依次编码输出重要系数。可以将该过程归纳为在相应阈值平面 n 上对重要系数的搜索。这里定义满足

$$\max_{(i,j) \in \Omega} \{ |c_{i,j}| \} \geq 2^n \quad (4)$$

的小波系数集合 Ω 为重要系数集合。对于重要系数集合,其重要性可以通过建立函数

$$\Gamma_n(\Omega) = \begin{cases} 1, & \text{if } 2^n \leq \max_{(i,j) \in \Omega} |c_{i,j}| < 2^{n+1} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

表示,式中 $\Gamma_n(\Omega) = 1$ 表示 Ω 中含有阈值平面 n 上的重要系数; $\Gamma_n(\Omega) = 0$ 则表示 Ω 中的所有系数均为相

对阈值平面 n 的非重要系数。

3.2 子带分割过程

ESP 算法的子带分割过程是由嵌入式零块编码中最经典的 SPECK 算法改进而来的,虽然两者都利用了各子带内部系数间的高度相关性,但是前者对初始分割集合 S 的选择与子带分割策略都进行了优化处理。由图 2 可知,在初次分割开始前,零块编码将根集合 S 设在左上角,且大小为 1 pixel 或 4 pixel,而 ESP 将根集合 S 设定为全部图像系数集合 X 。通过系数聚类,DCT 后的图像系数遵循了金字塔式分解,图像能量从高频向低频聚集,因此 ESP 算法从全部图像系数集合 X 开始做四叉树分

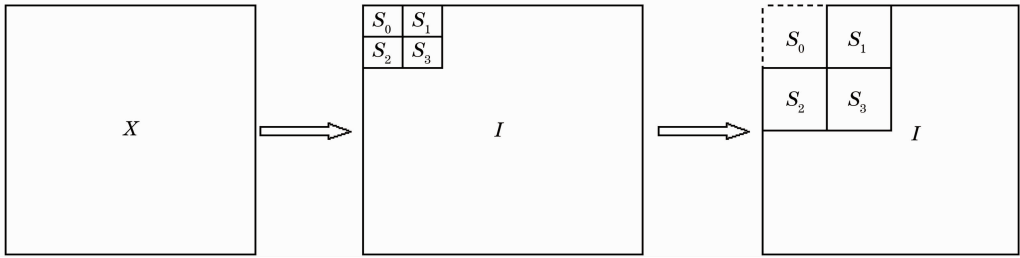


图 2 SPECK 算法的分割框架

Fig. 2 Partitioning frame of SPECK algorithm

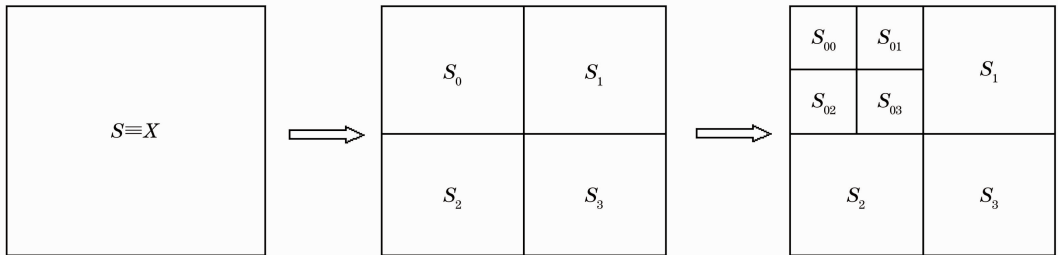


图 3 ESP 算法的分割框架

Fig. 3 Partitioning frame of ESP algorithm

3.3 链表编码

在链表编码过程中,ESP 采用两个临时数组分别存放每个矩形非重要系数集合左上角第一个元素的坐标和集合的大小。编码开始后,一个数组存放当前阈值平面下正在分割的所有非重要系数集合的位置与大小,另一个存放分割过程中产生的新的非重要系数集合的位置与大小信息。如果在当前阈值平面下的分割与编码结束,将第二个数组的信息复制给第一个数组,并将第二个数组清零,也可以在每一层编码结束后,将两个数组交替使用。与 SPECK 所采用的不重要集合链表(LIS)相比,存储开销有所降低,对每个阈值平面上重要系数的搜索速度也有所提高。ESP 算法的码元分配与码流输出和 SPECK 采用的方式相同。

割,每一次分割后生成的四个矩形子集合与金字塔分解生成的子带完全吻合,经过与小波变换次数相同的递归调用后,被分割的集合刚好与低频-低频(LL)子带系数完全重合^[7]。优化了分割框架,使之更好地与小波分解相融合,同时避免了传统零块编码的倍频分割,降低了编码复杂度,提高了压缩效率。

子带分割过程中,ESP 算法采用了与 SPECK 相同的分割模式,依次搜索矩形系数集合 S 内的所有小波系数,发现重要系数,则将 S 分为大小相等的四个子集,分别搜索每个子集并输出编码,直至集合中所含元素个数为 1。图 3 展示了这一分割过程的基本步骤。

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

表 1 给出了 ESP-DCT 与经典的 SPIHT 编码在计算效率与计算复杂度上的比较。所选用的图像是 1024 pixel \times 1024 pixel 的遥感影像 PKS-1,其中,DCT 的分块大小为 32 pixel \times 32 pixel,比较的数据为不同解码率时所用的解码时间,单位为秒。

表 1 ESP-DCT 与 SPIHT 针对遥感图像的计算复杂度比较
Table 1 Comparison of computational complexity between ESP-DCT and SPIHT for remote sensing images

Decoding rate / (bit/pixel)	Decode time ESP-DCT /s	Decode time SPIHT /s
0.25	0.226	0.247
0.5	0.292	0.342
1.0	0.418	0.535

表 2 给出了 ESP-DCT 与基本 JPEG 针对 2048 pixel×2048 pixel 的高分辨率遥感影像 PKS-2 在不同解码率下的压缩效率的比较,所选取的比较值为峰值信噪比(PSNR)。

图 4 进一步给出了采用 32 pixel×32 pixel 的 ESP-DCT 算法在 0.125、0.250 与 0.500 bit/pixel 三种编码率下,对 2048 pixel×2048 pixel 的遥感图像 PKS-2 的压缩效果。

表 2 ESP-DCT 与基本 JPEG 针对遥感图像的解码图像 PSNR 的比较

Table 2 Comparison of PSNR of decoded image between ESP-DCT and baseline JPEG for remote sensing image

Decoding rate/(bit/pixel)	PSNR of ESP-DCT /dB	PSNR of baseline JPEG /dB
0.125	27.49	27.36
0.25	31.08	30.92
0.5	34.85	34.49
1.0	38.76	38.41



图 4 不同解码率下 ESP-DCT 算法针对遥感图像的解码结果

Fig. 4 Results of ESP-DCT algorithm for remote sensing image at the different decoding bit rates

4.2 结果分析

通过表 1 的实验结果比较不难发现,对于同一幅图像,在不同的解码率下,ESP-DCT 压缩算法在解码时间上比 SPIHT 算法有较大幅度减少,随着解码率的升高,两种算法所消耗时间的差距会进一步增大。这表明了 ESP-DCT 比 SPIHT 具有更低的计算复杂度,因此对大图幅的遥感图像压缩编码具有重要意义。表 2 给出了 ESP-DCT 与基本 JPEG 编码算法的重建图像 PSNR 的比较,所选择的图像是大图幅的遥感影像。可以看出,相同解码率下,ESP-DCT 算法的解码效果均好于基本 JPEG 编码。通过对表 1 与表 2 数据的综合分析可以得出结论,ESP-DCT 算法具有较高的计算效率和较低的计算复杂度,对遥感影像等分辨率较高的专业影像处理具有一定的优势。

5 结 论

针对 DCT 在图像编码中无法与快速、高效的嵌入式零块编码算法相结合的问题,提出了一种基于系数聚类的 ESP-DCT 算法。该算法通过调整图像分块 DCT 后系数的分布,使 DCT 后的图像系数能够与零块编码高效兼容,同时通过优化嵌入式零块编码的叉树分割结构,实现了编码效率的提升。

参 考 文 献

- Zhang Libao, Wang Pengfei. Remote sensing image coding based on adaptive directional lifting integer wavelet and optimal threshold[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 225~228
张立保,王鹏飞. 基于自适应方向提升整数小波与优化阈值的遥感图像编码[J]. *中国激光(光电技术专刊)*, 2010, **37**(s1): 225~228
- ISO/IEC, Information technology-JPEG 2000 image coding system-Part 1: Core coding system[S]. ISO/IEC 15444-1, 2004
- ISO/IEC, Information technology-JPEG 2000 image coding system-Part1: Extended coding system[S]. ISO/IEC 15442, 2004
- J. M. Shapiro. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, **41**(12): 3445~3462
- A. Said, W. A. Pearlman. New fast and efficient image coding based on set partitioning in hierarchical trees [J]. *IEEE Transaction Circuit System Video Technology*, 1996, **6**(3): 243~249
- A. Islam, W. A. Pearlman. Embedded and efficient low-complexity hierarchical image coder[C]. *SPIE*, 1999, **3653**: 294~305
- Zhang Libao, Huang Ying. Image coding algorithm using optimal scaling scheme and quadtree partitioning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3460~3463
张立保,黄颖. 一种结合最优缩放框架与四叉树分割的图像编码算法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3460~3463
- D. Nister, C. Christopoulos. An embedded DCT based still image coding algorithm[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1998, **5**(6): 135~137

栏目编辑:李文喆