

小波基对红外目标图像 SPIHT 算法性能的影响

高明¹, 范晓磊¹, 郭立¹, 李洪周²

(1. 第二炮兵青州士官学校, 山东 青州 262500; 2. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘要:针对红外目标图像边缘模糊、噪声点多、对比度较低等特点,从分析小波基函数的三个评估指标入手,进行了大量的实验和统计,研究不同的小波基对红外目标图像 SPIHT 算法性能的影响,通过实验结果的分析与讨论,得出双正交小波 D9/7 小波和 bior4.4 小波适于红外目标图像实时压缩的结论,这一结论也有助于将来更好地发挥 SPIHT 算法的性能。

关键词:红外目标图像;小波基;SPIHT;双正交小波

中图分类号:V271.4;TP317.4 **文献标识码:**A

Effect of wavelet basis on performance of SPIHT algorithm of infrared target image

GAO Ming¹, FAN Xiao-lei¹, GUO Li¹, LI Hong-zhou²

(1. The Second Artillery Qingzhou Petty Officer School, Qingzhou 262500, China;

2. Nval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

Abstract:The infrared target image has the characteristics of blur edges, much noise and low contrast etc. By analyzing the three evaluation criteria, this paper studied the effect of different wavelet basis on performance of SPIHT algorithm of infrared target image through carrying out a large number of experiments and statistics. Through analysis and discussion of experiment results, the conclusion that D9/7 wavelet and Bior4.4 wavelet are propitious to real-time compression of infrared target image, which will also contribute much to exert potential coding ability of SPIHT algorithm.

Key words:infrared target image; wavelet basis; SPIHT; biorthogonal wavelet

1 引言

随着无人机、巡逻攻击导弹等先进武器装备的不断出现,为了解决现有数据链带宽低和红外目标图像数据信息量大的矛盾,研究具有高效的压缩能力、适合网络渐进传输的图像编码方法已成为目前静态图像编码领域的研究热点。在大量的图像编码方法中, W. A. Pearman 与 A. Said 提出的分层树集合分割排序 (set partitioning in hierarchical trees, SPIHT)^[1]的编码算法是公认的效率最高的图像渐进编码方法之一,并已经成为 JPEG2000 等编码标准的基础,它不仅能够精确地控制编码率,而且具有很好的重构质量。

在大部分基于 SPIHT 算法的研究和性能分析

中,人们往往比较注重算法本身的改进和提高,却忽略了以下两方面的因素^[2]:①不同图像本身存在的冗余程度及图像内容的分布特性对压缩结果的影响;②不同的小波基对图像压缩结果的影响。目前为止提出的所有基于小波的图像压缩算法中,均使用固定的完全重构滤波器组对各类图像进行编码、解码处理。而这种滤波器选取和使用的一般方法,对基于低速率数据链的图像渐进编码,并不能够始终给出最佳的压缩效果。

关于小波基与图像编码效率的关系的理论证明

作者简介:高明(1982-),男,本科毕业,主要研究方向为电子信息及计算机仿真。E-mail:gaoming_33@163.com

收稿日期:2008-10-28

仍是开放问题,文献[3]初步研究了不同的小波基对图像编码性能的影响,并给出了实验性的结论。小波编码中,小波基的选择与评估是人们关注的一个焦点,目前已经有一些文献对小波基的选择问题进行了探讨,但对小波基所作的评价不够全面,而且大多没有研究适于红外目标图像压缩的小波基的选择与评估。因此,本文根据红外目标图像固有的统计特性,从分析小波基函数的数学特性入手,构建了一种新的适于红外目标图像实时压缩的小波基选择和评估系统,通过大量的实验数据说明了它对 SPIHT 算法性能的影响,然后通过实验结果的分析讨论,得到了相关的一些结论。

2 本文采用的红外图像

由于物体热平衡、光波波长长、传输距离远、大气衰减等原因,红外图像的主要特性表现为空间相关性强、对比度低、视觉效果模糊,且含有多种噪声。各种途径获取的红外目标图像所表现出的一些特性也有差异,下面主要从图像的灰度直方图分析图像的灰度值分布范围入手,选取几种比较典型的红外目标图像作为实验图像。

实验结果表明,可见光的 Lena 图像灰度值动态范围较大,直方图表现出没有明显的谷峰存在(如图 1(a)所示);而红外图像相对来说灰度值分布范围较小,绝大部分像素集中在某些相邻的灰度级范围内,且直方图有明显的谷峰存在(如图 1(b)、图 1(c)所示)。另外,实际环境下一些红外图像灰度值分布范围也较大,目标与背景界限模糊,且灰度分布有交叉(如图 1(d)所示)。

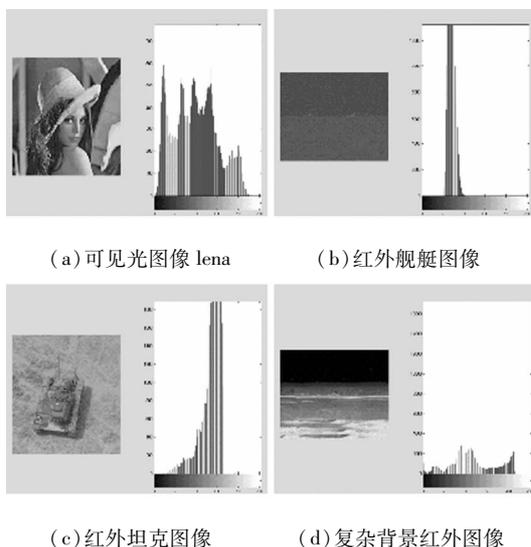


图1 选取的几种典型红外目标图像

3 小波基的选择和评估

针对上述红外目标图像的特点,本文选择用以

下三项指标对小波基的性能进行评估,即:熵 H 、红外恢复图像的峰值信噪比 PSNR 和能量紧致性。其中,熵用于对小波基无损编码能力的评估;峰值信噪比用于对小波基编码性能的客观评估;能量紧致性则用于评估小波基的聚能效果,这直接关系到压缩编码效率的高低^[4]。

3.1 评估指标

(1) 熵

熵是信源平均信息量的一种度量。根据无损编码定理,当熵的单位取为 bpS(比特/符号)时,熵便是信源在无失真编码时所能达到的最小比特率。因此,图像经小波变换后的熵值可作为衡量小波基优劣的一种尺度,对同一幅图像进行小波变换后的熵值越低,小波基的无失真编码能力越强,反之越弱。熵可定义为:

$$H(U) = - \sum_{k=1}^K p(\alpha_k) \log_2 p(\alpha_k)$$

其中, K 为图像所具有的灰度等级; $p(\alpha_k)$ 为第 k 个灰度等级出现的概率。

(2) 峰值信噪比 PSNR

由人眼的视觉特性可知,人眼对不同频率信号的响应是不同的,对低频信号敏感,而对高频相对来说则不敏感,于是在小波编码中,往往对低频子带进行精细量化,而对高频子带进行粗糙量化,甚至完全不考虑。所以,可以去掉小波变换系数的高频分量,仅保留最低频子带的变换系数,用其重建图像的峰值信噪比 PSNR 作为评价小波基编码性能的一个客观标准。

峰值信噪比 PSNR 定义为:

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} [Q^2 / \text{MSE}] [\text{dB}]$$

其中, MSE 是重建后图像和原始图像之间的均方误差,若用 $X_{i,j}$, $\hat{X}_{i,j}$ 分别表示原始图像和重建图像在空间位置 (i, j) 点的像素值, Q 表示图像灰度值的量化级数(通常为 8bit 量化,即 $Q = 255$),则 MSE 定义为:

$$\text{MSE} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\hat{X}_{i,j} - X_{i,j})^2$$

(3) 能量紧致性

在低比特率图像压缩编码中,能量紧致性对压缩效率有非常重要的影响,具有好的能量紧致性的小波基能提高图像的压缩效率。

将含有 $M \times N$ 个像素的原始数字图像 $f(x, y)$ ($x = 0, 1, \dots, M-1, y = 0, 1, \dots, N-1$) 用 $M \times N$ 维矢量 $a(a_0, a_1, \dots, a_{M \times N-1})$ 来表示,则 a 的能量定义为:

$$E_a = a^T a = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M \times N - 1} a_i^2$$

与其他正交变换一样,如果采用正交小波变换,那么从理论上讲,小波变换前后信号总能量保持不变,是一种能量守恒的变换,并且具有一种能量集中的特性,即将整图的能量集中在低频部分,而在高频子图像仅有很少比例的能量。将变换后的 $(3K+1)$ 个子图像 $A_k, D_j^1, D_j^2, D_j^3 (j=K, K-1, \dots, 1)$ 中的每个分量按其绝对值从大到小重新排序,得到 $b = \{b_0, b_1, \dots, b_{M \times N - 1}\}$,令:

$$\zeta = \frac{E_b(k)}{E_b} = \frac{\sum_{i=0}^{k-1} b_i^2}{\sum_{i=0}^{M \times N - 1} b_i^2}$$

显然,当 $k \rightarrow M \times N - 1$ 时, $\zeta \rightarrow 1$,考察归一化能量曲线 ζ 随 k 变化的快慢,就可以评估小波基的能量集中特性。

3.2 选用的小波基及其性能

自从小波变换应用于图像压缩编码以来,学者们构造了几十种性能各异的小波基。本文选用其中几种较具代表性的小波基,就上述三项指标进行了性能评估。

双正交小波主要有两类:一类是由著名的小波分析学者 Ingrid Daubechies 构造的 Daubechies 小波系^[5],主要代表有 D9/7 小波、D5/3 小波和 D5/7 小波。这三种小波均是紧支撑的对称小波,其中 D9/7 小波和 D5/3 小波被国际静止图像压缩标准 JPEG2000 采纳,分别用作有损压缩和无损压缩的缺省小波滤波器。一般来说,双正交小波的正则性和消失矩阶数随滤波器长度的增加而增大。D5/3 分析小波和合成小波的正则性分别是 0, 1.0, 消失矩阶数都是 2。D9/7 分析小波和合成小波的正则性分别是 1.06, 1.70, 消失矩阶数都是 4^[6]。

另一类是 biorthogonal 小波族,主要特征体现在具有线性相位,通常表示为 biorNr. Nd 的形式, r 表示重构 (Reconstruction), d 表示分解 (Decomposition)。实验中选用了小波系中的 bior2. 4, bior3. 5, bior3. 9 和 bior4. 4。

正交小波主要有: Haar 小波、Daubechies 小波、Coiflet 小波、Symlet 小波等。其中, Haar 小波是一个阶跃函数,支集长度为 1, 滤波器长度为 2。Daubechies 系列的小波简称为 DbN, 其中 N 表示阶数, Db 是小波名字的前缀,除 Db1 (等同于 Haar 小波) 外,其余的 Db 系列小波函数都没有解析的表达式。Coiflet (coifN) 小波系是 Daubechies 提出的另一个小波系,有更长的支集长度 $(6N-1)$ 和更大的消失矩

$(2N)$, 对称性比较好。Sym 小波的构造类似于 Db 小波系,两者的差别在于 Sym 小波有更好的对称性,更适合于图像处理,减少重构时的相移。

实验中分别选用了 Haar 小波、Db2 小波和 Db4 小波、Coif3 小波和 Sym3 小波。

4 小波基对红外图像 SPIHT 算法性能的影响

选择上述可见光 Lena 图像和三幅红外图像作为测试图像,分别利用上述十种代表性的小波基(如表 1 所示)的三级小波变换,对每幅测试图像进行 SPIHT 压缩编码,然后计算得到第 3.1 节所述的三个评估指标。本文对图像在比特率为 0.5bps 下进行压缩编码,通过大量的实验和统计,用曲线直观地显示了选用小波基对红外目标图像 SPIHT 算法性能的影响。

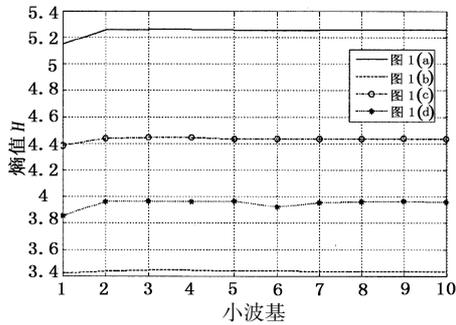
表 1 十种小波基的名称及其编号

编号	1	2	3	4	5
小波基	D9/7	bior2. 4	bior3. 5	bior3. 9	bior4. 4
编号	6	7	8	9	10
小波基	Haar	Db2	Db4	Coif3	Sym3

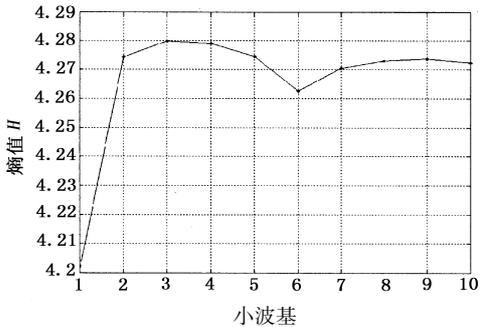
图 2(a)、图 2(b) 分别显示了 4 幅测试图像在不同小波基下变换后的熵值和平均熵值分布情况,从中可以看出:①对于不同的图像,即使在相同的小波基变换后,其熵值是有差异的,可见光 Lena 图像的熵值与红外图像相比较,这说明图像的熵值跟图像自身有很大关系;②由平均熵值曲线可以明显看出, D9/7 小波的平均熵值最低,其次是 Haar 小波、Db2 小波和 bior4. 4 小波;说明 D9/7 小波具有较好的无失真编码能力,适合红外目标图像的实时压缩。

图 2(c)、图 2(d) 分别比较了利用十种小波基进行 SPIHT 压缩解码后重构图像的峰值信噪比 (PSNR) 和平均 PSNR, 不难看出:①对于不同类型的图像,同一个小波基的编码性能不同,可见光 Lena 图像与红外图像(图 1(b) 所示)不同的小波函数重构效果不一样;②由红外图像的平均 PSNR 曲线看出, D9/7 小波的平均 PSNR 最高,其次是 Db4 小波和 bior4. 4 小波。

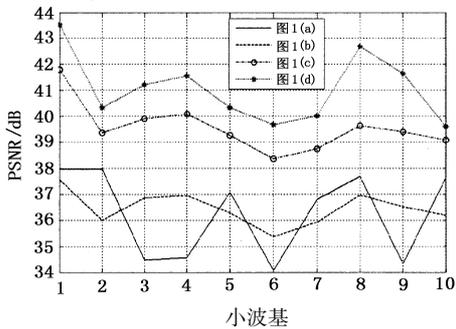
从这两项指标来看,双正交小波基中, D9/7 小波是最优小波,它两项指标都排第一,其次是 bior4. 4 小波;而正交小波基中, Db2 小波和 Db4 小波表现最好,虽然 Haar 小波变换后图像的熵值较低,有良好的无失真编码能力,但重构图像的 PSNR 却是最低的,解码后图像质量比较差,不宜自动目标识别,故本文不采用此小波对红外目标图像进行压缩。



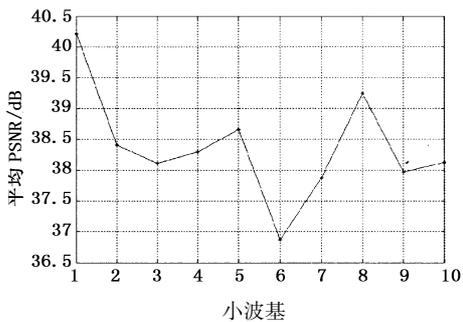
(a)对典型红外图像的熵值 H 比较



(b)对典型红外图像的平均熵值 H 比较



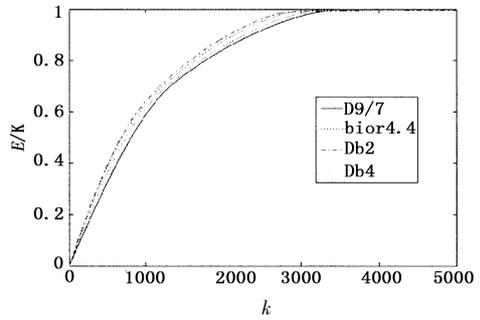
(c)对典型红外图像的 PSNR 比较



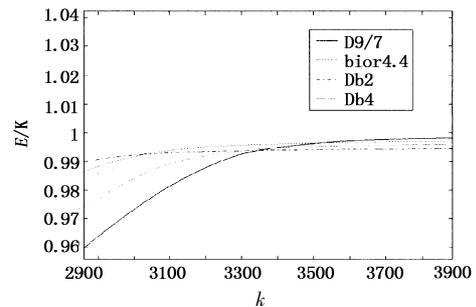
(d)对典型红外图像的平均 PSNR 比较

图2 十种小波基的性能比较

图3是采用上述4种小波对红外测试图像(如图1(d)所示)进行三级小波变换后的能量集中特性曲线。从局部放大图3(b)可见,当 k 值较小时 (<3000), Db2 小波和 bior4.4 小波的能量集中速度较快,当 k 值增大到 3000 以后, Db2 小波的能量集中速度趋缓, D9/7 小波的能量集中速度加快,当 k 值超过 3500 后, D9/7 小波的能量集中速度处于第一位, bior4.4 小波处于第二位(如图3(b)所示)。



(a)4种小波基的能量集中特性



(b)图3(a)的局部放大图

图3 4种小波基对红外图像图1(d)能量集中特性对比

但从整体上来说(如图3(a)所示),由于这4种小波基都是紧支集的,时频局部性较好,故能量集中特性相差并不明显。图4是在同一比特率 0.1bps 下,分别采用上述4种小波基进行压缩解码后重构图像的直观效果比较,不难看出,采用 D9/7 小波和 bior4.4

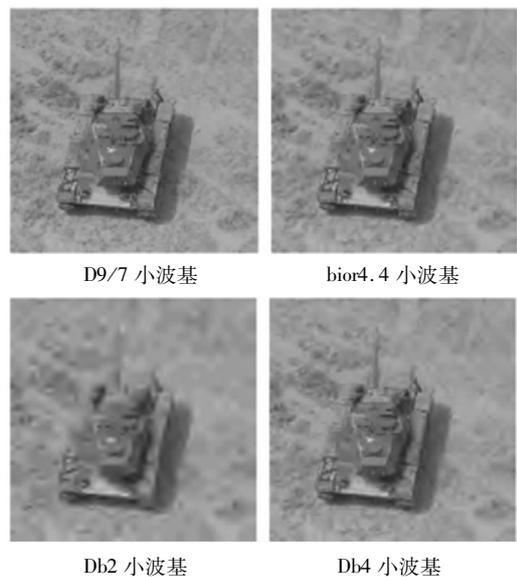


图4 4种小波基对红外坦克图像的压缩效果比较

小波对红外坦克图像压缩后的重构图像更易于目标识别,保留了大量的图像纹理轮廓信息;而后两种小波压缩后的重构图像相对来说比较模糊,丢失了大量的重要信息,不利于进一步的目标识别与跟踪,且通过实验证明整个压缩解码过程的耗时要比前两者短,保证了图像压缩传输系统的实时性。

5 结论与分析

由上述大量实验说明,由分解后的信号可以准确地恢复到原信号,并非所有的小波基都适合红外目标图像压缩。影响红外图像压缩效果的因素主要有:①红外目标图像固有的统计特性;②小波基的数学特性,主要包括小波基的紧支性、对称性、正交性、正则性、消失矩等。

小波基的选择,需要兼顾小波的支撑区间、正交性、正则性和光滑度等多种性质。紧支撑体现了小波函数的能量集中特性;正交性保证变换后的图像经逆变换后能够完全地恢复;正则性和光滑度也是小波的重要特性,将直接影响重构图像的质量;双正交小波的主要吸引力是线性相位,从而在金字塔式的多级分解处理时,无需相位补偿。文献[7]通过具体实验认为,双正交小波基的编码性能在大部分情况下均优于正交小波基。由本文第4节实验也可以看出,双正交小波基对红外目标图像 SPIHT 算法编码的性能要优于正交小波,在熵、峰值信噪比(PSNR)、能量紧致性三个指标上,双正交小波 D9/7 小波和 bior4.4 小波对红外目标图像的编码性能都很优越,尤其 D9/7 小波表现更佳,这一结论也为进一步提高 SPIHT 算法的性能提供了思路。

(上接第541页)

图像旋转在 SVD 去噪中的意义,针对图像中存在的多个主信息方向,提出了分块旋转 SVD 图像去噪算法,同时给出了如何确定图像旋转 SVD 去噪中的旋转角度。仿真实验证实了图像分块旋转 SVD 去噪算法能有效提高传统 SVD 的去噪效果。对于 SVD 在其他应用中的改进,如图像压缩、编码、特征提取、目标检测和模式识别等方面,具有一定的借鉴意义。但是如何进行适当的处理提高 SVD 在实际应用中的性能是一个值得探索的方向,也是值得进一步研究的内容。

参考文献:

- [1] Hou Z. Adaptive singular value decomposition in wavelet domain for image denoising [J]. *Pattern Recognition*, 2003, 36(8): 1747 - 1763.
- [2] 李明喜,毛罕平,张艳诚. 基于提升小波变换和中值滤波的图像去噪方法研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(10): 1109 - 1111.
- [3] 胡谋法,董文娟,王书宏,等. 奇异值分解带通滤波背景抑制和去噪[J]. *电子学报*, 2008, 36(1): 111 - 116.
- [4] Konstantinides K, Natarajan B, Yovanof G S. Noise estimation and filtering using block-based singular value de-

参考文献:

- [1] Said A, Pearlman W. A new fast and efficient image coding based on set partitioning in hierarchical trees [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, 6(3): 243 - 250.
- [2] 毕迎春,王湘海. 小波基和图像分解层数对不同类型图像 EZW 算法的性能的影响[J]. *计算机科学*, 2006, 33(6): 232 - 235.
- [3] Grgic M, Ravnjak M, Zovko Cihlar B. Filter comparison in wavelet transform of still image [C]//*Proc IEEE Int Symp Industrial Electronics, ISIE, Bled, Slovenia, 1999*: 105 - 110.
- [4] 梁燕. 基于小波变换的序列图像感兴趣区域编码[D]. 天津:天津大学, 2005.
- [5] Cohen A, Daubechies I, Feauveau J G. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets [J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 1992, 45(3): 485 - 560.
- [6] Villasenor J, Belzer B, Liao J. Wavelet filter evaluation for image compression [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1995, 4(8): 1053 - 1060.
- [7] Saha S, Vemuri R. Adaptive wavelet filters in image coders how important are they [C]//*Proc. IEEE IECON'99, San Jose, California, 1999, 2*: 559 - 564.
- [8] composition [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997, 6(3): 479 - 483.
- [5] Napa S, Somkait U. Adaptive block-based singular value decomposition filtering [C]. *Computer Graphics, Imaging and Visualisation*, 2007: 298 - 303.
- [6] Yingbo Hua, Maziar N, Petre S. Optimal reduced-rank estimation and filtering [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2001, 49(3): 457 - 469.
- [7] Napa S, Somkait U. Noise suppression using block-based singular value decomposition filtering [C]. *Proceedings of Asia-Pacific Conference on Communications*, 2007: 491 - 494.
- [8] Zeljko D, Sven L. SVD block processing for nonlinear image noise filtering [J]. *Journal of Computing and Information Technology*, 1999, 7(3): 255 - 259.
- [9] Damien M, Salah B, Mireille G. SVD-based image filtering improvement by means of image rotation [C]. *ICASSP, III, 2004*: 289 - 292.
- [10] Roland B, Richard G, Bertrand D. Sliding window adaptive svd algorithms [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, 52(1): 1 - 10.
- [11] Sheinvald J, Kiriati N. On the magic of SLIDE [J]. *Machine vision and Applic.*, 1997, 9(5-6): 251 - 261.
- [12] Aghajan H, Kailath T. SLIDE: Subspace-based line detection [J]. *IEEE Trans. PAMI*, 1994, 16(11): 1057 - 1073.