

基于内嵌小波变换的遥感图像编码

李云松, 吴成柯, 张正阳, 段 勇

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 西安 710071)

摘 要: 本文针对遥感图像的数据特点, 提出了结合双正交小波变换和改进 SPIHT 算法的内嵌小波编码方案。实验结果表明, 本文的方法能够在几乎不降低恢复图像质量的前提下降低了计算复杂度, 提高了编码速度, 有利于实时编码。

关键词: 遥感图像编码; 小波变换; 内嵌编码; 零树; SPIHT

中图分类号: TN919.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 10-0027-04

Remote Sensing Image Coding Scheme Based on Embedded Wavelet Transform

LI Yun-song, WU Cheng-ke, ZHANG Zheng-yang, DUAN Yong

(National Key Laboratory on ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A new remote sensing image coding scheme based on the biorthogonal wavelet transform and revised SPIHT algorithm is proposed according to the statistical characteristic of remote sensing image data. The experimental results show that the proposed scheme could largely speed up the encoding process and reduce computational complexity on condition that reconstructed image quality is sacrificed little. Meanwhile, this scheme has advantage over other algorithms in real time encoding.

Key words: remote sensing image coding; wavelet transform; embedded coding; SPIHT; zerotree

1 引言

遥感图像包括航空摄影、雷达成像、气象卫星云图等数字化图像。近年来, 随着星载传感器遥感分辨率的提高和谱段数的增加, 遥感图像急剧增长的数据量(每秒高达几百乃至上千兆比特)与有限的信道容量之间的矛盾愈发突出。因而, 寻求一种行之有效的数据压缩方法成为当前研究的重点。

与一般静止图像相比, 遥感图像数据的相关性较弱, 具有高熵值和低冗余度的特点, 故进行高性能编码是非常困难的。传统的编码方法主要有 DPCM、矢量量化(VQ)和 JPEG 等, 但应用于遥感图像领域仍存在着一定的局限性, 例如 DPCM 的压缩倍率不高; VQ 的码书设计与最优码矢匹配的计算复杂度随矢量维数上升而急剧增加; JPEG 方法在量化误差较大时会产生明显的“马赛克”块效应, 导致严重的视觉失真。因此, 遥感图像的压缩需要兼顾高压缩比、高性能和低复杂度等要求。

2 编码方案的提出

自小波理论应用于图像编码领域时起, 迄今为止, 各国学者已经提出了许多种结合不同量化和编码措施的小波压缩算法。这些算法大多先使用某种小波变换将原始图像分解成若干个子带图像, 然后再对个子图分别量化, 最后根据某种失真准则进行比特分配和编码。它们普遍存在着两个明显的缺陷: 一是未能有效利用不同尺度子带之间的相关性, 在低比特率

的情况下严重损伤了图像的高频细节信息; 二是未能解决编码效率与计算复杂度同步增大的问题, 故不适合遥感图像的应用^[1]。

众所周知, 量化器的设计是决定图像编码性能优劣的关键。一般认为, 矢量量化优于标量量化, 并且当矢量维数趋于无穷时才能得到理想的最佳香农编码效率, 而近年来提出的内嵌零树编码(EZW)方法^[2]及后期的 SPIHT 方法^[3]打破了传统算法中编码效率与计算复杂度同步增长的限制。它们有效利用了图像小波分解后的固有特征(如多分辨率特性)来设计量化算法, 将编码量小单位缩小到比特。同现有的编码方法相比, 它不仅在性能上具有很高的信噪比和较好的主观视觉质量, 而且编解码速度极快, 同时具有内嵌编码的特征, 能够终止在所需的码率或图像质量处, 有利于逐渐浮现式的图像传输。上述特点都充分说明, 基于小波变换的内嵌编码非常符合遥感图像的压缩要求。

3 小波变换

作为调和的一个分支, 小波理论也为各种信号及图像处理提供了统一的分析框架, 成为当前信号处理领域的研究热点。在图像编码领域, 多分辨率小波变换技术的出发点是多尺度信号分析和基于小波正交基族的信号分解。由于具有描述非平稳信号的独特优点, 小波变换可将图像信号分解

成不同空间分辨率、不同频率特征和方向性特征的子带信号,这便于在失真编码中综合考虑人的视觉特性,同时也利于图像的逐渐浮现传输。

在小波图像编码中,最优小波基的选取成为很重要的一环。在许多准则中,正则性、对称性、消失矩的个数、滤波器长度以及有理数系数、精确重构特性,都成为面向不同实际问题的选取因素。在遥感图像编码中,更侧重于保留原始图像中的点、线等小目标信息,尤其是小目标的形状和位置信息,因为它们往往是一幅遥感图像的重要价值所在,这就要求适合于该类图像的小波基满足两两正交、支集短、正则性好及保持线性相位等特性。

文献[6]中已经提出了一些具有线性相位的支集较短的双正交对称小波滤波器。针对遥感图像的数据分布特点,经过大量实验对比,作者选择了一组较好的滤波器系数,如表1所示。其中,分解小波和重构小波 \tilde{h} 具有相同的消失矩($k=\tilde{k}=4$),尤其是重构小波 \tilde{h} 的正则度较高,可以在解码时获得质量较好的恢复图像。

表1 双正交小波滤波器系数

n	0	± 1	± 2	± 3	± 4
$h(n)$	0.852699	0.377402	-0.110624	-0.023849	0.037829
$\tilde{h}(n)$	0.788485	0.418092	-0.040690	0.064539	0

4 改进的 SPIHT 编码算法

4.1 内嵌编码

所谓内嵌编码就是编码器将待编码的比特流按重要性的不同进行排序,根据目标码率或失真度大小要求随时结束编码;同样,对于给定码流解码器也能够随时结束解码,并可以得到相应码流截断处的目标码率的恢复图像^[2]。

在变换编码中,量化过程所引起的失真会直接影响逆变换后的恢复图像质量,由于目前尚不清楚变换域的失真与人的视觉失真之间的相互作用关系,因此只能使用与主观视觉较为一致的均方误差(MSE)准则来衡量恢复图像的失真程度和指导编码方向。众所周知,酉(unitary)变换具有变换前后欧氏范数的不变性,即

$$D_{MSE}(X - \hat{X}) = D_{MSE}(C - \hat{C}) = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j (c_{ij} - \hat{c}_{i,j})^2 \quad (4)$$

这里, X 和 \hat{X} 分别表示原始图像和恢复图像, C 和 \hat{C} 为量化前后的变换系数。这表明:在整个编码系统中,正交变换本身不带来任何信息量的变化,而所有的信息损失都来自于量化器;同时,如果变换系数 $c_{i,j}$ 被精确地传送到解码端,将引起解码图像的均方误差的降低。这意味着较大幅度值的变换系数包含较多的信息(这里“信息”用来衡量接受端收到这部分编码信息后所引起的失真的减少量),故应该首先传输。所以,对 $|c_{i,j}|$ 值的二进制表示进行排序,并将最重要的位最先优先,以保证恢复图像与原始图像的最大相似程度,这就是内嵌位平面编码的基本思想。

内嵌编码算法中的关键问题在于变换系数的排序算法的确定。由于解码器与编码器使用相同的排序算法,因而码流中的排序信息会直接影响到最终的编码效率。

4.2 改进的 SPIHT 算法

图像小波分解后各子带系数所呈现出来树状的层级分解结构、尺度间明显的相似性与方向性都为后期的编码提供了强有力的依据。内嵌零树编码有效地利用了这种相关性,它基于如下假设:如果在低分辨率上子带系数相对于阈值 T 是不重要的(即幅度值小于或等于 T),那么在同样方向上相应空间位置高分辨率上的子带系数相对于阈值 T 也是不重要的,如图1所示。

SPIHT 算法是 EZW 算法的改进,它将某一树结点及其所有后继结点划归为同一集合,集合的分割过程是不断地将重要集合分成 4 个子集,再分别对每个子集进行重要性测试。重要性测试函数定义为:

$$S_n(\cdot) = \begin{cases} 1, & \max_{(i,j)} |c_{ij}| \geq 2^n \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

如果集合中所有元素的幅值小于某阈值(即该集合是不重要的),则使用一个比特即可表示。由于变换系数在空间定位树结构中的相似性,使采用这种集合分割后的排序算法具有高效率的特点。

简单地说, SPIHT 算法^[3]分为四个部分。这里假设系数按照其幅度值由大到小排列,图2显示了排序后的系数二进制列表。表中每一行代表一层位平面,最上层为符号位,而每一列代表一个变换系数。编码的次序是从最重要的位(最高位)到最不重要的位(最低位)逐个发送,直到达到所需码率后停止。算法可描述如下:

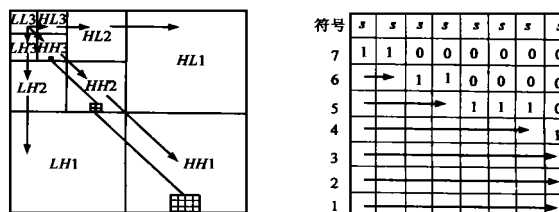


图1 小波系数的零树结构 图2 按幅度排序系数的二进制表示

- (1) 初始化:输出 $n = \lfloor \log_2(\max_{(i,j)} |c_{i,j}|) \rfloor$ 到解码器,即阈值 T 设置为 2^n ;
- (2) 排序过程:对于所有 $2^n \leq |c_{(k)}| < 2^{n+1}$ 的系数,输出坐标 (k) 和符号位;
- (3) 细化过程:对于所有 $|c_{i,j}| \geq 2^{n+1}$ 的系数,输出第 n 层重要位的值;
- (4) 步长更新: n 自减,跳回步骤 2;

由 SPIHT 算法可知,输出的编码信息主要包含两部分:重要像素点的位信息和排序信息。位信息是编码所必需的有效信息,而排序信息则是表征集合结构的辅助信息。排序算法的优劣及排序信息的处理决定了整个编码算法的效率和计算复杂度。SPIHT 算法提出了较为复杂的集合分割策略,这虽然能够获得很高的信噪比,但增加了计算量,降低了编码速度。为了满足卫星遥感图像编码中实时性要求,必须提高编码速度,因此改进算法中简化了集合分割策略,这样虽然增加了重要像素点的排序信息,但提高了编码速度,这种代价是非常值得

的. 本文主要针对排序算法进行了以下改进.

首先对表示集合的几个符号进行说明:

⊗ H :空间定位树所有根结点的坐标集合(塔形结构最高层的结点);

⊗ $Z(i, j)$:点 (i, j) 及其所有后继的坐标集合;

⊗ $D(i, j)$:点 (i, j) 的所有后继(子孙)的坐标集合;

⊗ $O(i, j)$:点 (i, j) 的直接后继(儿子)的坐标集合, 在分层塔形结构的最高层 H 有 $O(i, j) = \{(i + LL, j), (i, j + LL), (i + LL, j + LL)\}$, LL 为最高层 H 的尺度, 除此之外的结点有 $O(i, j) = \{(2i, 2j), (2i, 2j + 1), (2i + 1, 2j), (2i + 1, 2j + 1)\}$;

⊗ $L(i, j)$:点 (i, j) 除直接后继外所有后继的坐标集合;

图 3 直观显示了上述集合的定义.

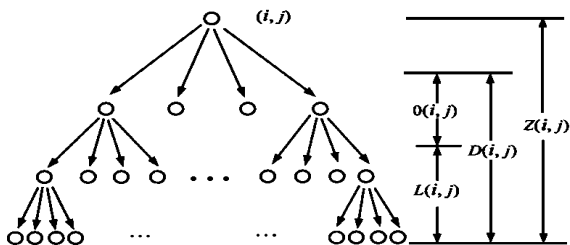


图 3 算法中集合定义的直观显示

SPIHT 算法中集合的分割策略为:

$$\begin{cases} Z(i, j) = \{(i, j)\} + D(i, j) \\ D(i, j) = O(i, j) + L(i, j) \\ L(i, j) = \bigcup_{k, l} D(k, l), (k, l) \in O(i, j) \end{cases} \quad (6)$$

在改进的算法中, 集合的分割策略为:

$$\begin{cases} Z(i, j) = \{(i, j)\} + D(i, j) \\ D(i, j) = \bigcup_{k, l} Z(k, l), (k, l) \in O(i, j) \end{cases} \quad (7)$$

完整的编码算法如下所示(解码算法只需将所有的输出改为输入即可):

符号说明:

⊗ LIS:不重要集合列表, 其中 A 类代表 $Z(i, j)$, B 类代表 (i, j) , C 类代表 $D(i, j)$;

⊗ LSP:重要像素列表.

算法描述:

(1) 初始化:输出 $n = \lfloor \log_2(\max_{(i, j)} |c_{i, j}|) \rfloor$; 令 LSP 为空表, 将 $(i, j) \in H$ 的点的从加入 LIS 中, 并全部置为 A 类.

(2) 排序过程:

对 LIS 中的每个元素 (i, j) 作:

() 如果该元素属于 A 类, 则:

⊗ 输出 $S_n(Z(i, j))$;

⊗ 如果 $S_n(Z(i, j)) = 1$, 则:

—将 (i, j) 移到 LIS 的末尾, 并置为 B 类;

—添加 (i, j) 到 LIS 的末尾, 并置为 C 类;

() 如果该元素属于 B 类, 则:

⊗ 输出 $S_n(i, j)$;

⊗ 如果 $S_n(i, j) = 1$, 则将 (i, j) 移到 LSP 中并输出 $c_{i, j}$ 的符号;

() 如果该元素属于 C 类, 则:

⊗ 输出 $S_n(D(i, j))$;

⊗ 如果 $S_n(D(i, j)) = 1$, 则:

—如果 $L(i, j) = \emptyset$, 将每个 $(k, l) \in O(i, j)$ 加到 LIS 的末尾, 置为 B 类; 否则, 置为 A 类;

—将 (i, j) 从 LIS 中移去;

(3) 细化过程:对 LSP 中的每一项 (i, j) , 输出 $|c_{i, j}|$ 的第 $n - 1$ 层重要位的值.

(4) 量化步长更新: n 减 1, 转(2)执行.

对比原始的 SPIHT 算法^[3], 本文提出的算法主要有以下两点改进:

(1) 采用了更为简单的集合分割与排序策略, 简化了集合内部的关系, 有利于快速实现集合的重要性测试与迭代分割过程;

(2) 排序过程去除了原有的 LIP 表, 提高了 LIS 表的使用效率, 编码时不断地从 LIS 表中将分割的重要像素移到 LSP 中, 同时输出排序信息, 这对于解码时恢复数据的原始空间结构起到了至关重要的作用.

故而改进算法不但提高了编码速度, 且保证了恢复质量. 下面, 通过对遥感图像的计算机仿真实验来测试改进算法的性能与速度.



图 4 本文使用的测试图像

5 实验结果及分析

本文所使用的实验图像均为 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ 的灰度图像(如图 4 所示),其中有 3 幅为标准测试图像,其余为真实遥感图像.其中,双正交小波变换的级数为 5 级,在图像边界处采用了“对折”式扩展.采用峰值信噪比(PSNR)来比较建议的算法与原始 SPIHT 算法及 EZW 算法的压缩性能,模拟结果如表 2 所示.进一步比较建议的算法与原始 SPIHT 算法实现的时间,实验的硬件平台为 Pentium MMX-166 主机,软件平台为 Windows 98,结果如表 3 所示.

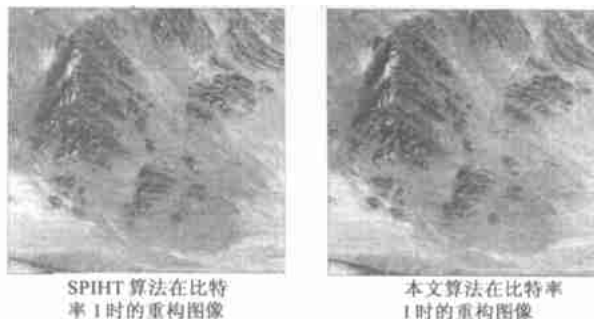


图 5 图像(d)在不同算法下的重构图像

表 2 不同编码方法间的 PSNR(dB) 的比较

图像名 \ 比特率	SPIHT 算法				EZW 算法				本文算法			
	0.25	0.50	0.75	1.00	0.25	0.50	0.75	1.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Lena	32.11	35.55	37.52	39.06	29.79	33.00	35.68	36.60	31.45	34.97	36.97	38.84
Playboy	30.60	34.38	36.58	38.46	28.66	32.09	34.25	35.82	29.91	33.56	36.03	37.76
Goldhill	29.58	32.08	33.83	35.41	28.24	30.53	32.07	33.86	29.21	31.61	33.74	34.99
Band1	27.48	29.95	32.02	33.15	26.28	28.81	29.79	31.29	27.04	29.57	31.32	32.98
Data11	26.65	28.90	30.90	32.75	25.66	27.68	29.08	30.17	26.27	28.82	30.40	32.37
JM5	30.71	32.39	33.45	34.48	28.83	30.27	31.98	33.52	30.55	32.18	33.36	34.17

表 3 对于图像(d)在不同压缩率下 SPIHT 算法和本文算法的 CPU 时间(秒)比较

比特率	SPIHT 算法		本文的方法	
	编码时间	解码时间	编码时间	解码时间
0.25	0.77	0.16	0.63	0.12
0.50	0.99	0.27	0.76	0.22
0.75	1.26	0.44	0.97	0.38
1.00	1.37	0.54	1.07	0.45

由表 2 和表 3 中可以发现,采用本文算法后恢复质量比原始 SPIHT 算法有所下降(仍大大优于 EZW 算法),平均降低 0.39dB(对于标准图像降低 0.46dB,遥感图像降低 0.32dB).但是,编解码的速度却大大提高了,编码时间平均提高 21.9%,解码时间平均提高 17.1%.为了满足卫星遥感图像编码中实时性要求,改进算法利用恢复信噪比的略微降低来换取编码速度的提高,这种代价是非常值得的.而且,恢复图像中没有分块编码所带来的“方块效应”,多数小目标的形状和位置信息得到保留,这也是 JPEG 和一般编码方法所不易达到的.

6 结论

数字遥感图像经过双正交小波变换分解,并结合改进的 SPIHT 算法,使得在限定失真条件下获得高性能低复杂度的图像编码成为可能.上述编码方案兼顾了遥感图像中的编码要求,不仅充分利用了小波变换在数学上的优秀品质,而且合理利用了不同尺度不同方向小波系数间的结构相似性,获得了良好的压缩性能.同时,本文算法继承了原始算法高效率的优点,改进了集合的分割排序策略,大大提高了编解码速度.因此,基于小波变换的内嵌编码将会成为遥感图像领域中颇具前途的编码方法之一.

作者简介:



李云松 1996 年获西安电子科技大学通信与电子系统学士学位,1999 年获西安电子科技大学通信与电子系统硕士学位,现为该校信号与信息处理博士研究生.主要研究方向为图像压缩编码和图像处理.



吴成柯 1962 年毕业于原西北电讯工程学院无线电通信工程系.现为西安电子科技大学教授、博士生导师.1980 年至 1982 年在美国宾夕法尼亚大学作访问学者,1990 年至 1991 年在法国南锡大学作客座教授.目前主要从事计算机视觉、计算机图形学、图像处理和图像通信的教学和科研工作.

参考文献:

- [1] Z. Zhengyang, W. Chengke. Remote sensing image coding method combining wavelet transform with classified vector quantization [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 1998, 11(3): 214 - 219.
- [2] J. M. Shapiro. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. IEEE Trans. Signal Process., 1993, 41(12): 3445 - 3462.
- [3] A. Said and W. A. Pearlman. A new, fast, and efficient image codes based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., 1996, 6(3): 243 - 249.
- [4] S. Mallat. A theory for multiresolution signal decomposition [J]. IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell., 1989, 11(7): 674 - 693.

(下转第 22 页)

D_2 , 结果见表 2.

表 2 对舰船辐射噪声的计算结果

目标类别	目标型号	D_1 估计值	D_2 估计值
A	A1	2.802	4.163
	A2	2.603	2.001
	A3	2.385	0.945
	A4	2.784	4.630
B	B1	2.287	0.867
	B2	2.630	2.144
	B3	2.006	0.968
	B4	2.289	0.388
C	C1	2.702	1.237
	C2	2.262	1.609
	C3	2.114	1.737
	C4	1.755	0.769

从表 2 不难看出, A 类目标的 D_2 大都在 2 以上, B 类目标的 D_2 大都在 1 以下, 而 C 类目标的 D_2 大都在 1~2 之间, 可见 D_2 可能是水声目标的一个比较好的特征. 从表 2 还可以看出, 各个目标的最大李雅普诺夫指数相差很小, 因而最大李雅普诺夫指数不是水声目标的一个好特征.

5 结束语

线性尺度区的确定一直是混沌信号分形分析中的一个富有挑战性的问题, 本文对此问题进行了比较深入的研究, 给出了一套具体的算法, 从实验结果来看, 该算法在提取混沌信号的分形维时, 不仅具有比较快速、准确的优点, 而且具有一定的抗噪声干扰的能力. 在运用本算法分析水声信号时, 该算法表现出了广阔的应用前景, 因而是一种实用的好方法.

参考文献:

- [1] P. Grassberger and I. Procaccia. Characterization of stranger attractors [J]. Phys. Rev. Lett., 1983, 50(5): 346 - 349.
- [2] 谢文录等. 时间序列中的分形分析和参数提取 [J]. 信号处理, 1997, 13(2): 97 - 104.
- [3] D. Kugiumtzis. State space reconstruction parameters in the analysis of chaotic time series the role of the time window length [J]. Physica D, 1996, 95: 13 - 28.
- [4] J. C. Schouten et al. . Estimation of a noisy attractor [J]. Phys. Rev. E, 1994, 50(3): 1851 - 1861.
- [5] J.-P. Eckmann et al. . Fundamental limitations for estimating dimensions and Lyapunov exponents in dynamical systems [J]. Physica D, 1992, 56: 185 - 187.
- [6] Y. C. Lai et al. . Effective scaling regime for computing the correlation dimension from chaotic time series [J]. Physica D, 1998, 115: 1 - 18.
- [7] F. Takens. Detecting strange attractors in fluid turbulence [A]. in: Dynamical Systems and Turbulence [C]. eds. D. A. Rand and L. S. Young, Springer, Berlin, 1981: 366 - 381.
- [8] 杨绍清等. 一种最大李雅普诺夫指数估计的稳健算法 [J]. 物理学报, 2000, 49(4): 636 - 640.

作者简介:



杨绍清 1965 年生, 海军大连舰艇学院火控教研室讲师, 哈尔滨工业大学导航、制导与控制专业博士生, 主要研究方向: 混沌信号分析, 图像处理, 控制系统理论等.

章新华 1962 年生, 博士后, 96 年在浙江大学工业控制技术研究所获工学博士学位, 现为海军大连舰艇学院副教授, 主要研究方向: 智能信息处理及其在水声信号处理和军事系统建模中的应用.

(上接第 30 页)

- [5] A. Cohen, I. Daubechies, and J. Feaureau. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets [R]. Tech. Rep. TM11217-900529-07, AT&T Bell lab., 1990.
- [6] M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu, and I. Daubechies. Image coding using wavelet transform [J]. IEEE Trans. Image Processing, 1992, 1(2): 205 - 220.