

基于软门限去噪的图象压缩编码研究

余 越

(清华大学电子工程系, 深圳市华为技术有限公司, 北京 100084)

薛永林 李凤亭 葛成辉

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 在详细地分析了 Donoho 提出的子波域软门限去噪方法的基础上, 给出了含噪图象信号噪声水平的估计及门限值随尺度变化的规律. 采用可分离的二维子波滤波器, 方便地将 Donoho 的软门限去噪方法应用于图象信号处理, 从而对含噪图象, 在去除噪声的同时, 又最大限度地进行了压缩. 针对含噪的自然景物图象和合成孔径雷达图象的不同特点, 分别提出了这两类图象的压缩方案. 对于 SAR 图象的压缩编码, 通过一个自然对数变换, 使得乘性噪声转变为适于软门限去噪的加性噪声. 模拟结果显示, 用软门限方法处理的解压缩图象比硬门限方法具有更好的视觉质量, 因而该方法是解决含噪图象压缩编码的有效技术.

关键词 子波变换 软门限 图象压缩 噪声

中图法分类号: TP919.81 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2001)01-0046-05

Noise Image Coding Using Soft-Threshold Based Denoising

YU Yue

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084,
Shen Zhen Huawei Tech. Co. Ltd. Shenzhen 518000)

XUE Yong-ling, LI Feng-ting, GE Cheng-hui

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The soft-threshold method proposed by Donoho is studied in this paper. The noise standard deviation of noise image and the thresholds of different scale are given. A separable 2-D wavelet filter is used so that the soft-threshold denoising by Donoho is expediently applied to image processing, such as simultaneous denoising makes compression rate of a noisy image be large farthest. For noise image of nature scene and SAR, different image compression schemes are proposed respectively. Especially for SAR image, a natural logarithm transforms multiplicative noise to additive noise so that SAR image can be suppressed via the soft-threshold denoising scheme. Experimental results show the decoded images by the soft-threshold denoising have better quality than by the hard-threshold denoising. It indicates that the improved ways in this paper are effective for noise image compression.

Keywords Wavelet transform, Soft-threshold, Image compression, Noise

0 引 言

基于子波变换^[1]的无失真及有失真压缩编码方法^[2]以其高压缩比、中等复杂度等特点而在近几年得到了广泛的重视, 而 Shapiro 提出的零树量化

(EZW)^[3]以及 Said 提出的 SPIHT 算法^[4]则是众多算法中的佼佼者. 由于子波变换是线性变换, 而且子波域图象信号具有多分辨率特性, 因而子波变换在提供高压缩比的同时, 也能使含有不同尺度、不同形态噪声的含噪图象在子波域去噪成为可能, 也就是说, 利用子波变换所具有的高压缩比及去噪这两个

特点,可望对含噪图象在去除噪声的同时,能最大限度地压缩图象。

Mallat 等人最先通过分析奇异性不同的信号在子波域的特征,而提出了一个基于子波域的去噪方法^[5],但该方法在应用时,较为复杂,且没有严格的理论保证;Lu 等人通过研究医学图象的特点,结合子波变换理论,给出了一个子波域滤波器^[6];Donoho 在研究传统的阈值门限的基础上,给出了一种基于正交子波变换的,称为软门限的子波域去噪方法^[7],由于该方法具有很好的性能,且有严格的理论保证,操作也非常简单,因此有很好的应用前景。

本文主要研究含噪的自然景物图象以及合成孔径雷达(SAR)图象的压缩方法。

1 子波域软门限去噪方法

为方便讨论,这里先介绍一维信号的情况.由于大多数二维子波变换采用了可分离的一维子波变换,因此可以很自然地将一维信号的结论推广到二维的图象信号。

令一维观测信号 y_i 为

$$y_i = f(t_i) + \sigma z_i, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (1)$$

其中, $t_i = i/n$; z_i 为一独立同分布零均值方差为 1 的高斯白噪声; $f(t_i)$ 为理想信号; σ 为噪声水平. 由于处理的目的是要从观测信号 y_i 中恢复出信号 $f(t_i)$, 因此若考虑式(1)的子波变换,则有

$$W(y_i) = W\{f(t_i) + \sigma W(z_i)\} \quad (2)$$

其中, $W(\cdot)$ 表示对信号作子波变换的线性算子. 由于子波变换是线性变换,因此式(2)可写为

$$W(y_i) = W\{f(t_i)\} + \sigma W(z_i) \quad (3)$$

式中, $\sigma W(z_i)$ 即为子波域的噪声信号,且易证明,

$\sigma W(z_i)$ 也是零均值和噪声水平为 σ 的独立同分布高斯白噪声。

若将式(3)写为

$$W\{f(t_i)\} = W(y_i) - \sigma W(z_i) \quad (4)$$

则有

$$f(t_i) = W^{-1}\{W(y_i) - \sigma W(z_i)\} \quad (5)$$

其中, $W^{-1}(\cdot)$ 为逆子波变换算子. 若按一定的误差准则估计 $\sigma W(z_i)$, 则有理想信号 $f(t_i)$ 的估计值 $\hat{f}(t_i)$

$$\hat{f}(t_i) \approx W^{-1}\{W(y_i) - T_i\} \quad (6)$$

式(6)表明,只要估计出噪声的子波域表示,然后将它从观测信号子波域中去掉,再经逆子波变换后,就可以得到理想信号 $f(t_i)$ 的一个估计 $\hat{f}(t_i)$. 显然,其不可能准确估计出每一个 T_i , 针对此问题, Donoho 提出了如下的软门限去噪方法,即

$$\eta_T(x) = \begin{cases} x - T, & x \geq T \\ 0, & |x| < T \\ x + T, & x < -T \end{cases} \quad (7)$$

式中, x 为子波域系数, $\eta_T(x)$ 为去噪后的子波域系数. n 为数据长度,门限值 T 由下式给出

$$T = \sigma \frac{\sqrt{2 \log(n)}}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

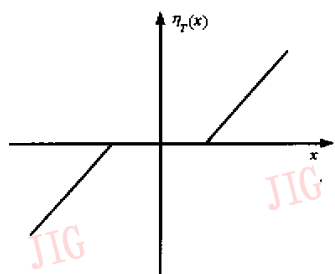
式(7)给出的软门限方法可用图 1(a)形象地表示. 为便于比较,这里也给出了传统的硬门限方法。

$$\eta_T(x) = \begin{cases} x, & |x| \geq T \\ 0, & |x| < T \end{cases} \quad (9)$$

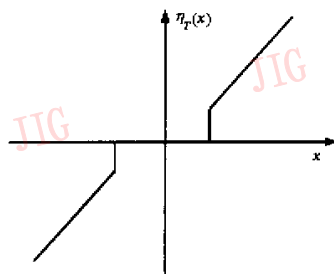
图 1(b)则形象地表示了这种情况。

Donoho 证明了软门限方法具有如下两个鲜明的特点^[7]:

(1) 在大范围的平滑度量下, $\hat{f}(t_i)$ 以大概率至少与 $f(t_i)$ 具有相同的光滑度;



(a) 软门限



(b) 硬门限

图 1 软硬门限示意图

(2) $\hat{f}(t_i)$ 是 $f(t_i)$ 在任意度量空间中的一个最小均方估计.

在式(8)给出的门限值中,由于噪声水平不可能预先知道,因此,Donoho 方法的关键之一是要正确估计出 σ ,进而计算出门限值 T .

2 基于软门限去噪的图象压缩编码

典型的基于子波变换的图象压缩过程可由如图2的基本框图表示,即该过程是由用于去相关的子波变换、针对人类视觉系统(HVS)特点的量化方法及无失真的熵编码组成.

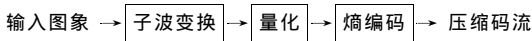


图2 基于子波变换的图象编码器

子波变换图象压缩编码的变换级一般采用二维离散子波变换^[1],即该子波变换是对二维图象信号分别在水平和垂直方向做一维离散子波变换的结果,也就是输入图象信号 $S_0(i, j)$ 经 K 次分解后,即构成一个二叉树数据结构,其中, $S_n(i, j)$ 表示第 n 次分解后的逼近信号, $D_n^{HH}(i, j)$, $D_n^{HL}(i, j)$, $D_n^{LH}(i, j)$ 则分别表示逼近信号 $S_{n-1}(i, j)$ 分别经过行高通、列高通;行高通、列低通,行低通、列高通滤波的结果.由于去噪和压缩编码都是针对子波域信号而言的,且这两个过程可视为完全独立的,因此含噪图象的压缩编码过程如图3所示.



图3 基于子波变换的含噪图象编码器

与一维信号类似,二维图象信号的去噪也是用子波域各系数按式(7)减去相应的门限值来处理.对于一维信号,Donoho 虽给出了一个噪声水平的估计式^[7],但经大量实验表明,这一经验公式对二维图象信号并不准确;而对于二维图象信号,根据反复实验结果,给出如下的含噪图象噪声水平估计式

$$\hat{\sigma} = \frac{MAD(D_1^{HH})}{0.8} \quad (10)$$

其中, $MAD(D_1^{HH})$ 为行、列都经高通滤波后所得到的平均子波系数绝对值,0.8为实验常数.

特别值得注意的是,与一维信号不同,由于去噪处理应仅对子波系数进行,而用二维可分离子波变换的结果,使得 $D_n^{HL}(i, j)$, $D_n^{LH}(i, j)$ 仅在一个方向

上“相当于”子波系数,因此本文将 $D_n^{HL}(i, j)$, $D_n^{LH}(i, j)$ 带门限值设为 $D_n^{HH}(i, j)$ 带的一半,而不是对同一尺度的所有子带系数均使用同样大小的门限值.

Donoho 对于所有尺度的子波系数都使用同一门限值,但在压缩编码应用中,由于子波变换是采用隔二抽一的正交或双正交子波变换,且噪声信号在各个尺度的贡献是不相同的,因此噪声信号的这种特性使得对不同的尺度的子波系数应采用不同的门限值,即门限值应随尺度的变化而变化.

令第 l 级门限值为 T_l ,则第 $l+1$ 级的门限值为 (l 级的分辨率比 $l+1$ 级高)

$$T_{l+1} = T_l/C \quad (11)$$

其中, C 为一常数,它与图象特征有关,其具体数学关系有待研究,这里根据实验,取其值为 1.2.

综上所述,本文给出如下含噪图象的压缩编码方法:

- (1) 对输入图象信号作二维子波变换;
- (2) 用式(10)计算噪声水平 $\hat{\sigma}$;
- (3) 用式(8)计算出第 1 级的门限值 T_1 ,第 n 级的门限值 T_n 由式(11)计算出;
- (4) 对 n 级 $D_n^{HL}(i, j)$, $D_n^{LH}(i, j)$ 带子波系数用 T_n 为门限值, $D_n^{HH}(i, j)$ 带子波系数用 $2T_n$ 为门限值分别作软门限处理;
- (5) 对经门限处理后的子波系数进行量化及游程编码.

以上算法对于含噪的自然景物图象的去噪有很好的效果,虽然 SAR 图象作为一种应用极为广泛的遥感图象也可以视为一种被噪声污染的图象,但直接将上述算法应用于 SAR 图象的压缩编码,效果并不理想.通过考察 SAR 图象噪声信号产生的机理,若目标的表面相对于照射波长较为粗糙时,则记录到的目标图象是许多相互独立的散射中心回波的矢量叠加,由于这些散射中心的回波相位是完全随机的,因而导致在成象后的 SAR 图象上出现被称为相干斑噪声的随机噪声.由于这种相干斑噪声降低了图象的分辨率,使得图象的细节结构被噪声掩盖,从而也降低了 SAR 图象的实际应用.经研究表明,这种相干斑噪声与通常附加在信号上的加性噪声不一样的是,它可以视为 SAR 图象附加了一个乘性的高斯白噪声,即

$$y(i, j) = f(i, j) \times \sigma z(i, j) \quad (12)$$

SAR 图象不仅具有式(12)的特性,而且由于它是工作于微波波段雷达的成象结果,因此 SAR 图象在灰

度级分布上与普通的光学图象有很大的不同,从 SAR 图象直方图也可以看出,其灰度分布更密,方差较小. SAR 图象的这两个特征,使得在对 SAR 作子波变换以前,就先可以对 SAR 图象作对数变换,即有

$$\ln\{y(i, j)\} = \ln\{f(i, j)\} + \sigma \ln\{z(i, j)\} \quad (13)$$

文献[8]也采用了对数变换,本文通过实验比较发现,自然对数比以 10 为底的对数变换,其主观视觉效果更好. 相应地,基于子波域去噪的 SAR 图象压缩编码过程如图 4 所示.

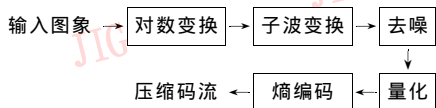


图 4 基于子波变换的 SAR 图象编码器

由于对数变换,一方面使式(12)的乘性噪声转变为式(13)的加性噪声,且满足了式(1)的条件;另一方面,对数变换还可改善原 SAR 图象的灰度分布,从而改善了图象的主观视觉效果,实验结果也证实了以上方法的正确性. 当然与图 4 相对应的解码器,在解压后要相应作一次指数变换.

以上介绍的含噪图象的压缩编码,基本上是将 Donoho 子波域去噪及压缩编码作为两个相互独立的环节来考虑的,即认为经去噪的子波系数与不含

噪图象的子波域是一致的. 由于软门限去噪只是统计意义上的去噪,因此子波域的一些“真实”信号经门限处理后也受到了削弱. 事实上,由于基于 EZW 和 SPIHT 这些典型的子波域量化方法可以认为是基于多个位平面的编码方法,其压缩倍率越高,子波系数被“削减”得也越多,因此对于含噪图象而言,压缩编码过程也有去噪的作用. 基于以上考虑,对高压压缩比含噪图象进行压缩,合理的做法是适当降低门限值,从而达到更好的主观视觉效果.

3 实验结果

为验证本文提出的方法,本文对图 5、图 8 所示的大小为 512×512 象素、8bit 量化的含噪 Lena 图象(噪声水平 $\sigma=15$, 系人为加入噪声)和一幅典型的 SAR 图象进行了压缩编码实验. 实验中,量化方法是采用 SPIHT 算法,图 6、图 9 分别给出了这两幅图象用软门限去噪压缩 30 倍后的解码图象,为便于比较,图 7、图 10 同时还给出了用硬门限去噪后压缩编码的结果,从实验结果可以明显看出,软门限方法给出的解压图象比硬门限方法具有更好的视觉效果.



图 5 含噪的 Lena 图象



图 6 用软门限去噪压缩 30 倍的 Lena 解码图象 (PSNR=33.8dB)



图 7 用硬门限去噪压缩 30 倍的 Lena 解码图象 (PSNR=31.5dB)

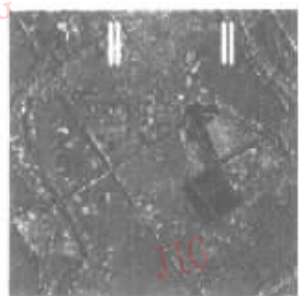


图 8 一个典型的 SAR 图象

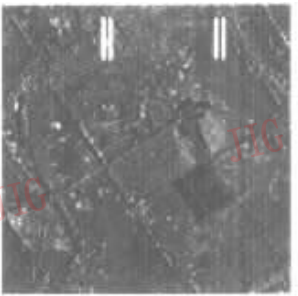


图 9 用软门限去噪压缩 30 倍的 SAR 解码图象 (PSNR=25.6dB)

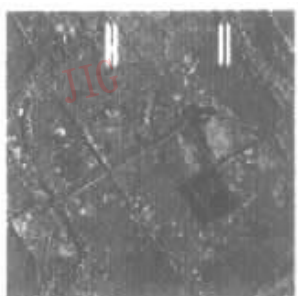


图 10 用硬门限去噪压缩 30 倍的 SAR 解码图象 (PSNR=24.3dB)

参 考 文 献

- 1 Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Comm. on Pure and Appl. Math.*, 1988,11:674~693.
- 2 Antonini M, Barlaud M, Mathieu P *et al.* Image coding using wavelet transform. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1992, 1(2):205~220.
- 3 Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelets coefficients. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1993,41:3445~3462.
- 4 Said A, Pearlman W A. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in Hierarchical Trees. *IEEE Trans. Circ. Syst. Video Tech.* 1996,6(3):243~250.
- 5 Mallat S G, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1992, 38(2):617~643.
- 6 Lu J, Healy D M, Weaver J B. Contrast enhancement of medical images using multiscale edge representation. *Optical Engineering*, 1994,33(7):2151~2161.
- 7 Donoho D L. De-noising via soft-thresholding. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1995,41(3):613~627.
- 8 Guo H, Odegard J E, Lang M *et al.* Wavelet based speckle reduction with application to SAR based ATD/R. *IEEE International Conference on Image Processing*, 1994,1:74~79.

余 越 1969年生,1990年在电子科技大学获工学学士学位,1992年、1996年先后获北京理工大学硕士、博士学位,现为清华大学电子工程系与深圳华为技术有限公司联合培养的博士后.目前的研究方向是图象/视频信号压缩、小波变换理论及应用.

薛永林 1965年生,1989年在清华大学电子工程系获工学学士学位,1992年在中国科学院空间中心获硕士学位.现为清华大学电子工程系讲师.目前的研究方向是图象/视频信号压缩、遥感图象处理.

李凤亭 清华大学电子工程系副教授,长期从事图象处理、多媒体通信的教学与科研工作,完成多项国家重点攻关项目.目前主要研究方向是视频压缩及图象通信.

葛成辉 清华大学电子工程系教授,曾任图象图形学会常务副理事长,长期从事遥感图象处理及系统、图象压缩及通信的教学与科研工作.目前主要研究方向是遥感图象处理、多媒体信息系统等.