

基于小波变换的 SAR 图像自适应子带编码算法

李永乐, 程英蕾, 孙纪庆, 郭锐

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:为降低大数据量 SAR 图像对传输带宽和存储空间的要求,必须对 SAR 图像进行高效压缩。基于小波变换的传统 SAR 图像压缩方法只对低频子带进行分解处理,造成 SAR 图像处于中高频子带的重要纹理信息丢失。针对上述问题,提出一种基于小波变换的自适应 SAR 图像压缩算法。首先对图像进行小波软阈值消噪预处理,然后依据能量指标,进行子带重要性判定,对认定为重要的子带进行深一层次分解,分解完成后对所有子带进行恒定比特率条件下的最小误差量化,实现对图像的自适应压缩。仿真实验表明:该算法能很好地保护 SAR 图像的高频细节,提高了信噪比。

关键词:小波变换;SAR 图像;自适应压缩;子带编码

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.03.011

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)03-0048-05

合成孔径雷达 SAR(Synthetic Aperture Radar, SAR)以其分辨率高、成像范围广和全天候工作的特点而广泛应用于地球遥感、资源勘测、海洋研究、灾情预报和军事侦察等领域^[1]。由于 SAR 系统通过星载和机载的方式进行工作,图像数据量巨大,对 SAR 图像传输和存储能力要求很高,因此需要对 SAR 图像进行有效压缩。常见的小波压缩算法仅仅对图像低频子带进行多分辨分析,不能自适应地对各个子带进行针对性编码,应用于高频信息丰富的 SAR 图像效果不够理想。自适应小波变换编码(ADWT)能够在抑制噪声的同时,较好地保护 SAR 图像的边缘和纹理细节,对所有低频和高频子带进行自适应处理,将是很有发展前景的一种 SAR 图像压缩技术^[2]。本文在对 SAR 图像进行必要消噪处理的基础上,提出一种基于子带重要性判断的自适应子带编码算法,获得了较好的结果。

1 小波联合阈值消噪

SAR 图像中包含的大量斑噪声降低了像素间的相关性,造成压缩时大量比特被浪费,压缩效果变差,故对斑噪声进行有效的去除至关重要^[3]。SAR 图像斑噪声是一种与信号有关的乘性噪声,对此人们提出多种空域滤波器。一类是通过取对数运算把乘性噪声变为加性噪声再去噪的同态滤波器,另一类是基于污染图像的乘法模型进行滤波,比如一些典型的局域自适应滤波器^[4],包括 Lee 算法、Frost 算法、Kuan 算法,还有 Gamma MAP 滤波。Stanford 大学统计学教授 Donoho 首次提出了一种基于小波变换的 SAR 图像软阈值降噪方法^[5]。通过对数运算将乘性斑噪声转换成加性噪声,然后在小波域计算出各个子带的消噪阈值并对系数进行收缩操作,以达到消除 SAR 图像斑噪声的目的。

本文在深入分析上述方法的基础上,对软阈值消噪方法进行改进,针对子带系数的统计特征和能量分布,提出基于小波的联合阈值消噪方法。引入可随子带绝对偏差不同而变化的联合因子,进行灵活地自适应收缩处理。计算公式如下:

收稿日期:2009-08-24

基金项目:国家“863”计划资助项目(2007AAXX1206)

作者简介:李永乐(1984-),男,陕西西安人,硕士生,主要从事图像压缩研究. E-mail:112y31@163.com

$$\hat{c}_{m,d}(i,j) = \begin{cases} \text{sign}[c(i,j)](|c_{m,d}(i,j)| - \lambda_{m,d}\text{Thr}_{m,d}), & |c_{m,d}(i,j)| > \text{Thr}_{m,d} \\ 0, & |c_{m,d}(i,j)| \leq \text{Thr}_{m,d} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $c_{m,d}(i,j)$ 和 $\hat{c}_{m,d}(i,j)$ 分别为第 m 层 d 方向的原始系数和估计值, d 可取值为 1、2 和 3, 分别对应水平、垂直和斜线方向; $\lambda_{m,d}$ 表示对应子带的联合因子, 其定义为:

$$\lambda_{m,d} = \sum_{i,j} |c_{m,d}(i,j) - u_{m,d}| / \sum_{d=1}^3 \sum_{i,j} |c_{m,d}(i,j) - u_{m,d}| \quad (2)$$

式中 $u_{m,d}$ 是第 m 层 d 方向的高频小波系数矩阵的均值。分子表示对应高频子带系数的绝对偏差, 分母表示同一层 3 个高频子带系数的绝对偏差值之和。 $\lambda_{m,d}$ 表征了对应高频子带的绝对偏差在同尺度所有高频子带绝对偏差的比值, 即在一定程度上表现了对应子带所含斑噪声的多寡。可变联合因子根据子带的绝对偏差进行自适应地阈值收缩处理, 能够较好地抑制噪声并保护有效细节, 达到更好的消噪结果。

2 自适应子带编码

常见的小波压缩算法仅仅对图像低频子带进行多分辨分析, 不能自适应地对各个子带进行针对性编码, 应用于高频信息丰富的 SAR 图像效果不佳。针对这个问题, 本文对 SAR 图像进行小波分解, 根据子带重要性不同有选择地进一步分解, 进行自适应量化编码。

2.1 子带重要性判断

图像经过 N 层小波变换后, 产生最初的 $3N + 1$ 个子带。由于 SAR 图像包含大量有用的中高频信息, 所以必须对各重要子带进行深一层次的分解, 以加强对细节的保护, 重要子带的判断用能量 E 来衡量^[6]:

$$E_{m,d} = \frac{1}{MN} \sum_{i,j} c(i,j)^2 \quad (3)$$

式中: M, N 分别为相应子带的大小; $c(i,j)$ 为子带内的小波系数; m, d 分别为尺度和方向。

本文算法中, 如果同一尺度上, 某高频子带能量小于所有高频子带的算术平均能量, 则认为它是不重要了带, 不对其进行进一步小波分解, 否则进行深一层分解, 但是最多进行 3 层分解。各层次各方向子带的能量数据见表 1。

从表 1 中可以看出, 第 1 层分解中的斜线方向子带包含的能量最少; 第 2 层高频水平、垂直子带中包含很少的低频能量和较多的斜线能量, 这符合小波系数的统计特性^[7]。同理, 按照重要性判断准则对余下的子带进行迭代处理。整个图像最多进行 3 层小波分解, 最终得到 34 个子带, 其结构见图 1。

表 1 各子带的平均能量值
Tab. 1 Mean energy of the subbands

子带	能量	子带	能量	子带	能量
a	0.569 4	a_v	0.045 7	v_a	0.001 1
h	0.001 0	a_d	0.0149	v_h	0.000 7
v	0.001 9	h_a	0.000 5	v_v	0.003 8
d	0.000 4	h_h	0.001 6	v_d	0.002 1
a_a	2.193 9	h_v	0.000 4		
a_h	0.022 9	h_d	0.001 5		

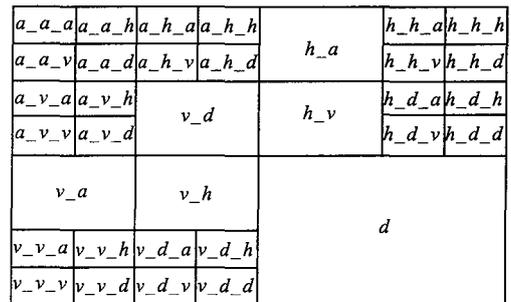


图 1 小波分解结构图

Fig. 1 Structure of wavelet transforms

2.2 自适应分块量化

小波分解后需对系数进行合适的量化, 以便消除视觉冗余, 达到压缩图像的目的。除去低频子带进行无损压缩外, 对其他高频子带进行 $2^{L-m+1} \times 2^{L-m+1}$ 大小的分块处理。由于最高分解层数 L 为 3, 故最高层分解得到的各高频子带分成大小为 2×2 的互不重叠的子系数块, 第 2 级分解得到的各高频子带分成大小为 4×4 的互不重叠子块; 同理, 第 1 尺度中的高频子带分成 8×8 的互不重叠子块。图像中方差大的区域其包含的有用信息也较多^[8]。针对不同系数块包含信息的多寡, 可以将它们分为关键块、有效块和非重要块 3 类。划分的标准就采用每个系数块的标准差, 如下式:

$$\sigma_K = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j \in S_K} (c(i,j) - \mu_K)^2} \quad (4)$$

式中: σ_K 、 N 和 μ_K 分别为第 K 个子系数块的标准差、系数个数和均值; S_K 为第 K 个子系数块所占区域; $c(i,j)$ 为 S_K 区域内的系数。根据各个子系数块的标准差与阈值 T_1 和 T_2 的比较, 判断子系数块的类别。

若 $\sigma_K \leq T_1$, 则认为第 K 个子系数块包含信息较少, 属于非重要块; 如果 $T_1 < \sigma_K \leq T_2$, 则认为该子系数块包含信息量适中, 属于有效块; 如果 $T_2 < \sigma_K$, 则认为该子系数块包含信息很多, 属于关键块。本文针对这三类不同的子系数块, 采用如下量化方法:

1) 关键块。由于关键块包含了图像的重要成分, 对图像的纹理信息重构至关重要, 所以根据需要采用 b 比特的最小误差的均匀量化。

2) 有效块。有效块包含了重构图像所需的大量有效细节信息, 对其进行二值量化。将块内大于均值的小波系数置 1, 等于小于均值的小波系数置 0。在解码端, 用所有大于均值的系数均值重构置 1 的系数, 用所有小于等于均值的系数均值重构置 0 的系数。

3) 非重要块。对于包含信息很少的不重要块, 对块内系数全部置 0, 只传输子块均值, 系数重构时采用均值恢复, 这样可以更大程度压缩数据。

2.3 比特位分配

对关键块量化过程中的位分配 (Bits Allocation) 问题是基于小波变换的编码问题的关键因素, 即在一定的平均比特位数的前提下, 通过计算关键块内每一个系数编码时分配的比特数, 使得编码总失真最小, 从而得到最佳的编码效果。

对于一个 $K \times K$ 大小的关键系数块, 令 $d_{i,j}(R_{i,j})$ 表示当该关键块内第 i 行第 j 列的系数分配 $R_{i,j}$ 位时引起的失真, D 为总体失真, b 为块内所有系数的平均编码位数, 可知:

$$D = \sum d_{i,j}(R_{i,j}), \sum R_{i,j} = K^2 b \quad (5)$$

这样, 位分配问题实际上就是找到一组 $R_{i,j}$, 使 D 最小。这是一个条件最优化问题, 通过拉格朗日乘数法可解得:

$$R_{i,j} = b + \log_2 \frac{\sigma_{i,j}}{\sigma}, \sigma = \left(\prod_{i,j} \sigma_{i,j} \right)^{K^{-2}} \quad (6)$$

式中: $\sigma_{i,j}$ 为该关键块内第 i 行第 j 列的系数方差; σ 为所有系数方差的几何均值。这样, 得到每个系数的码率 $R_{i,j}$, 量化步长为 $L_{i,j} = 2^{R_{i,j}}$ 。

2.4 均匀量化和熵编码

在大间隔分层量化时, 均匀量化配合熵编码能得到最优的编码性能^[9]。故本文采用均匀量化结合熵编码, 该方法简单高效, 唯一需要计算确定的就是各个系数的量化步长。

假设系数的概率分布函数 $p(x)$ 关于 Y 轴对称, 只考虑正区间, 将 $L/2$ 层分成长度为 Δ 的小区间, 对于内部区间 $[(k-1)\Delta, k\Delta]$, 代表值取 $r_k = (2k-1)\Delta/2$, 包含正无穷的边界区间的代表值取 $(L-1)\Delta/2$ 。若已知概率密度函数 $p(x)$ 和量化层数 L , 就可以确定量化步长 Δ , 使失真最小。该均匀量化器的示意图见图 2。

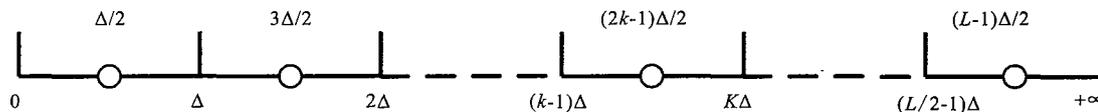


图 2 均匀量化器示意图

Fig. 2 Sketch map of symmetrical quantizer

图 2 中数轴下方数字表示区间端点, 上面数字则是落在某区间对应的量化代表值, 那么这个均匀量化器的失真 D 就表示为:

$$D = 2 \sum_{k=1}^{\frac{L}{2}-1} \int_{(k-1)\Delta}^{k\Delta} \left(\frac{2k-1}{2}\Delta - x \right)^2 p(x) dx + 2 \int_{L/2-1}^{\infty} \left(\frac{L-1}{2}\Delta - x \right)^2 p(x) dx \quad (7)$$

为了求取失真 D 的最小值, 可令 $\frac{dD}{d\Delta} = 0$, 得:

$$\sum_{k=1}^{\frac{L}{2}-1} (2k-1) \int_{(k-1)\Delta}^{k\Delta} \left(\frac{2k-1}{2}\Delta - x\right)^2 p(x) dx + (L-1) \int_{-(L/2-1)\Delta}^0 \left(\frac{L-1}{2}\Delta - x\right)^2 p(x) dx = 0 \quad (8)$$

解这个非线性方程,可以算得 Δ 的值。统计结果表明,在高频子带,小波变换系数更符合广义高斯分布^[10],本文近似按照高斯分布将概率密度函数 $p(x)$ 和量化层数 L 带入式(8),得到对应系数的最小误差量化步长 Δ 。所有系数使用各自对应的量化步长,量化值计算如下式:

$$\hat{c}(i,j) = \text{sign}[c(i,j)] \text{round}\left[\frac{|c(i,j)|}{\Delta}\right] \quad (9)$$

式中 $c(i,j)$ 和 $\hat{c}(i,j)$ 分别为原小波系数和量化后系数。量化完毕后,进行哈夫曼编码,再对输出的 0/1 代码进行行程编码,降低编码冗余,进一步提高压缩比。

3 仿真实验及结果分析

本文对一幅大小为 256×256 的某地区 SAR 图像,在 MATLAB 7.1 仿真环境下进行仿真实验。实验中采用“db4”小波基函数进行变换,边界处理采用周期延拓。表 2 列出了在不同压缩比情况下,该 SAR 图像经过 JPEG2000 方法、EZW 方法和本文方法的重构图像峰值信噪比 (PSNR);图 3 通过曲线表现了 3 种方法的压缩性能;图 4(c) - (e) 分别是 3 种方法的局部重构效果图。

表 2 相同比特率下 3 种方法的 PSNR

比特率	JPEG2000/dB	EZW/dB	本文方法/dB
2.0	29.6	29.5	29.2
1.0	25.4	25.0	25.2
0.8	23.6	23.3	23.8
0.5	22.1	21.5	22.4
0.4	20.9	19.6	21.3
0.3	19.7	18.7	20.4
0.2	18.9	18.1	19.0

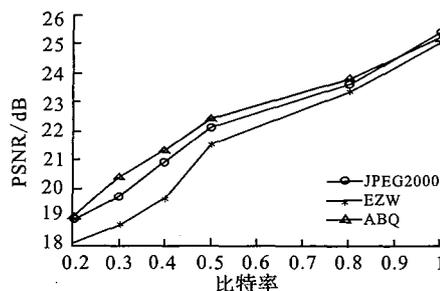


图 3 3 种编码方法的 PSNR 曲线图

Fig. 3 PSNR result of three approaches

由上述压缩客观数据和主观目视效果的对比可知,在 PSNR 方面,对该 SAR 图像压缩结果而言,本文方法总体性能优于 JPEG2000 和 EZW 方法,尽管在高比特率的情况下 JPEG2000 的信噪比略高。通过压缩性能的曲线图,可以更加清楚地看出 3 种方法的 PSNR 随比特率的变化趋势。在高比特率条件下, JPEG2000 算法和 EZW 算法压缩效果大致相当,而本文方法处于两者之间。当比特率为 0.85 时, JPEG2000 和本文方法的 PSNR 一样。但是当比特率进一步减小,本文算法由于尽可能地保护了高频,对图像的重构效果起到重要作用。

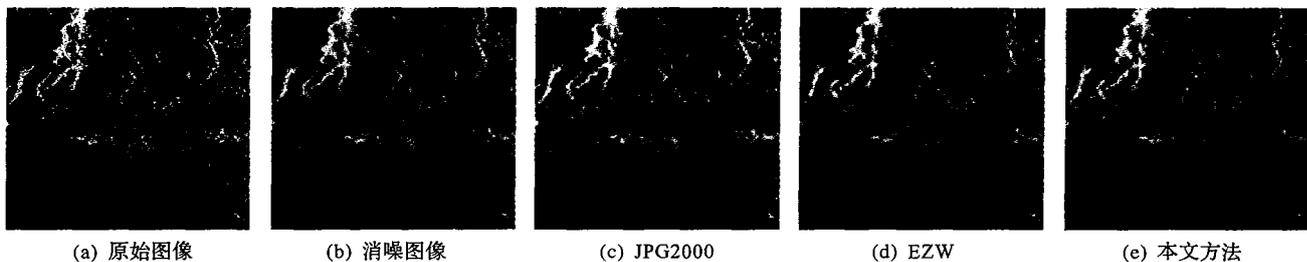


图 4 消噪和压缩重构效果图

Fig. 4 Compare result of De - noise and compression

4 结束语

本文首先根据影响 SAR 图像压缩的斑噪声特征,引入可变的联合因子,进行基于小波的联合阈值消噪。

然后针对常见基于小波的图像压缩算法只对低频进行多层分解,而对高频处理不够细致的缺点,提出基于子带重要性判断的自适应小波编码方法。通过对小波系数进行合理的分块,根据方差对子系数块进行分类量化,结合均匀量化和熵编码,获得了优于 JPEG2000 方法和 EZW 方法的编码性能。

参考文献:

- [1] Wiley J C, Curlander, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing[M]. New York: Wiley - inter Sciennce Press, 1991.
- [2] 宋莹华, 宋建社, 薛文通, 等. SAR 图像压缩技术的发展与现状[J]. 计算机应用研究, 2005, 8(5): 6-8.
SONG Yinghua, SONG Jianshe, XUE Wentong, et al. Development and Actuality of SAR Image Compression Techniques[J]. The Application and Research of Computer, 2005, 8(5): 6-8. (in Chinese)
- [3] Goodman J W. Some Fundamental Properties of Speckle[J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(11): 1145-1150.
- [4] Lee J S. Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics[J]. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intel, 1980, 2(2): 165-168.
- [5] David L Donoho. De-noising by Soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [6] 杨树丽, 郭雷, 常微微. SAR 图像小波包子带编码[J]. 激光与红外, 2008, 38(3): 292-295.
YANG Shuli, GUO Lei, CHANG Weiwei. Wavelet Packet-based Subband Coding for SAR Image Compression[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(3): 292-295. (in Chinese)
- [7] 张旭东, 卢国栋, 冯健. 图像编码基础和小波压缩技术——原理算法和标准[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
ZHANG Xudong, LU Guodong, FENG Jian. Fundamentals of Image Coding and Wavelet Compression Principle: Algorithms and Standards[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [8] 郭迎征, 许录平. 基于细节信息保护的 SAR 图像压缩[J]. 量子电子学报, 2004, 21(5): 577-581.
GUO Yingzheng, XU Luping. SAR Image Compression Based on Texture Information Protection[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21(5): 577-581. (in Chinese)
- [9] Gersho A, Gray R M. Vector Quantizations and Signal Compression[M]. Boston: Kluwer Acadmctic Publishers, 1992.
- [10] Antonini M, Barlaud M. Image Coding Using Wavelet Transform[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1992, 1(2): 205-220.

(编辑: 田新华)

An Algorithm of Adaptive Subband Coding for SAR Image Based on Wavelet Transform

LI Yong-le, CHENG Ying-lei, SUN Ji-Qing, GUO Rui

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to store and transmit largely and efficiently, SAR images must be compressed effectually. The traditional coding method of SAR image based on wavelet translation can only be used to decompose low frequency, so a lot of information of intermediate/high frequency is lost. In view of the above problem, this paper presents an adaptive SAR image compression algorithm based on wavelet transform. In this paper, the speckle noise is reduced to improve the image quality first. And then according to the energy index, the SAR image is decomposed into a series of subbands, which have different significances. Finally, all the subbands are quantized by the minimal error quantization at the same bit rate. The use of the algorithm can protect the high frequency details of SAR image adequately, and can achieve a better compression result.

Key words: wavelets transform; SAR image; adaptive compression; subband coding