

基于 CLi 多小波的 SAR 图像压缩去噪混合方法^{*}

李卫斌^{1,2} 何明一¹ 解争龙² 焦李成³

(西北工业大学电子信息学院 西安 710072)¹ (咸阳师范学院图形图像处理研究所 咸阳 712000)²

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710075)³

摘要 CLi 是由复小波构造的一类对称、正交、紧支撑且消失矩阶数较高的多小波。针对 CLi 多小波的优越特性, 本文给出了基于 CLi 多小波的 SAR 图像去噪压缩混合方法, 该方法在压缩的同时, 对噪声也进行了抑制。仿真实验表明, 该方法无论对于常规图像, 还是 SAR 图像都具有较高的压缩性能。

关键词 CLi 多小波, 图像压缩, 图像去噪, SAR 图像

A New Combined Method for SAR Image Compressing and Denoising Based on CLi Multiwavelet

LI Wei-Bin^{1,2} HE Ming-Yi¹ XIE Zheng-Long² JIAO Li-Cheng³

(Institute of Graphics and Image Processing, Xianyang Normal University, Xianyang 712000)¹

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)²

(National key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710000)³

Abstract The multiwavelet named CLi, which is constructed by complex wavelet, has several features, such as symmetry, orthogonality, short support, and high vanish square. Based on its superiority, a new combined approach for SAR image denoising and compressing is presented. Experiments show its excellence both for general image and SAR image.

Keywords CLi multiwavelet, Image compressing, Image denoising, SAR image

1 引言

1951 年美国学者 C. Wiley 首次提出 SAR(合成孔径雷达)的概念, 在此后的几十年中对它的研究不断深入。SAR 是一种能产生高分辨率遥感图像的相干系统, 通过对接收信号的幅值和相位进行处理进而产生图像。SAR 具有全天候、全天时、多波段、多极化工作方式、可变侧视角、穿透能力强和高分辨率等特点, 因而在工业、民用和军事上都有着十分广泛的用途。

SAR 图像不仅具有光学图像的几何特征, 同时具有重要的电磁特征。由单幅 SAR 图像不仅可以提取目标的几何特征, 而且可以提取目标的三维高程信息和运动速度信息。但是, 由于地物目标的复杂性, 目标的随机散射信号与发射信号的干涉产生斑点噪声, 影响到对 SAR 图像的处理与识别, 也直接影响到 SAR 图像的压缩质量。当斑点噪声比较严重时, 大大降低了 SAR 图像压缩的性能。因此, SAR 图像斑点噪声的抑制是 SAR 图像处理中的重要课题, 对 SAR 图像的压缩有着重要的意义。

一般认为, SAR 图像的斑点噪声可以用随机游动法来解释^[1]。通常认为它是乘性噪声, 所以传统的去噪方法无能为力。SAR 图像噪声抑制的方法可分为基于统计意义的空域滤波方法和频域滤波方法。比较经典的基于统计意义的空域滤波方法有 Lee, Kuan, Gamma-MAP 等滤波算法。小波分析由于其良好的时频特性被广泛应用于去噪和压缩, 它是一种典型的频域处理方法, 通常首先对 SAR 图像进行小波分解,

保留低频, 对高频子带的系数做硬阈值或软阈值处理, 然后进行重构。频域处理方法可有效地抑制噪声, 同时较好地保留了图像的结构信息。当然, 许多新的数学方法不断被引入到 SAR 图像处理领域, 如分形、模糊信息处理、脊波等方法, 为 SAR 图像处理增添了新的活力。SAR 图像由于成像原理的复杂性, 而且受到乘性噪声的干扰, 噪声和图像的边缘无论在空间域还是变换域都难以分离, 因此针对无噪图像和加性噪声的压缩方法效果往往不能令人满意。

本文提出基于 CLi 多小波的去噪压缩混合方法。仿真数据表明, 本文提出的方法可以获得良好的压缩和去噪性能。

2 CLi 多小波理论

多小波的研究始于 1993 年。多小波的优良性质使得多小波的研究与应用得到迅猛的发展。1994 年, GHM 多小波的构造让人们看到了成功的曙光: 紧支性、正交性、对称性, 在实多小波中完全可以同时具备。但同时我们注意到, 多小波基的构造难度较大, 如果利用已有的单小波基函数来构造多小波, 这将大大降低构造多小波基的难度。CLi^[2,3] 多小波正是基于这样的想法, 从复小波入手构造多小波基函数。CLi 多小波具有紧支性、正交性、对称性、免预/后滤波、高阶消失矩等优良的特性。

其中高阶消失矩保证了有限能量信号的小波系数随着尺度快速衰减, 也保证了宽带信号随平移参数快速衰减^[4]。这对于压缩至关重要。同样, 高阶消失矩对于信号奇异性分析也非常重要。

^{*} 本文得到国家自然科学基金项目(No. 60472084)、陕西省教育厅自然科学基金(No. 05JK312)、咸阳师范学院自然科学基金重点项目(No. 04XSYK101)资助。李卫斌 博士后, 副教授, 主要研究兴趣包括: SAR 图像处理、小波分析等。

滤波器长度为 6 的 CLi 多小波记为 CLi6 多小波。其对应的低通滤波器组 $\{H_k\}_{k=-2}^2$ 与高通滤波器组 $\{G_k\}_{k=-2}^2$ 分别为

$$\begin{aligned} H_0 &= H_1 = \begin{pmatrix} 0.662912 & -0.171163 \\ 0.171163 & 0.662912 \end{pmatrix} \\ H_{-1} &= H_2 = \begin{pmatrix} 0.110485 & 0.085581 \\ -0.085581 & 0.110485 \end{pmatrix} \\ H_{-2} &= H_3 = \begin{pmatrix} -0.066291 & 0.085581 \\ -0.085581 & -0.066291 \end{pmatrix} \\ G_0 &= G_1 = \begin{pmatrix} -0.662912 & -0.171163 \\ 0.171163 & -0.662912 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{-1} &= G_2 = \begin{pmatrix} 0.110485 & -0.085581 \\ 0.085581 & 0.110485 \end{pmatrix} \\ G_{-2} &= G_3 = \begin{pmatrix} 0.066291 & 0.085581 \\ -0.085581 & 0.066291 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

图 1 是 CLi6 多小波的尺度函数和小波函数。在运算的复杂度方面, CLi6 多小波尽管滤波器长度为 6, 但由于滤波器本身的对称性, 在不考虑加法的情形下, 其运算复杂度与 CL 多小波相同(滤波器长度为 3), 较 GHM 多小波(滤波器长度为 4)低。表 1 给出了 GHM, CL 多小波与利用本文方法得到的 CLi6 多小波的比较。

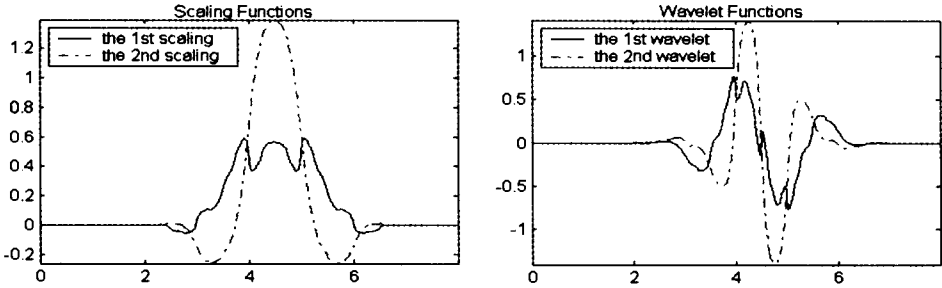


图 1 CLi6 多小波的尺度函数 $\phi_0(t), \phi_1(t)$ 及小波函数 $\psi_0(t), \psi_1(t)$

表 1 GHM, CL 多小波与利用本文方法得到的 CLi6 多小波的性能比较

	支集长度	正交性	对称性	予滤波	消失矩	运算复杂度 *
GHM	≤ 2	是	是	需要	2	$4n$
CL	2	是	是	需要	2	$3n$
CLi6	5	是	是	无须	2	$3n$

* 运算复杂度仅指乘法, 且不包括予滤波。表示信号的长度。

我们记滤波器长度为 10 的第一组复对称滤波器对应的多小波为 CLi10-1, 另一组对应的多小波记为 CLi10-2。其小波函数及多尺度函数如图 2、图 3 所示。

因此, 可以发现 CLi 类多小波具有非常优良的性质(对称、正交、紧支撑、高阶消失矩), 而且无需预滤波。较高的消失矩和线性相位对压缩性能的影响非常大。

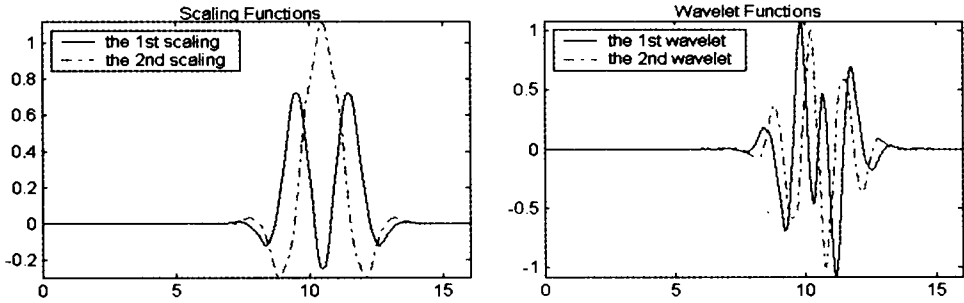


图 2 CLi10-1 多小波的尺度函数 $\phi_0(t), \phi_1(t)$, 及小波函数 $\psi_0(t), \psi_1(t)$

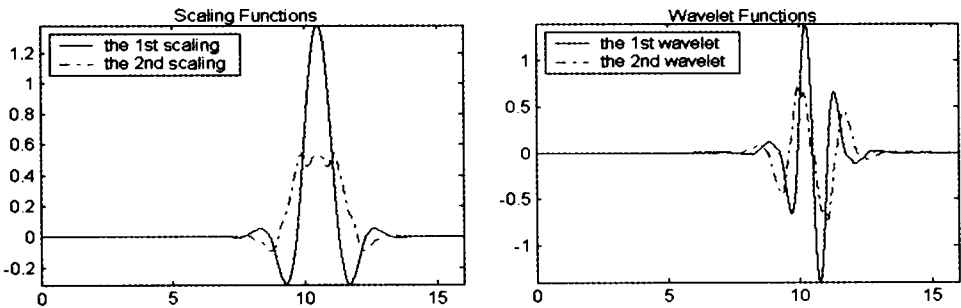


图 3 CLi10-2 多小波的尺度函数 $\phi_0(t), \phi_1(t)$, 及小波函数 $\psi_0(t), \psi_1(t)$

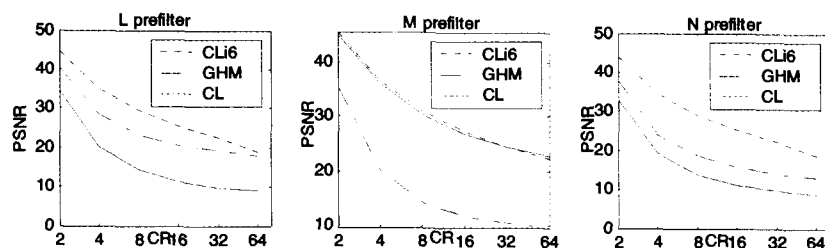
3 基于 CLi 多小波的常规图像压缩

我们对 Lena[256×256] (256 灰度级) 两幅标准图像进行多小波分析, 分别应用本文提出的 CLi6 多小波和 GHM 多

小波及 CL 多小波, 进行 3 次张量积分解, 然后保留绝对值较大的若干个系数(原像素个数的 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64)重构。预/后滤波采用三组长度为 1 的预/后滤波器, 保证在预/后滤波中不引入误差。在采用不同预滤波器 L, M, N

(后滤波器为相应预滤波器的逆),不同多小波时的 PSNR 比较如图 4 所示。

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, M = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}, N = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$



(a) 预滤波器为 L (b) 预滤波器为 M (c) 预滤波器为 N

图 4 GHM, CL, CLi6 图像压缩性能比较

本文提出的多小波的优越性是显而易见的。滤波器长度为 14 的多小波由于运算较为复杂,因而未对其进行试验。

4 基于 CLi 多小波的 SAR 图像去噪压缩混合方法

对于 SAR 图像的压缩首先应该对 SAR 图像去噪,然后压缩。但是,这样做增加了大量的重复运算,同时由于噪声无法完全去除,如果去噪算法和压缩算法不匹配,有可能降低压缩的性能。因此,可以采用压缩与去噪同时进行的方法,分离噪声的过程就是在高频域有选择地舍弃某些可能是噪声的那些系数。压缩和去噪在数学上都是采用稀疏的、光滑的函数基对原函数的逼近。因此,我们选择函数基时,在确保高阶消失矩和正交性的同时应该具有足够的光滑性。

下面我们介绍本文所采用的压缩去噪混合算法。

a. 原信号除以其均值,进行对数运算,将斑点噪声(乘性)转化为加性噪声,并根据所选用的多小波进行预处理(CLi 多小波使用恒等矩阵预处理)。

b. 多小波分解。

c. 细节子信号(子图像)均方差的初值 σ_a^0 选为信号的方差,于是得到了初始阈值 $T = \sigma_a^0 \sqrt{2C \log(2N)}$ 。N 为图像规模。

d. 采用硬门限策略保留高频系数,即 $\tilde{T}_h(x) = \begin{cases} 0 & |x| \geq T \\ x & |x| < T \end{cases}$,低频部分不变,并重构之。

e. 多小波重构。

f. 后处理,指数运算,均值调整。

当然,这是在检验多小波分解后分解系数的集中性,图像的能量大部分集中在那些比较集中的系数上,而对边缘部分对应的分解系数比较少的、比较分散的,同样我们也要保留。这样,低频数据虽多,但非常集中,可以用几个系数表示;高频较大的系数虽然分散,但总体个数不会太多,因此只要选择合适的多小波基,可以得到较高的压缩率。由上面的讨论可知,CLi 多小波函数性质非常优良,适合去噪和压缩同时进行,因此选用 CLi6 多小波作为分解的有力工具。

5 仿真结果

我们选择图 5(a)、图 7(a)两幅受到斑点噪声污染的 SAR 图像作为测试图像,对该图像预处理后分别使用 CLi、CL、GHM 多小波三次分解,使用硬阈值的办法滤噪,其结果如图 6、图 8 所示。

$$PSNR = 10 \times \lg \frac{255 \times 255}{\frac{1}{PQ} \sum_{i=0}^{P-1} \sum_{j=0}^{Q-1} (x_{i,j} - \hat{x}_{i,j})^2}$$

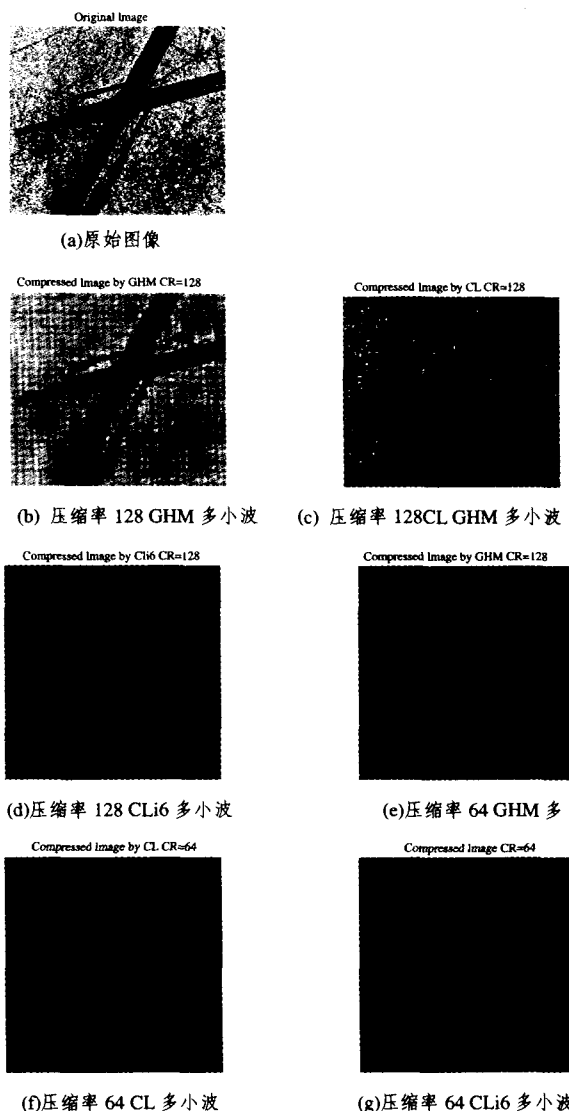


图 5 SAR 图像原始图像及压缩率为 128 和 64 时 GHM, CLi6, CL 对应的压缩图像

对于图 6 和图 7 中的原始图像压缩时,CLi6 都表现出最好的效果。而 CL 多小波却表现的效果较差,原因是我们这里为了降低运算的复杂度采用了恒等矩阵作为预滤波器(Prefilter)。另外,CL 多小波的滤波器较短,当图像的噪声比较严重时,平滑效果较差;CLi 多小波是平衡的,因此恒等预

滤波是适宜的。同时,由于滤波器比较长,平滑的效果较好克服了噪声的影响。在对图 7 中的原始图像压缩进行压缩时,由于原图像中包含了大量的细节信息,过度的平滑将会降低压缩的质量,造成小目标的丢失。

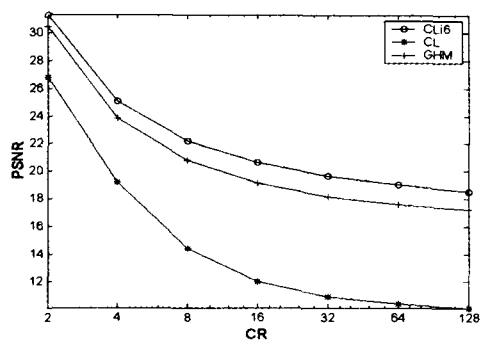


图 6 GHM,CLi6,CL 多小波压缩图 5(a)的性能比较

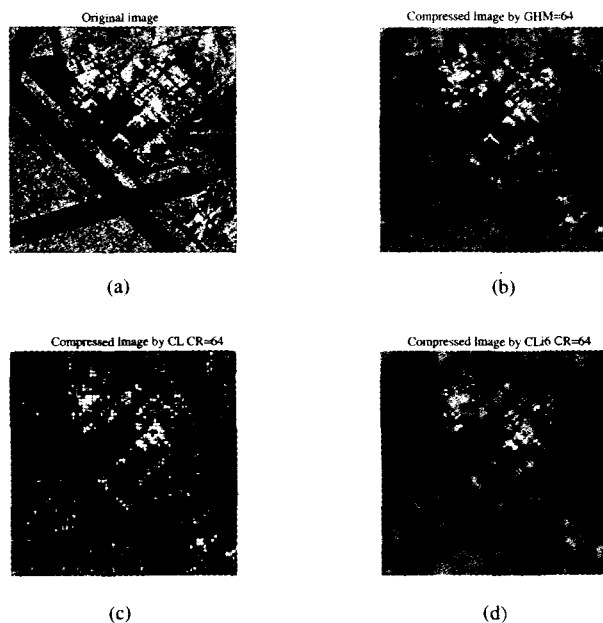


图 7 SAR 原始图像(a)及压缩率为 64 时 GHM(b), CL(c),CLi6(d)对应的压缩图像

上述的结果和 CLi 多小波在常规图像中的压缩相比要差一些,原因在于 SAR 的噪声并非服从高斯分布,因此会出现一些误差。总体而言,由于混合和去噪同时进行,减小了运算

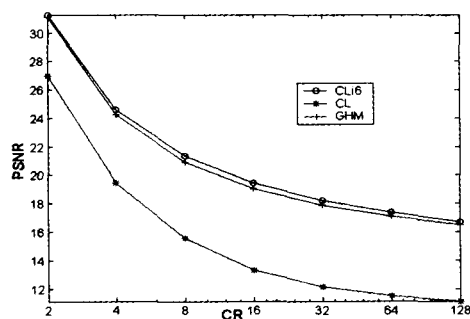


图 8 GHM,CLi6,CL 多小波压缩图 7(a)的性能比较

次数和运算误差,效果比较好。可以说,基于 CLi 类多小波的去噪压缩混合方法是一种比较优良的压缩方法。

结论 滤波器的对称性在离散小波变换(多小波和单小波)中具有非常重要的地位,不但对信号在边界处的精确重建有非常大的影响,而且对多小波分解运算复杂度的降低具有很重要的意义。CLi 多小波正交、对称、紧支,同时滤波器具有对称/反对称性,构造算法比较简单。优良的性质使其在图像压缩包括 SAR 图像压缩方面具有较大的优越性,同时结合提出的压缩去噪混合方法更加扩大了应用范围和压缩效果。试验结果表明,基于 CLi 多小波图像压缩去噪混合方法的性能优于 GHM,CL 等多小波。

参考文献

- 1 Boustani A E, Brunhan K, Kinsmer W. A review of current raw SAR data compression techniques, from the website of IEEE.
- 2 李卫斌,刘芳,焦李成. 基于复小波的多小波构造. 西安电子科技大学学报, 2003, 3(6): 780~783
- 3 李卫斌,张书玲,焦李成. 一类新的多小波在图像压缩中的应用. 咸阳师范学院学报, 2004 (6): 1~5
- 4 李弼程,罗建书. 小波分析及其应用. 北京:电子工业出版社,2003
- 5 崔锦泰,程正兴(译). 小波分析导论. 西安:西安交通大学出版社,1995
- 6 陈逢时. 小波变换理论及其在信号处理中的应用. 北京:国防工业出版社,1998
- 7 Tan H H, S Li-Xi, Tham J Y. New biorthogonal multiwavelets for image compression. Signal Processing, 1999, 79:45~65
- 8 Mvogo J, Mercier G, et al. A combined speckle noise reduction and compression of SAR images using a multiwavelet based method to improve codec performance. perso-iti. enst-bretagne. fr/~mercierg/articles/s03p1224_mvogo.pdf
- 9 Strela V, Heller P N, Strang G, et al. The Application of Multiwavelet Filterbanks to Image Processing. IEEE Trans. on Image Processing, 1999, 8(4):548~562
- 10 Xia X G, Suter B G. Vector-valued Wavelets and Vector Filter Banks. IEEE Trans on Signal Processing, 1996, 44(3):508~517
- 11 Jiang Qingtang. On the Design of Multifilter Banks and Orthonormal Multiwavelet Bases. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(12):3292~3303
- 12 Strang G, Strela V. Short Wavelets and Matrix Dilation Equations. IEEE Trans on Signal Processing, 1995, 43(1):108~114
- 13 Zhang Xi, Muguruma T, Yoshikawa T. Design of orthonormal symmetric wavelet filters using real allpass filters. Signal Processing, 2000, 80: 1551~1559
- 14 Lawton W. Applications of Complex Valued Wavelet Transforms to Subband Decomposition. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41(12): 3566~3568
- 15 Lebrun J, Vetterli M. Balanced Multiwavelets Theory and Design. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(4): 1119~1125
- 16 Vrhel M J, Aldroubi A. Projection-based Prefiltering for Multiwavelet Transforms. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(11): 3088~3092
- 17 许刚. 复小波在图像编码中的应用. 软件学报, 1999, 10(3): 293~298
- 18 Belzer B. et al. Complex, linear-phase filter for efficient image coding. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(10): 2425~2427
- 19 张书玲,侯彪,焦李成. 基于小波和滤波器组的图像编码方法. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(4): 180~185