

基于 Brushlet 变换的 SAR 图像 SPIHT 压缩算法

王鑫华^{1,2}

(1 海军驻航天科技集团第七研究院军事代表室,四川 成都 610100;

2 华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘 要: 提出一种基于 Brushlet 多方向变换特点的 SPHIT 编码算法,并将其应用于 SAR 图像压缩编码中,通过对真实 SAR 图像的压缩实验表明,相比于传统的小波编码方法,Brushlet 变换域的 SPHIT 算法能获得更好的压缩性能,提高了解码后的 PSNR 值,并且较好地保留了图像细节特征和提高了可视性。

关键词: Brushlet 变换; 多方向; SPIHT; SAR 图像压缩

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)05-0014-03

SAR Image Compression Algorithm Based on SPHIT via Brushlet Transform

WANG Xin-hua^{1,2}

(1 Naval Military Delegate Office Stationed in the 7th Aerospace Research Institute, Chengdu 610100, China;

2 State Key Lab. of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Sci. & Tech.,
Wuhan 430074, China)

Abstract: Brushlet is a novel tool for image directionality analysis, which is adopted in image fusion and texture classification successfully. A new SAR image compression algorithm is proposed, which is based on SPIHT coding of the Brushlet multi-direction decomposition coefficients. The encoding experiments on real SAR image demonstrate that the proposed method outperforms the conventional wavelet-based methods. The higher PSNR is thus obtained. The detail of reconstructed SAR image can be well preserved and better visual effect can be achieved by SPIHT via Brushlet transform.

Key words: Brushlet transform; multi-direction; SPIHT; SAR image compression

1 引言

合成孔径雷达(SAR)作为一种主动式微波遥感成像系统,具有全天候,全天时,高分辨率等特点,广泛应用于军事和国民经济领域^[1]. SAR 在获取时通常数据量极大,因此 SAR 图像压缩技术是解决其海量数据与有限信道容量之间矛盾的重要手段. 近年来,小波变换作为一种多分辨分析工具,已被静止图像压缩国际标准 JPEG2000^[2]所采用,基于小波和小波包变换的编码算法也被广泛应用于 SAR 图像压缩领域. 但利用传统的小波变换进行压缩编码时

会产生振铃效应,特别是在图像强边缘附近和纹理丰富的区域,对图像质量造成了影响.

研究者在推动小波发展方面取得了很多成果,最具代表性的是提出了多尺度几何分析(Multi-scale Geometric Analysis, MGA)的概念^[3]来表征高维函数的最优表示方法. 常见的 MGA 方法包括 Brushlet 变换^[4]、Ridgelet 变换^[5]、Contourlet 变换^[6]和 Curvelet 变换^[7]等. 其中 Brushlet 具有时频局部化性质的紧支撑标准正交基,能实现非冗余的图像分解与重构,满足图像压缩的稀疏性要求. SAR 图像成像过程中纹理信息丰富,而 Brushlet 具备独特

收稿日期: 2009-04-10; 修回日期: 2009-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50675079)

的多方向(Multi-direction)特点,能够多方向地描述纹理等几何特征,基于以上优势,文中在 Brushlet 变换域设计编码算法来实现 SAR 图像压缩.仿真实验表明,文中压缩性能要优于经典的小波 SPIHT 和 JPEG2000 等压缩算法,并使得编解码重构后的图像能够较好的保留纹理和边缘等细节信息.

2 Brushlet 变换

在信号处理中,局部傅里叶分析是指用一个光滑的窗函数将信号分成相邻的区间,然后在每一个区间内进行相应处理.Brushlet 变换正是基于这种思想来构造具有时频局部化性质的标准正交基.对于 Brushlet 基构造可分为 3 步完成^[4,8]:

- (1) 构造局部化光滑的标准正交基;
- (2) 利用局部化的标准正交基构造一维 Brushlet 基;

令 $f(x) \in L^2(x)$, $\hat{f}$ 为 f 的 Fourier 变换.按下列步骤产生一维 Brushlet 基:

① 把 $\hat{f}$ 在基 $u_{m,n}$ 上展开, $\hat{f} = \sum \hat{f}_{m,n} u_{m,n}$;

② 求 f 的逆 Fourier 变换,令 $v_{m,n}$ 表示 $u_{m,n}$ 的逆 Fourier 变换, $f = \sum \hat{f}_{m,n} v_{m,n}$,因 Fourier 变换是个酉算子,称 $\{v_{m,n}\}$ 为标准正交的 Brushlet 基.

(3) 利用可分离一维 Brushlet 的张量积直接构造标准正交二维 Brushlets 基.

Brushlet 变换具有类似于小波包的多层结构,能对 Fourier 域进行最优分解.Brushlet 的第 1 层分解把 Fourier 平面分成 4 个象限,Brushlet 系数被分为 4 部分,对应的方向为 $\pi/2 + k \cdot \pi/2$, $k = 0, 1, 2, 3$.第 2 层分解进一步把每个象限分为 4 个部分,共 16 个 Brushlet 系数的集合,共分为 12 个方向,分别为 $\pi/4 + k \cdot \pi/2$, $k = 0, 1, 2, 3$,对应两个不同的频率.多层分解是对上一层的方向继续加以细分,但层数过多会有明显的频率混叠,故而一般选取 13 层分解.Brushlet 是复值函数,其系数实际上可以分为实部和虚部两个部分,且实部和虚部分别关于原点反对称.

3 适合于 Brushlet 分解系数特点的 SPIHT 算法

3.1 方向四叉树分割

SAR 图像包含丰富的纹理信息,局部相关性较弱.由于 Brushlet 变换具有与离散小波变换(DWT)等不用的多尺度分解结构,我们按照其方向扩展特性来设计方向四叉树结构,以便完成零树编码.

图 1 中给出了传统的小波零树结构.图 2 表示 Brushlet 二层分解方向,可看出其是通过周围环绕的多方向往各个方向延伸,对纹理和边缘等细节的描述更为深入,多方向的特点也能提高编码效率,因此我们按照其分解方向对原图进行四叉树分割,并且按照不同方向上的高频子带能量来选择最优编码方向.

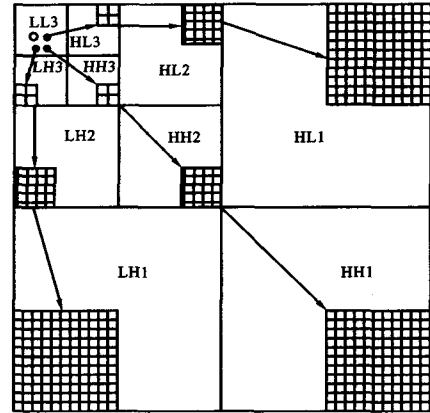


图 1 小波零树结构

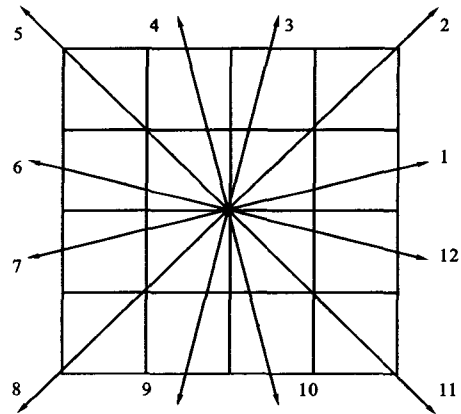


图 2 Brushlet 分解方向

3.2 基于 Brushlet 变换的 SPIHT 编码算法

本小节利用 Brushlet 变换特性,对 SPIHT 编码算法做出改进,提出了基于 Brushlet-SPIHT 的 SAR 图像压缩算法.

对以坐标 (i, j) 为树头结点的 Brushlet 零树,定义了 3 种系数集合,分别是所有后代系数集合 $D(i, j)$,直接子结点集合 $O(i, j)$ 与除直接子结点外的所有后代系数集合 $L(i, j)$.集合的分割策略如下: $D(i, j) = O(i, j) + L(i, j)$; $L(i, j) = \sum_{k,l} D(k, l)$, $(k, l) \in O(i, j)$ 在编码的过程中,所有系数被组织到三个表中:不重要集合表(LIS),不重要系数表(LIP)和重要系数表(LSP).编码算法具体步骤如下:

- (1) 将原始 SAR 图像进行四叉树分块,并对每

一子块进行 Brushlet 分解;

(2) 以 Brushlet 分解系数的实部为例,寻找最优方向相同的相邻子块;

(3) 对每一子块的最优分级系数进行 SPIHT 编码:

① 初始化:最大尺度的变换系数集合作为树头结点放入表 LIP,相应的后代集合放入 LIS,清空 LSP;

② 分类扫描:依次判断 LIP 和 LIS 表中每个系数的重要性,不断地对重要集合进行分割,直到找出所有的重要系数并放入 LSP 表中.

③ 细化扫描:依次对 LSP 表中非新添加结点,输出其在该级位平面的值.

④ 阈值更新:缩小阈值,重复(2)和(3),直到阈值或比特率符合编码器要求.

(4) 对图像的分块结构及方向信息进行自适应算术编码;

(5) 输出编码结果.

4 SAR 图像压缩实验及性能分析

4.1 SAR 图像压缩步骤

选取真实 SAR 图像进行压缩对比实验来验证本文算法的性能,结合前文所述,这里给出基于 Brushlet 域的 SAR 图像 SPIHT 压缩算法步骤.

Step1:根据第 3.1 节中的论述,对 SAR 原图像进行符合其方向扩展的四叉树分割;

Step2:在其三层分解的高频子带上以能量汇聚准则确定最优编码方向;

Step3:对选定的图像子块进行 Brushlet 分解;

Step4:分别对 Brushlet 分解系数的实部和虚部进行 3.2 节中的编码过程;

Step5:利用解码后的实部和虚部系数进行 Brushlet 重构,得到压缩后 SAR 图像.

实验中采用的对比实验方法包括经典的小波 SPIHT 和 JPEG2000,小波变换均采用双正交 9/7 小波滤波器,五层分解. Brushlet 变换中窗函数长度选为 8,选用三层分解.

4.2 实验结果分析

对五角大楼原图信息进行压缩,给出了 $\text{bpp} = 0.125$ 时压缩效果对比图,观察小波 SPIHT 的压缩结果,可看出取得了一定的压缩效果,但图像整体较模糊,五角大楼楼层的线状纹理特征有所损伤,并且在其周围平地出现了块状效应.采用 JPEG2000 方法压缩,对大楼四周的细节目标不够清晰,如左上方

区域的跑道特征保留不完整,图像整体对比度有所下降.而采用文中方法,取得了最佳的图像对比度,大楼及周围各种细节目标都到了较好保留,在平地处也未出现块状效应,这得益于 Brushlet 变换多方向延伸特点,使得 SPIHT 编码能够有效地根据方向能量块准确的反映图像信息.对 Isleta 图像的压缩结果也验证了文中方法的优势.

表 1 SAR 图像压缩 PSNR 比较

SAR 图像 bpp	Pentagon			Isleta		
	0.125	0.5	1	0.125	0.5	1
小波 SPIHT	19.32	22.27	24.12	20.23	22.68	25.32
JPEG2000	18.76	22.14	25.04	19.94	22.83	25.36
文中方法	20.15	22.86	26.16	21.47	23.57	26.42

结合表 1 中各方法在不同 bpp 下的 PSNR 对比可看出,文中提出的符合 Brushlet 变换的 SPIHT 编码算法能够获得最优的压缩性能.文中方法在保证图像可视性和压缩性能方面取得了较优的平衡.

5 结束语

提出一种符合基于 Brushlet 分解系数方向性特点的 SAR 图像压缩算法.该方法充分利用了 Brushlet 的多方向扩展特性,在此基础上进行了四叉树分割,并根据其方向延伸特点设计了改进的 SPIHT 编码,能够有效描述 SAR 图像中丰富的纹理及边缘等方向性信息.通过 SAR 图像压缩实验表明,文中算法在获得较高压缩指标的同时能够保证图像的可视性,避免了块状效应和细节信息的丢失.下一步工作将把几何多尺度分析工具的特点与 SAR 图像的成像原理相结合,寻找更为有效的压缩算法.

参考文献:

[1] Kuruoglu E E, Zerubia J. Modeling SAR images with a generalization of the rayleigh distribution[J]. IEEE Trans. Image Process. , 2004,13(4):527-533.

[2] Taubman D, Marcellin M. JPEG2000: image compression fundamentals, standards, and practice[M]. Norwell, MA: Kluwer, 2001.

[3] 焦李成,谭山. 图像的多尺度几何分析:回顾和展望[J]. 电子学报,2003, 31(12A): 43-50.

[4] Meyer F G, Coifman R R. Brushlets: a tool for directional image analysis and image compression[J]. Appl. Comput. Harmon. Anal, 1997,4(2):147-187.

[5] Do M N, Vetterli M. The finite ridgelet transform for image representation[J]. IEEE Trans. Image, 2003, 12 (1): 16-28.

在二维 DCT/IDCT 映射到 RCSIMD 协处理器时,采用按频率抽取的基 2-DCT 算法,首先同时对 8 个长度为 8 的列向量使用按频率抽取的基 2-DCT 算法进行一维离散余弦变换,完成后再同时对 8 个长度为 8 的行向量进行一维离散余弦变换.以 8×8 图像为例,多种处理器的处理结果如图 7(b)所示^[8].

在进行运动估计(ME)算法映射时,分析了几种块匹配算法的复杂度及映射后 RPU 之间的通信后,文中选择了适合二维阵列处理的全搜索算法(定义式),当参考块大小为 8×8 、最大偏移值为 8 时,计算一次参考块匹配所需的处理周期如图 7(c)所示^[5].

4 可重构处理阵列 RPA 的物理实现

RCSIMD 协处理器^[9]的可重构处理阵列 RPA 已经设计实现完毕.在 RPA 的前端设计时,采用 Verilog_HDL 硬件描述语言进行 RTL 级设计,逻辑综合采用 Synopsys 公司的 DC 综合工具,布局布线采用 Synopsys Astro place&route.在 Charter 0.25 μm 标准单元库下,RPA 的面积为 $7\text{m} \times 7\text{m}$,时钟周期 16ns.在 RPA 的物理设计中,总线并没特殊处理,所以在一定程度上影响 RPA 的性能.

参考文献:

[1] 潘伟.一种新型高速低成本可重构 FFT 处理器结构[J].

微电子学与计算机,2008,25(11):29-32.

[2] Timothy J Callahan, John R Hauser, John Wawrzynek. The garp architecture and C compiler[J]. IEEE Computer, 2000,33(4):62-69.

[3] Miyamori T, Olukotun K, REMARC: reconfigurable multi-media array coprocessor[J]. IEICE Trans on Information System,1999(2):389-397.

[4] Singh H, Ming Hau Lee. MorphoSys: an integrated reconfigurable system for data-parallel and computation-intensive applications[J]. IEEE Transactions on Computers, 2000,49(5):465-481.

[5] 董惠.基于 FPGA 的 FFT 处理器的设计与仿真[J].微电子学与计算机,2008,25(11):10-14.

[6] 周国昌.一种面向图像处理的粗粒度动态可重构处理器研究与设计[D].西安:西北工业大学,2007:41-108.

[7] 周国昌,沈绪榜.基于 LS CSIMD 的可变阶 FIR 并行算法研究[J].计算机工程,2007,33(1):7-9.

[8] 李明.几种多媒体处理算法到 RCA 体系结构的映射[D].西安:西北工业大学,2002:12-48.

[9] 沈绪榜,张发存,冯国臣,等.计算机体系结构的分类模型[J].计算机学报,2005,28(11):1759-1766.

作者简介:

周国昌 男,(1978-),博士.研究方向为嵌入式计算机体系结构、SoC 体系结构研究与设计.

陶孝锋 男,(1978-),高级工程师.研究方向为卫星数字信号处理技术.

(上接第 16 页)

[6] Po D D Y, Do M N. Directional multiscale modeling of images using the contourlet transform[J]. IEEE Trans. Image, 2006,15(6):1610-1620.

[7] Candès E J, Donoho D J. Curvelets: a surprisingly effective nonadaptive representation for objects with edges[C]// Curve and Surface Fitting. Nashville, TN: Vanderbilt Univ. Press, 1999.

[8] Shan Tan, Zhang Xiangrong, Jiao Licheng. A brushlet-based feature set applied to texture classification[M]. CIS2004, LNCS 3314, Heidelberg: Springer, 2004: 1175-1180.

作者简介:

王鑫华 男,(1982-),硕士研究生,助理工程师.研究方向为雷达图像处理、电子对抗、导弹武器系统.