

文章编号:1000-6893(2002)06-0534-04

# 基于可逆提升小波变换和上下文预测的 SAR 图像无损压缩算法

刘荣科, 张晓林, 廖小涛, 聂振钢

(北京航空航天大学 电子工程系, 北京 100083)

## LOSSLESS IMAGE CODING ALGORITHM FOR SAR BASED ON REVERSIBLE LIFT SCHEMATICS COMBINED WITH CONTEXT PREDICTOR

LIU Rong-ke, ZHANG Xiao-lin, LIAO Xiao-tao, NIE Zhen-gang

(Department of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘要:** 结合可逆提升小波变换和上下文预测技术, 提出基于可逆提升小波变换和上下文预测的合成孔径雷达(SAR)图像无损压缩算法。分析了基于提升小波无损压缩算法和基于上下文预测编码无损压缩算法的优缺点, 联合两种体制, 提出先用提升小波变换去除整幅图像的冗余, 再用边缘保留预测器和子预测器联合技术进一步消除子带内系数间的空间冗余性, 最后采用自适应上下文建模技术对残差进行分类自适应熵编码。除具有常规小波变换编码的优异性能外, 该算法的压缩率优于即将推出的国际标准 JPEG2000。

**关键词:** 合成孔径雷达; 提升方案; 小波变换; 预测编码; 无损压缩

**中图分类号:** TN919.81 **文献标识码:** A

**Abstract:** A lossless image coding algorithm for SAR was proposed, which adopts the reversible lift schematics combined with the context predictor. The reversible lift schematics can efficiently reduce redundant in the SAR image and the context predictor has excellent adaptive edge-prediction and smooth prediction abilities. The adaptive context modeling mostly improves the entropy coding ratio. The algorithm has a higher compression ratio than the lossless part in the incoming ISO standard JPEG2000, besides the normal virtue of wavelet coding.

**Key words:** SAR; lift schematics; wavelet transform; prediction coding; lossless image coding

合成孔径雷达(简称 SAR)是一种主动式微波成像传感器,它采用脉冲压缩技术和合成孔径技术,较短的天线就能够获得方位和距离 2 个方向的高分辨率,不仅可以靠空间分辨率来鉴别物体的大小,而且可以根据物体对所照射的电磁波的散射强度来判断物体的性质,因此合成孔径雷达具有高分辨率、全天候、全天时性<sup>[1]</sup>。

由于机载或星载 SAR 传输信道容量有限,要求对合成孔径雷达图像进行实时压缩传输,但是 SAR 图像具有如下 3 个特性:(1)由于合成孔径雷达图像与一般的人物、景色等连续色调自然图像不同,它受到乘性的相干斑点噪声的影响,相邻像素点的相关性极低;(2)由于合成孔径雷达图像适用于不同的用户,各自关心的内容、目标相差很大,压缩后的图像要尽可能满足所有用户的需求;(3)获得一幅高质量的 SAR 图像的代价昂贵,而且合成孔径雷达图像作为一种资源,具有长期乃至永久保存的价值,因而不希望有任何的信息丢

失,因此通常要求对 SAR 图像只能采用无损压缩,而常见的有损压缩标准或者算法都无法满足要求<sup>[2]</sup>。

由于小波变换在图像有损压缩方面取得的重大突破,促使许多学者考虑基于小波变换的无损压缩技术<sup>[3~9]</sup>。除了具有普通小波变换的共性以外,可逆提升小波变换后的系数仍然为整数,动态范围较小,因此可作无损变换编码<sup>[3~9]</sup>。随着提升方案的出现,基于小波变换的无损压缩不再拘泥于 S 或者 S + P 这样比较简单的变换,可以广泛地选择各类小波基,甚至非线性的小波基。在国际标准 JPEG-LS 征集方案过程中,CREW 算法采用了 S 变换和 TS 变换,并且为小波系数建立了有限状态的上下文模型,然而压缩率远远低于 CALIC 算法<sup>[8]</sup>。基于 S + P 的 SPIHT 算法,压缩率比 CREW 有所提高,但仍然低于 JPEG-LS<sup>[8]</sup>。即将推出的 ISO 标准 JPEG2000 中建议采用可逆提升方案双正交 5-3 小波基实现无损压缩,但效果仍然较差<sup>[6]</sup>。

文献[2]首次提出了基于整数小波变换的

SAR 图像无损压缩算法,但是效果不明显。本节在分析了基于提升方案的无损压缩算法和基于上下文预测的无损压缩算法的基础上,剖析了两种算法压缩率不高的原因,针对 SAR 图像的特点提出了基于整数小波变换和上下文预测编码的 SAR 无损压缩算法,实验表明了该算法的有效性。

## 1 基于提升小波变换的无损压缩算法

提升正变换包括 3 个步骤:辟分,预测和标定。与正过程一样,逆过程也包括 3 个步骤:标定,预测和合并。合并过程完成多个序列联合形成单一序列。逆过程每个阶段只是反正过程抵消其作用。已经证明所有 FIR 小波滤波器都有分解成基本的提升步骤。

可逆提升小波变换,具有如下的优点<sup>[2,3]</sup>:

基于可逆提升小波变换属于非线性变换,但可逆变换接近原来的线性变换;选择适当的小波基,可以把整数映射到整数;整个变换可以同址进行,节省内存;适合定点计算;正变换与逆变换有完全对称,有相同的计算复杂性;一个格结构中的所有操作是并行的,而多个格结构之间是串行的;采用提升方案,运算量可以降低 1/2;对二维信号则降低为原来的 1/4。

基于可逆提升方案的小波变换的无损压缩算法,先对图像采用可分离的二维整数小波变换,再对变换后的整数系数进行某种编码,如零树编码 EZW 和 JPEG2000 中的 EBCOT 算法,最后对输出的二进制比特流进行自适应算术编码。

基于 SPIHT 的图像无损压缩正是基于图像的小波变换系数同一方向不同层之间的系数幅值上的相关性,在一个子树的系数出现显著之前,除了显著性判断之外,不输出任何信息,从而可以实现压缩。另外,对 SPIHT 编码后的码流还可以进一步采用算术编码,获取一定的编码增益<sup>[10]</sup>。

即将推出的 JPEG2000 标准采用可逆双正交 5-3 小波基,实现无损压缩,主要基于两种策略:

“位平面预测编码”。对小波变换系数中的每个码块进行三类扫描:显著性扫描、幅度细化扫描和清除性扫描,利用临近系数间的相关性来进行位平面预测编码,按照位数据的重要性对其分类,从位数据的层面挖掘和利用了小波系数之间的相关性,将邻居系数的相关信息充分利用到位数据的编码中,对不同类别的位数据设计了相应的预测准则。这有利于提高算术编码的性能,以实现有

效地压缩;对每个码块的最大比特层采用 TAG TREE 编码:对整个子带封装成组时,先计算出带内系数的最大比特平面,再在组头信息中将当前子带中的每个码块的最大比特平面与当前子带的最大比特平面间的差值进行 tag-tree 编码。这样 2 个最大比特平面间的比特值 0 就不用传输了,实现一定的压缩。

基于零树的无损压缩与基于子带内相关性的压缩 EBCOT 相比,后者由于对子带系数间的相关性利用比较充分,而前者在无损压缩时几乎所有系数从显著位后的比特都要逐比特输出,没有很多零树利用,因此后者比前者略优。但是由于 EBCOT 对相邻系数之间的相关性利用不足,压缩率非常低,仍然比基于上下文预测的无损编码算法(如 JPEGLS)差。

## 2 基于上下文预测的无损编码算法

将预测技术和图像上下文模型结合,形成了基于上下文的预测编码,其与早期的预测编码的区别在于对预测残差高阶统计特性的利用。早期的预测编码,只是在预测后对残差直接进行熵编码处理,编码效率受到预测残差的零阶熵的制约,而基于上下文的预测编码,把预测作为降低开销的手段,最终的编码效率通过上下文模型对预测残差高阶条件概率的准确估计来实现<sup>[9]</sup>。

APC 将固定的子预测器的自适应组合作为最终的预测器,每个子预测器使用了部分或全部的周围像素点,每个子预测器的联合系数由先前的预测误差值决定。APC 预测编码只给出了一种编码思想,对子预测器个数没有限制。APC 的实质是:假设当前像素点和周围像素点存在较强的相关性,根据对周围像素点使用不同的子预测器的误差绝对值和的大小不同,对误差绝对值和大的子预测器,也即预测效果不好的预测器,分给较小的权重,对误差绝对值和小的子预测器,也即预测效果好的预测器,分给较大的权重。当某个子预测器的预测误差和为 0 时,使用一个任意小的数来代替<sup>[11-16]</sup>。

图像预测器属于非常典型的预测过程,因此完全可以借用自适应预测理论来研究。利用邻域像素,在不影响速度的情况下,尽可能地让邻域更大,但是由于图像相关性有限,太大对提高性能效果就不明显了。

预测器方程为

$$X = Ca \quad (1)$$

其中:  $X = \{x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-M)\}$  为被预测的像素点; 预测器系数矢量

$$a = [a(1) \quad a(2) \quad \dots \quad a(N)]^T;$$

邻域系数矩阵

$$C = \begin{bmatrix} x(n-1-1) & \dots & x(n-1-N) \\ \dots & \ddots & \dots \\ x(n-M-1) & \dots & x(n-N-M) \end{bmatrix}$$

使预测误差平方和最小, 得到闭式解

$$a = (C^T C)^{-1} (C^T X) \quad (2)$$

L. Xin 在文献 [15] 利用了上述预测器 (EDP), 并给出了在图像应用中的意义。文献 [15] 认为边缘有两个属性: 沿着边缘方向的像素变化比较小; 越过边缘的像素变化剧烈。对应于矩阵  $C$ , 如果当前像素的邻域处在边缘区, 则满秩, 有最优解; 否则, 有多解, 加权系数矢量处在一个超平面内, 此时由于像素处在平坦区域, 因此可以根据前面的结果来确定当前加权系数, 文献 [14] 还充分利用这一点, 提出所谓的边缘到边缘技术, 即在两次边缘之间, 加权系数不予更新, 从而大大减少运算量。

APC 预测器只用到邻近的 4 个点, 对相关较强的图像平坦区域具有良好的预测效果, 而对边界区域和纹理区域其预测效果不理想, 因此要解决这个问题, 需要使用的子预测器应包含更多的邻近像素点。基于 LS 准则的 EDP 预测技术则对于图像的边界区域有很好的预测效果, 如果把两者结合起来, 可以取得更高的压缩率。实现两者的结合有两种方案: 设置切换机制: 对于不同的区域, 使用不同的预测器; 采用自适应的联合技术, 联合 APC 预测器和 EDP 预测器。方案具有良好的预测特性, 但是实现比较难, 因此本文选择方案, 联合加权系数取各自的 MSE 之和的倒数。EDP 和 APC 联合预测性能实验结果表明, 联合预测器比各自的预测器性能更优。

### 3 基于整数小波变换和预测的无损压缩算法

本文利用可逆提升小波变换的特性, 将其与无损压缩联系起来, 利用小波变换尽可能地去掉图像大范围内的相关性, APC 在变换域进一步消除平滑区的相关性, EDP 在变换域对 SAR 图像丰富的纹理进行预测, 从而实现高效率地无损压缩。具体框图如图 1 所示。

算法中主要步骤如下:

(1) 对源图像进行整数小波变换。由于 SAR

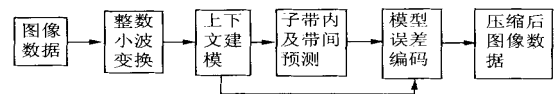


图 1 算法框图

Fig. 1 The diagram of the algorithm

图像的相关性较差, 以及预测编码与预测块大小的关系, 对 SAR 图像小波分解的层数要小于普通图像的分解层数<sup>[2]</sup>;

(2) 根据子带的特性, 由于最低频子带内系数相对平坦, 相关性较强, 因此选用对平坦区预测性能良好的 APC 预测编码技术, 其他子带相关性较差, 基本上是边缘区的高频泄漏, 因此采用对边缘非常有效的 EDP 预测编码技术。对预测误差采用自适应熵编码, 根据误差能量和纹理上下文总共设计了 576 种上下文, 对 576 种上下文采用误差修正技术, 接着采用直方图锐化技术, 再将上下文合并为 8 种, 最后对合并后的上下文模型进行预测误差拖尾截断, 提高压缩率<sup>[12]</sup>;

(3) 输出码流可以按照子带顺序排列, 实现分辨率累进编码。

由于小波变换具有时间-频率定位能力并初步实现了图像中平稳成分和非平稳成分的分离: 低频成分精确定位于频率域, 且基本平稳; 高频分量精确定位于空间域且为非平稳的。处理非平稳信号是统计信号处理的一个难点, 但对于图像, 其非平稳部分通常表现为边缘、纹理等 (对此 DCT 已很难说是“准最佳”), 被小波变换精确定位于空间域。此属性非常适合 SAR 图像中纹理特性。

对于小波变换后子带内各系数的相关性, 可利用上下文预测编码器 EDP+APC 进一步消除, 因 EDP 和 APC 联合可对平坦系数区和边缘系数区自适应选择预测器, 故有良好的预测效果。

### 4 实验结果

将 SAR 图像经过可逆提升小波变换后, 对各子带的系数分别采用基于上下文预测的编码, 预测器采用 EDP 和 APC 联合, 编码框架以最优 CALIC 算法为基础<sup>[12]</sup>。对国际标准测试图像 LENA (512 × 512 × 8) 和几幅 1m 分辨率的 SAR 图像 (512 × 512 × 8) 作了无损压缩测试实验。

考虑到图像的大小对预测编码的影响以及 SAR 图像的特性, 对图像作一层小波分解。其中小波基 13-7T, 低通分析滤波器和高通分析滤波器长度分别为 13 和 7, 消失矩都为 4。

边界处理采用周期对称延拓方式。预测器

EDP 和 APC 的联合加权系数取各自 MSE 的倒数。EDP 预测器参数  $N = 6, M = 6$ 。

由于小波变换后的系数的动态范围变化,原来的自适应分类熵编码的截断点必须根据系数动态范围自适应调整

$$N \rightarrow N \text{ Range}/255 \quad (3)$$

误差能量分类门限根据系数动态范围自适应调整

$$(d v - d h) \rightarrow (d v - d h) \text{ Range}/255 \quad (4)$$

表1 本文方法与 ISO JPEG2000 的实验结果比较

Table 1 Comparison between of the two algorithms

算法	lena	beijing_1m	taipei1m1	taipei1m2
JPEG2000 <sup>[5]</sup>	1.8570	1.2573	1.2565	1.3461
本文方法	1.9086	1.2859	1.2817	1.3732

从实验结果看出:

(1) 由于 SAR 图像的相干斑点噪声和纹理特性,SAR 图像的无损压缩率明显低于普通图像;

(2) 本文方法与 JPEG2000 相比,无论对自然图像还是 SAR 图像压缩率高达 0.02 以上。

## 5 结 论

对基于小波变换的压缩算法进行分析,提出了基于提升方案和上下文预测编码相结合的 SAR 图像压缩编码算法.该算法既具有可逆小波变换图像压缩编码的优点,又充分利用了子带内的相关性.实验表明该算法的无损压缩率已经超过即将推出的 JPEG2000 中的无损压缩效果。

## 参 考 文 献

- [1] 张澄波. 综合孔径雷达:原理、系统分析与应用[M]. 北京:科学出版社,1989.351-458.  
(Zhang C B. Synthetic aperture radar: principle, system analysis and application[M]. Beijing: Science Press, 1989. 351 - 458.)
- [2] 王祖林. 小波分析在 SAR 图像处理中的应用研究[D]. 北京:北京航空航天大学,1999.51-58.  
(Wang Z L. Study of application of wavelet analysis in SAR image processing[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999. 51 - 88.)
- [3] Sweldens W. The lifting scheme: A new philosophy in biorthogonal wavelet constructions [A]. Proceedings of SPIE: Wavelet Applications in Signal and Image Processing [C]. 1995, 2569: 68 - 79.
- [4] Calderbank A R, Daubechies I, Sweldens W, et al. Wavelet transforms that map integers to integers [R]. Department of Mathematics, Princeton University, 1996, Available from <http://cm.bell-labs.com/who/wim/papers/integer.ps>.
- [5] ISO/IEC J TC1/SC29 WG1 N1646R, JPEG 2000 Editor Martin Boliek, Co-editors Harilaos Christopoulos, and Ericajani, JPEG2000 Part I Final Committee Draft Version 1.0 [Z], March 2000

- [6] Adams M D, Kossentini F. Performance evaluation of several reversible integer-to-integer wavelet transforms in the JPEG 2000 baseline system[Z]. ISO/IEC J TC 1/SC 29/ WG 1 N 866, June 1998, Available from <http://www.ece.ubc.ca/~mdadams>.
- [7] Adams M D. Reversible wavelet transforms and their application to embedded image compression [D]. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Victoria, Victoria, Canada, 1998.
- [8] Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transform into lifting steps[J]. J Fourier Anal, 1998, 4(3): 247 - 269.
- [9] 张宁. 无损和 L 约束准无损图像压缩研究[D]. 北京:清华大学电子工程系, 1999.6-29.  
(Zhang N. Research on lossless and L - constrained near lossless image compression[D]. Beijing: Tsinghua Unveristy, 1999. 6 - 29.)
- [10] Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees[J]. IEEE Trans CASFVT, 1996, 6(3): 243 - 249.
- [11] ISO/IEC J TC1/SC29/ WG1. CD 14495, Lossless and near-lossless compression of continuous tone still images (JPEG - LS) [Z]. ISO Working Document ISO/IEC J TC1/SC29/ WG1 N522, 1997.
- [12] Wu X L, Memon N. Context-based, adaptive, lossless image coding[J]. IEEE Trans Communication. 1997, 45: 437 - 444.
- [13] Weinberger M J, Seroussiand G, Sapiro G. LOCO-I: A low complexity, context-based, lossless image compression algorithm[A]. Data Compression Conference [C]. 1996: 141 - 150.
- [14] Guang D, Hua Y, Cahill L W. Adaptive predictor combination and its applications in lossless image coding [A]. Advances in Medical Signal and Information Processing, 2000. First International Conference on (IEE Conf Publ. No. 476) [C]. 2000, 476: 110 - 116.
- [15] Xin L. Edge-directed statistical inference with application to image processing[D]. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Princeton, 2000.
- [16] Hua Y, Guang D, Devlin J C. Least Squares Approach for Lossless Image Coding [A]. The 5th ISSPA 99 [C], Brisbane, Australia, 1999: 63 - 66.

作者简介:



刘荣科(1973 - ) 男,陕西扶风人,北京航空航天大学信息通信工程专业毕业,获工学博士学位,研究方向为无线图像传输,通信与测控,现代信号处理等。

张晓林(1951 - ) 男,北京人,北京航空航天大学通信与电子系统专业毕业,获工学博士学位,现任北京航空航天大学电子工程系教授,博士生导师,电子工程系系主任,航空电子重点实验室主任。

(责任编辑:俞敏)