

## 多极化 SAR 图像 3D-SPIHT 压缩

张文超<sup>①②</sup> 王岩飞<sup>①</sup> 潘志刚<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 该文针对多极化合成孔径雷达(SAR)图像在极化通道之间的相关性,提出了 3D-SPIHT 压缩方法。将多极化 SAR 图像(HH, HV, VV 图像)作为一个整体,进行三维矩阵变换。首先在极化通道之间进行一维 DCT 变换,极化平面内进行二维离散小波变换(DWT),然后对 3 个极化混合系数平面采用分级树的集合划分(SPIHT)算法进行嵌入式统一混合编码。由于不是单独处理每一极化图像,因此不仅可以去除各极化图像内部之间的相关性,也可以去除极化通道之间的相关性。另外,由于采用统一嵌入编码,码流具有完全嵌入性,可以实现 3 个极化平面之间比特的精确自动分配。理论推导和仿真结果表明该方法对多极化 SAR 图像压缩是十分有效的。

**关键词:** 多极化 SAR 图像压缩; 三维矩阵变换; 分级树集合划分; 峰值信噪比

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)01-0216-04

## 3D-SPIHT Compression of Multi-polarimetric SAR Images

Zhang Wen-chao<sup>①②</sup> Wang Yan-fei<sup>①</sup> Pan Zhi-gang<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** This paper proposes a method for multi-polarization Synthetic Aperture Radar (SAR) images compression: 3D-SPIHT, which considers the multi-polarimetric SAR images(HH,HV,VV) as a 3D-matrix unit, then does 3D-matrix transform to it. First, 1D-DCT(Discrete Cosine Transform) is processed among the polarimetric channel and then 2D-DWT(Discrete Wavelet Transform) is processed in the polarimetric SAR image plane, finally, 3D-SPIHT algorithm is adopted to encode the mixed coefficients of three frames entirely. This method does not process every channel image separately, so it not only can remove the redundancies of the image inside, but also can remove the redundancies among the polarimetric channels. And what's more, the embedded code stream can implement the precise bit allocation among the polarization channels. Both the theory and the experimental results show that the method in this paper is efficient.

**Key words:** Multi-polarimetric SAR image compression; 3D-matrix transform; Set Partitioning In Hierachical Trees(SPIHT); Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)

### 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,已被广泛应用于军事侦察、地形测绘、资源勘探、植被分析等众多领域。随着科学技术的发展,人们不仅要求 SAR 能够提供更高分辨率的图像,还希望它能提供更为广阔、丰富的目标散射信息与地表物理特征信息。因此,多频、多极化、多模式是目前 SAR 重要发展方向之一。多极化信息的处理和提取大大增强了人们对地表信息的处理能力,但是极化 SAR 的多通道工作方式,同时也增强了高数据量和低数据下传率之间的矛盾。因而,对多极化 SAR 数据压缩算法的研究就显得更为迫切。然而传统的多极化 SAR 数据压缩是对每一极化通

道单独进行压缩。没有考虑到极化通道之间数据的相关性。

然而,极化SAR各极化通道之间存在一定的相关性,例如对于两个相同极化通道之间在海平面上,相关系数高达0.9以上;在森林地区,相关系数也在0.5左右,对于城市和公园地区来说,相关系数在0.3-0.25之间<sup>[1-3]</sup>。同时,同极化通道较交叉极化通道的相关系数高,在0.5左右<sup>[4]</sup>。对同一地域的多极化SAR图像具有相同的地物纹理信息,极化通道内部具有很大的相关性,因此在做极化SAR图像压缩时,不仅应考虑极化图像内部的相关性,还应考虑极化通道之间的相关性。

本文提出将同一场景的多极化 SAR 图像(HH, HV, VV, 根据互易性 HV,VH 应等同)表示在同一三维矩阵模型中,在极化通道之间做 DCT 变换,然后再对每一极化 SAR 图像进行相同的离散小波变换,三维矩阵的数据能量被压缩到矩阵

的左上角低频区域,充分去除极化图像内部和极化通道内的相关性。然后对该三维混合变换系数平面采用 3D-SPIHT 算法进行混合统一嵌入编码。解码端只需进行相应的解码和逆变换 IDWT, IDCT 即可。

## 2 多极化 SAR 图像三维矩阵变换

将多极化 SAR 图像数据表示在同一三维矩阵模型中,HH,HV,VV 极化图像分别对应三维矩阵的第一、第二、第三平面。设图像数据几何尺寸为  $M \times N$ , 则该三维矩阵可表示为  $M \times N \times 3$  的矩阵  $f(x, y, z)$ , 其中  $(x = 0, 1, 2, \dots, M-1; y = 0, 1, 2, \dots, N-1; z = 0, 1, 2)$ 。关于三维矩阵理论,可参见文献[5-8]。

对该三维矩阵在极化通道间进行 DCT 变换,以去除极化通道间的相关性。极化通道之间的 DCT 变换可表示为

$$\left. \begin{aligned} F(x, y, 0) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{z=0}^2 f(x, y, z) \\ F(x, y, Z) &= \sqrt{\frac{2}{3}} \sum_{z=0}^2 f(x, y, z) \cos \frac{(2z+1)Z\pi}{6} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

多极化 SAR 图像三维矩阵的构成可以有其他组合方式如 HH,VV,HV 分别构成三维矩阵的第一,第二,第三平面。但由于同极化间(HH 与 VV)强相关,同极化与交叉极化间(HH 或 VV 与 HV)弱相关,根据 DCT 变换理论和实验结果都可证明以 HH,HV,VV 组合分别构成三维矩阵的第一,第二,第三平面,DCT 系数能量更集中,能够更好地去相关,相同比特率下编解码图像具有最小的失真(证明略)。

经过 DCT 变换,三维矩阵的数据能量主要集中在第一平面,3 个数据平面之间的相关性大大降低。多极化 SAR 图像三维矩阵经过通道内 DCT 变换后,为消除极化通道平面内数据相关性,每一极化通道内的数据,可通过二维离散小波变换(DWT)来实现。根据二维离散小波变换定义,通过垂直和水平滤波,将原始图像数据分解为水平、垂直、对角和低频 4 个子带,其中低频部分可进一步分解。经过多层小波分解后,数据能量主要集中在到低频。对经过 DCT 变换后的三维矩阵的每一个平面进行相同的小波变换后,则该三维矩阵数据的能量将主要集中在矩阵第一平面的左上角。

多极化 SAR 图像三维矩阵变换(极化通道内的 DCT 变

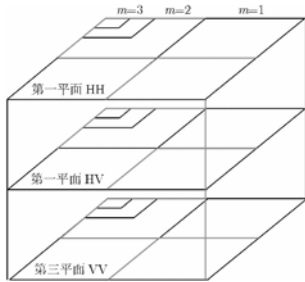


图1 多极化 SAR 图像三维矩阵变换示意图

换,极化平面内的多层小波变换)如图1所示。由于一维 DCT 变换和二维 DWT 变换都是线性变换,因此,多极化 SAR 图像三维矩阵变换算子  $1DCT_z$  和  $2DWT_{x,y}$  具有顺序互换性,即  $1DCT_z(2DWT_{x,y}(f(x, y, z))) = 2DWT_{x,y}(1DCT_z(f(x, y, z)))$ , 证明略。

## 3 3D-SPIHT 算法

多极化 SAR 图像经过三维矩阵变换后,得到的 DCT-DWT 混合系数三维矩阵之间的能量分布更为集中,相关性大大减小,但数据量没有减少。为实现压缩,需要对其采用编码压缩。小波变换系数属于稀疏阵,能量主要集中在低频子带以及高频子带中对应于图像边缘、轮廓的地方,其余地方取值大部分为零。小波变换编码的重点就是充分利用这些特征,使零码尽可能集中在一起,从而实现高效压缩。另外二维离散小波变换系数之间存在着天然的塔式数据结构特点:除最高分辨率下的 3 个高频子带外,每个高频子带中的每个像素点在空间位置上都对应于其相邻分辨率下的高频子带的 4 个像素点。低频子带中的每个像素点在空间位置上与最低分辨率下 3 个高频子带中的一个像素点存在着对应关系<sup>[9]</sup>。因此二维 DWT 系数的相关性不仅体现在子带内部,也体现在子带之间。

常规的 SPIHT 算法是由 Said 和 Pearlman 在 EZW 算法基础上提出的,是发展了零树的基本思想,利用了不同尺度之间和同一尺度下小波系数的相关性,通过空间树来更有效地组织小波系数<sup>[10]</sup>。但它只是针对一维灰度图像,本文将其发展到三维提出 3D-SPIHT 算法,对三维矩阵三个混合系数平面统一进行 SPIHT 嵌入编码。编码中要用到以下集合和链表。

集合  $H_{i\text{plane}}(i, j)$ ,  $D_{i\text{plane}}(i, j)$ ,  $O_{i\text{plane}}(i, j)$ ,  $L_{i\text{plane}}(i, j)$  分别表示第  $i\text{plane}$  平面的树根节点,节点  $(i, j)$  的后代节点、直接后代节点和非直接后代节点。不重要集合链表 ( $LIS_{i\text{plane}}$ ), 不重要系数集合链表 ( $LIP_{i\text{plane}}$ ) 及重要系数集合链表 ( $LSP_{i\text{plane}}$ )。其中  $i\text{plane} = 1, 2, 3$ 。

与 SPIHT 算法一样,根据空间方向树结构,将集合分裂策略定义为

$$\left. \begin{aligned} T_{i\text{plane}}(i, j) &= H_{i\text{plane}}(i, j) + D_{i\text{plane}}(i, j) \\ D_{i\text{plane}}(i, j) &= O_{i\text{plane}}(i, j) + L_{i\text{plane}}(i, j) \\ L_{i\text{plane}}(i, j) &= \sum D_{i\text{plane}}(k, l), \quad (k, l) \in O_{i\text{plane}}(i, j) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

与 SPIHT 算法编码过程一样,三维矩阵 SPIHT 算法也分为排序和细化两部分。基本运算也是集合重要性测试。

$$S_n(T_{i\text{plane}}) = \begin{cases} 1, & \max_{(i, j) \in T_{i\text{plane}}} \left\{ C_{i\text{plane}}(i, j) \right\} \geq 2^n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $C_{\text{iplane}}(i, j)$  表示第  $i$  plane 平面  $(i, j)$  位置的小波系数。

具体编码过程如下：

步骤 1 初始化

$$\text{输出} \begin{cases} n\_max_1 = \lfloor \log_2(\max_{(i,j)} \{C_{1,i,j}\}) \rfloor \\ n\_max_2 = \lfloor \log_2(\max_{(i,j)} \{C_{2,i,j}\}) \rfloor \\ n\_max_3 = \lfloor \log_2(\max_{(i,j)} \{C_{3,i,j}\}) \rfloor \\ n = n\_max_1 \end{cases} \quad (4)$$

对于 HH、HV、VV 组合，有  $n\_max_1 > n\_max_3 > n\_max_2$ 。

置重要系数集合链表 (LSP<sub>iplane</sub>) 为空，将坐标  $(i, j) \in H_{\text{iplane}}$  加入到 LIP<sub>iplane</sub>，有后代的坐标集合加入到 LIS<sub>iplane</sub>，标记为类型 A， $i\text{plane} = 1, 2, 3$ 。

步骤 2 排序过程

当  $n\_max_3 < n \leq n\_max_1$  时，只对  $C_1(i, j)$  进行排序。

当  $n\_max_2 < n \leq n\_max_3$  时，对  $C_1(i, j)$  进行排序，接着对  $C_3(i, j)$  排序。

当  $1 \leq n \leq n\_max_2$  时，对  $C_1(i, j)$  进行排序，接着对  $C_2(i, j)$ ， $C_3(i, j)$  排序。

步骤 3 细化过程

当  $n\_max_3 < n \leq n\_max_1$ ，对 LSP<sub>1</sub> 中的每一个表项  $(i, j)$ ，不包含刚才步骤 2 中加入的，输出系数  $|C_1(i, j)|$  的用二进制表示的第  $n$  位有效位；

当  $n\_max_2 < n \leq n\_max_3$ ，对 LSP<sub>1</sub> 及 LSP<sub>3</sub> 中的每一个表项  $(i, j)$ ，不包含刚才步骤 2 中加入的，输出系数  $|C_1(i, j)|$  及  $|C_3(i, j)|$  的用二进制表示的第  $n$  位有效位；

当  $1 \leq n \leq n\_max_2$ ，对 LSP<sub>1</sub> 及 LSP<sub>3</sub> 和 LSP<sub>3</sub> 中的每一个表项  $(i, j)$ ，不包含刚才步骤 2 中加入的，输出系数  $|C_1(i, j)|$  及  $|C_2(i, j)|$  和  $|C_3(i, j)|$  的用二进制表示的第  $n$  位有效位；

步骤 4 量化级更新 把  $n$  减 1，并转向步骤 2，直到达到要求的压缩比。统一嵌入编码码流格式如图 2 所示。解码过程与编码过程结构相同，将输入改为输出即可。

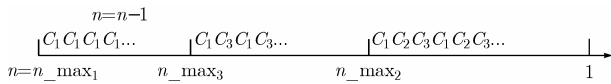


图 2 3D-SPIHT 嵌入码流示意图

#### 4 实验结果分析与比较

实验采取旧金山海湾地区的全极化 SAR 图像(图 3 所示)，尺寸为  $216 \times 192$  的 3 个极化图像构成  $216 \times 192 \times 3$  的三维矩阵，进行三维矩阵变换：极化通道间进行一维 DCT 变换，3 个极化平面内进行相同的二维离散小波变换。小波基采用双正交小波 bior4.4，分解层数为 3。对 3 个矩阵平面采用前面所述的 3D-SPIHT 算法进行统一嵌入编码。解码端只需三维 3D-SPIHT 解码，二维 IDWT，一维 IDCT 变换即可。

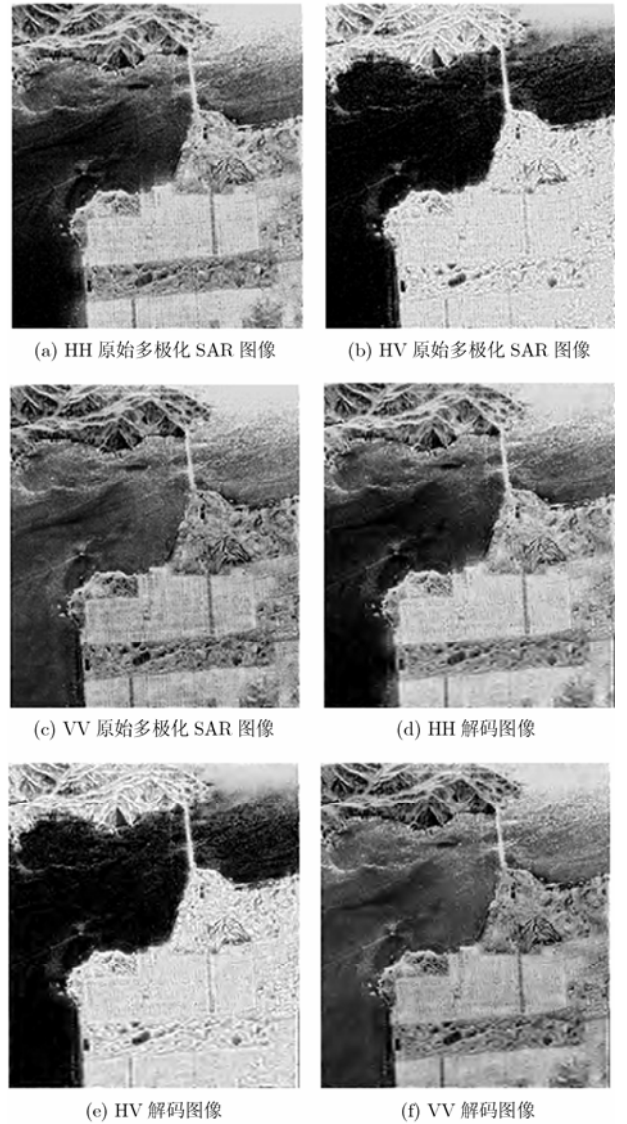


图 3 旧金山海湾地区多极化 SAR 图像及其 3D-SPIHT 解码图像

整个多极化 SAR 图像三维矩阵 SPIHT 压缩的编码和解码流程图如图 4 所示。解码图像质量用一定比特率下的峰值信噪比 PSNR 衡量。其中，比特率为

$$R = b_p / n_i \quad (5)$$

$n_i$  为输入图像数据总像素数， $b_p$  为编码后码流总比特数。

均方误差为

$$\text{MSE}(z) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (\mathbf{f}(x, y, z) - \hat{\mathbf{f}}(x, y, z))^2 \quad (6)$$

$\mathbf{f}(x, y, z)$  为原始多极化 SAR 图像； $\hat{\mathbf{f}}(x, y, z)$  为解码后重建多极化 SAR 图像。

峰值信噪比

$$\text{PSNR}(z) = 10 \lg \frac{\left( \max_{0 \leq x \leq M-1, 0 \leq y \leq N-1} (\mathbf{f}(x, y, z)) - \min_{0 \leq x \leq M-1, 0 \leq y \leq N-1} (\hat{\mathbf{f}}(x, y, z)) \right)^2}{\text{MSE}(z)} \quad (7)$$

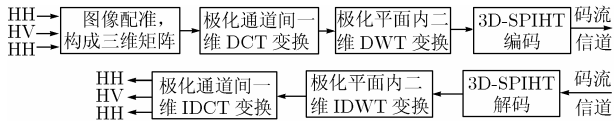


图 4 多极化 SAR 图像 3D-SPIHT 编码流程图

实验结果与采用 SPIHT 单独处理的多极化 SAR 图像的实验结果进行了比较,并与 JPEG2000 进行了比较,结果见表 1 所示。可以看到采用本文提出的三维矩阵 SPIHT 编码方法好对于单极化图像采用 JPEG2000 和 SPIHT 方法。由于其充分考虑到了多极化 SAR 图像极化通道之间的相关性,不仅去除了极化图像内部的相关性,也去除了极化通道之间的相关性。原始多极化 SAR 图像和三维矩阵 SPIHT 实验编解码后的 SAR 图像如图 3 所示。

最后,改变多极化 SAR 图像三维矩阵的组合方式,用 HH,VV,HV 来代替最优的 HH,HV,VV 组合方式,采用相同的编码方法,结果如表 2 所示,可以看到,在平均比特率相同情况下,HH, HV, VV 组合解码图像具有最优的峰值信噪比。

表 1 旧金山海湾地区多极化 SAR 图像压缩算法结果比较

压缩方法	平均比特率 (b/p)	PSNR(dB)			
		PSNR <sub>HH</sub>	PSNR <sub>HV</sub>	PSNR <sub>VV</sub>	$\overline{\text{PSNR}}$
三维矩阵 SPIHT	1.0	27.25	26.68	27.22	27.05
JPEG2000	1.0	24.90	25.60	24.70	25.07
SPIHT	1.0	25.10	25.90	25.00	25.33

表 2 三维矩阵不同极化组合方式结果比较

组合方式	PSNR(dB)			
	PSNR <sub>1</sub>	PSNR <sub>2</sub>	PSNR <sub>3</sub>	$\overline{\text{PSNR}}$
HH VV HV	27.08	26.58	26.60	26.75
HH VV VV	27.25	26.68	27.22	27.05

### 5 结束语

本文提出了一种针对多极化 SAR 图像的 3D-SPIHT 压缩算法:将多极化 SAR 图像的 3 个极化图像构成在一个三维矩阵中,极化通道内做一维 DCT 变换,极化图像平面内做二维小波变换,对 3 个矩阵平面采用本文提出的 3D-SPIHT 算法进行统一嵌入编码。该算法由于充分考虑了极化通道之间与极化图像内部之间的相关性。另外由于 3 个极化平面内比特的自动精确分配,实现了完全嵌入编码。因而无论理论还是试验结果压缩结果都表明这是一种很好的方法。

### 参考文献

- [1] Sheen D R and Johnston L P. Statistical and spatial properties of forest clutter measured with polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR). *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(3): 578-588.
- [2] Lee Jong-Sen, Hoppel K W, Stephen A, Mango A, and Miller R. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1017-1028.
- [3] Kong J A, Swartz A A, and Yueh H A. Identification of terrain cover using optimum polarimetric classifier. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1987, 2(2): 171-194.
- [4] Swartz A A, Yueh H A, and Kong J A. Optimal polarizations for achieving maximum contrast in radar images. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(12): 252-260.
- [5] 何振亚. 多维数字信号处理. 北京: 国防工业出版社, 1995: 34-54.
- [6] 朱艳秋, 陈贺新, 戴逸松. 彩色图像三维矩阵变换压缩编码. *电子学报*, 1997, 25(7): 16-21.
- [7] 朱艳秋, 陈贺新, 戴逸松. 彩色图像三维DCT变换压缩编码. *中国图像图形学报*, 1997, 2(11): 795-800.
- [8] 桑爱军, 陈贺新. 基于三维离散余弦变换的彩色图像压缩编码. *中国图像图形学报(A 版)*, 2002, 7(12): 1269-1273.
- [9] 沈兰荪, 卓力. 小波编码与网络视频传输. 北京: 科学出版社, 2005, 100-103.
- [10] William A S and Pearlman A. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Trans. on Circuits and System for Video Technology*, 1996, 6(2): 243-249.

张文超: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为微波成像、图像处理、模式识别和数字信号处理。  
 王岩飞: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像与数字信号处理。  
 潘志刚: 男, 1976 年生, 助理研究员, 研究方向为数据压缩、小波分析及信源编码。